

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи

**Янович Валерий Станиславович**

**МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В БРОНЕТЕХНИКЕ, ПРИ ИХ ОКИСЛЕНИИ И  
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ**

05.11.13—Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Безбородов Ю.Н.

Красноярск—2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ</b> .....	13
1.1 Краткие сведения о трансмиссиях, применяемых в бронетехнике .....	13
1.2 Основные требования и классификация трансмиссионных масел .....	14
1.3 Важнейшие эксплуатационные свойства трансмиссионных масел.....	17
1.4 Анализ эксплуатационных факторов, влияющих на надежность трансмиссий .....	21
1.5 Современные методы контроля эксплуатационных свойств трансмиссионных масел.....	40
1.6 Анализ современных методов контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел .....	47
Выводы по первой главе .....	55
<b>2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЗМА СТАРЕНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БРОНЕТЕХНИКИ</b> .....	57
2.1 Выбор трансмиссионных масел для исследования .....	57
2.2 Основные требования и краткая характеристика средств контроля состояния работающих и товарных масел .....	57
2.2.1 Основные требования к средствам контроля .....	57
2.2.2 Фотометрическое устройство .....	58
2.2.3 Малообъемный вискозиметр .....	60
2.2.4 Прибор для термостатирования смазочных масел .....	61
2.2.5 Трехшариковая машина трения.....	62
2.3 Методика контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел .....	64
2.4 Методика контроля трансмиссионных масел, находящихся на длительном хранении .....	66

2.5 Методика контроля противоизносных свойств трансмиссионных масел .....	69
2.6 Методика обработки экспериментальных данных .....	72
Выводы по второй главе .....	76
<b>3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ .....</b>	<b>78</b>
3.1 Результаты испытания минерального трансмиссионного масла ТСзп-8.....	78
3.2 Результаты испытания минерального трансмиссионного масла МС-20 .....	94
3.3 Результаты испытания минерального трансмиссионного масла МТ-8п ....	107
3.4 Анализ результатов контроля минеральных трансмиссионных масел .....	121
3.5 Результаты испытания трансмиссионных масел различной базовой основы .....	130
3.6 Результаты испытания трансмиссионного масла МТ-8п, находящегося в трансмиссиях при хранении бронетехники .....	147
Выводы по третьей главе.....	152
<b>4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ТОВАРНЫХ И РАБОТАЮЩИХ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ .....</b>	<b>156</b>
4.1 Технология контроля состояния трансмиссионных масел парка машин длительного и кратковременного хранения .....	156
4.1.1 Технология контроля состояния трансмиссионных масел по составу продуктов старения .....	156
4.1.2 Технология контроля концентрации легких фракций и воды в трансмиссионных маслах .....	157
4.1.3 Технология контроля концентрации продуктов износа в трансмиссионных маслах .....	159
4.1.4 Технология контроля потенциального ресурса товарных и остаточного ресурса работающих трансмиссионных масел .....	160
4.1.5 Технология контроля сопротивляемости окислению товарных трансмиссионных масел .....	165
4.1.6 Технология контроля температуры начала процессов окисления и испарения трансмиссионных масел .....	167

4.1.7	Технология контроля состояния работающих трансмиссионных масел парка машин .....	167
4.2	Технология контроля сопротивляемости старению работающих трансмиссионных масел .....	169
4.3	Технология контроля противоизносных свойств товарных и работающих трансмиссионных масел .....	170
4.4	Рекомендации по выбору трансмиссионных масел для трансмиссий.....	177
4.5	Рекомендации по классификации трансмиссионных масел .....	179
4.6	Рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел .....	182
	Выводы по четвертой главе.....	185
	<b>ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....</b>	<b>186</b>
	<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>188</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ: Акты внедрения .....</b>	<b>204</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность трансмиссий как триботехнических систем определяется прочностными характеристиками материалов, режимами смазки, качеством смазочного материала и режимами эксплуатации. Зависимость надежности триботехнических систем от качества смазочного материала, которое в процессе эксплуатации снижается из-за срабатывания противоизносных и противозадирных присадок, изучена недостаточно. Кроме того, долговечность трансмиссионного масла как элемента трибосистемы в разы уступает долговечности деталей агрегатов трансмиссии.

Проблема повышения эффективности использования трансмиссионных масел относится к одной из сложных научно-технических задач трибологии, материаловедения и химмотологии. Значительные трудности, возникающие при разработке теории старения смазочных масел и определении предельного состояния, связаны с большим количеством факторов, влияющих на их состояние. Такие факторы, как режимы и условия эксплуатации, техническое состояние трансмиссий, процессы старения масел, объем заливаемого масла, применяемые конструкционные материалы достаточно изучены и в этой области разработано большое количество методов и средств контроля. Можно выделить два основных направления исследований в области определения предельного состояния трансмиссионных масел: лабораторные и эксплуатационные. При лабораторных исследованиях контролируются основные эксплуатационные показатели качества, к которым относятся антиокислительные, противоизносные, противозадирные, коррозионные, диспергирующие, антипенные и вязкостные свойства. На основе лабораторных исследований разрабатываются рекомендации, которые проверяются и корректируются в условиях эксплуатации. Неэффективность такой системы заключается в установлении ресурса трансмиссионных масел заводами-изготовителями и регламентации его в километрах пробега.

Такая система контроля состояния трансмиссионных масел в период эксплуатации техники не предусматривает применения диагностических средств контроля и поэтому наряду со своей простотой не обеспечивает эффективности исполь-

зования масел и приводит к увеличению эксплуатационных затрат.

Неэффективность такой системы особенно проявляется в области эксплуатации бронетехники, которая используется периодически. При хранении такой техники процессы старения протекают с минимальной скоростью и не могут оцениваться пробегом. Кроме того, основные элементы трансмиссий работают в условиях граничной и эластогидродинамической смазки. Однако влияние продуктов старения на свойства этих слоев изучено недостаточно.

В этой связи разработка новых методов контроля состояния трансмиссионных масел в процессе периодического использования техники является актуальной задачей. Решение этой задачи должно быть комплексным, учитывающим изменение основных физико-химических показателей и влияния продуктов старения на противоизносные свойства трансмиссионных масел. Поэтому практическое и научное значение представляют исследования: механизма старения трансмиссионных масел в период эксплуатации; механизма окисления; влияния продуктов окисления и старения на противоизносные свойства масел и процессы, протекающие на фрикционном контакте при триботехнических испытаниях; изменения потенциального ресурса.

### **Степень разработанности темы**

Для оценки влияния процессов старения трансмиссионных масел в парке бронетехники и исследования процессов окисления в товарных маслах различной базовой основы, а также влияния продуктов окисления и старения на противоизносные свойства окисленных и работающих масел применен комплекс средств контроля включающий: фотометрическое устройство для прямого фотометрирования проб масел; прибор для термостатирования масел при статической температуре 150 °С и циклически изменяющейся в диапазоне температур от 120 до 150 °С; малообъемный вискозиметр; центрифугу; электронные весы для оценки испаряемости масел и трехшариковую машину трения со схемой «шар — цилиндр». Применение данных средств контроля позволяет осуществлять текущий контроль за состоянием работающих масел, применяемых в агрегатах трансмиссий бронетехники и установить различия в их качестве.

Исследования проводились по следующим направлениям: изучение механизма окисления товарных масел различной базовой основы при статической и циклически изменяющейся температурах; оценка состояния работающих трансмиссионных масел парка машин; оценка влияния продуктов окисления и старения на противоизносные свойства масел и исследование процессов, протекающих на фрикционном контакте при граничной смазке.

Существенный вклад в изучение процессов окисления (старения) смазочных масел внесли: В.А. Михеев, А.Б. Виппер, К.И. Климов, М.А. Григорьев, Л.А. Кондаков, С.Е. Крейн, А.В. Непогодьеv, К.К. Папок, Н.И. Черножуков, Г.И. Шор и многие др. На основании анализа данных исследований в настоящей работе предложен фотометрический метод контроля термоокислительной стабильности товарных и работающих масел, на основании которого обоснован критерий термоокислительной стабильности, учитывающий количество поглощенной тепловой энергии продуктами окисления и испарения. Предложен альтернативный критерий, характеризующий сопротивление испытываемого масла окислению и испарению, а также коэффициент интенсивности процессов самоорганизации при термостатировании, определяемый отношением скорости окисления к скорости испарения. Применение метода циклического изменения температуры испытания позволило определить температуры начала процессов окисления и испарения.

Изучением триботехнических свойств смазочных масел занимались: И.В. Крагельский, А.С. Ахматов, О.Б. Айнбиндер, И.А. Буяновский, В.Г. Виноградов, С.В. Венцель, Г.И. Шор, В.П. Лашхи, Р.М. Матвееvский, Ю.А. Розенберг, В.Н. Лозовский и др. Их работы содержат фундаментальные основы молекулярно-механической теории трения. На основании данной теории в настоящей работе предложен эмпирический критерий противоизносных свойств трансмиссионных масел, зависимость которого от концентрации продуктов окисления (старения) носит линейный характер.

Существенный вклад в изучение процессов, протекающих на фрикционном контакте, внесли Н.А. Буше, И.В. Крагельский, Н.М. Михин, А.Б. Виппер, И.С. Гершман, Д.Н. Гаркунов, Б.И. Костецкий, А.С. Кужуров и др. В этих работах

рассмотрены вопросы формирования на поверхностях трения защитных граничных слоев. На основе анализа результатов исследований предложен электрометрический метод оценки интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте, за счет пропускания постоянного тока (100 мкА) через пару трения от стабилизированного источника напряжения, что позволило определить электропроводность фрикционного контакта, время его формирования и влияние продуктов окисления (старения) на эти показатели.

**Актуальность диссертационной работы** заключается в том, что предложенные средства контроля позволяют получить дополнительную информацию о качестве товарных трансмиссионных масел, обеспечивающую обоснованный их выбор для эксплуатационных испытаний, и организовать текущий контроль за работающими маслами в период эксплуатации трансмиссий. Кроме того, применение фотометрического метода контроля процессов окисления и старения трансмиссионных масел позволяет снизить его трудоемкость и расширить информацию о качестве масел, а применение триботехнических испытаний позволяет обосновать предельное состояние по параметрам износа и процессам, протекающим на фрикционном контакте.

**Объектом исследования** являются товарные и работающие трансмиссионные масла, используемые в бронетехнике.

**Предмет исследования** — метод контроля состояния трансмиссионных масел при статической и циклически изменяющейся температурах и триботехнических испытаниях.

**Цель диссертационной работы:** повысить эффективность использования товарных и работающих трансмиссионных масел, посредством контроля их состояния оптическим, термическим и триботехническим методами испытания.

**Задачи исследования:**

1. Разработать комплексный метод контроля состояния товарных и работающих трансмиссионных масел с применением оптических, термических и триботехнических методов, расширяющий информацию об их состоянии.



2. Исследовать состояние работающих трансмиссионных масел, применяемых в трансмиссиях бронетехники с применением комплексной методики контроля и провести статистическую обработку экспериментальных данных.

3. Провести сравнительную оценку товарных трансмиссионных масел различной базовой основы, применяемых в трансмиссиях бронетехники, по параметрам термоокислительной стабильности и триботехническим характеристикам и обосновать критерии оценки.

4. Разработать практические рекомендации по контролю состояния товарных и работающих трансмиссионных масел с целью их выбора и установления сроков замены.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач осуществлялось с применением теории надежности, теории экспериментов, теории трения и износа, оптических, электрометрических, физических и триботехнических методов исследования.

При выполнении работы применялись стандартные и специально разработанные средства контроля, а для обработки экспериментальных результатов исследований использовались методы математической статистики и регрессионного анализа.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором,** подтверждается теоретически и экспериментально, научные положения аргументированны, теоретические результаты работы получены с использованием положений оптики, триботехники, теплотехники и электротехники, выводы подтверждены экспериментальными исследованиями, сопоставимы с результатами других авторов и результатами математической обработки с использованием сертифицированных программ.

**На защиту выносятся:**

1. Комплексный метод контроля состояния товарных и работающих трансмиссионных масел, включающий определение показателей термоокислительной стабильности, противоизносных свойств и процессов, протекающих на фрикционном контакте.

2. Результаты анализа работающих трансмиссионных масел парка машин по концентрации продуктов старения, воды, противоизносным свойствам, интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте, и кинематической вязкости.

3. Результаты исследования термоокислительной стабильности при статической и циклически изменяющейся температурах и противоизносных свойств товарных минеральных трансмиссионных масел, применяемых в бронетехнике, и альтернативных масел различной базовой основы, физическая модель процессов окисления и критерии оценки.

4. Результаты исследования процессов самоорганизации, протекающих в смазочном масле при термостатировании, и явление перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения.

5. Практические рекомендации по технологиям контроля товарных и работающих трансмиссионных масел.

**Научная новизна наиболее существенных результатов, полученных лично автором:**

1. Разработан комплексный метод контроля, позволяющий оценить состояние товарных и работающих трансмиссионных масел, установить новые критерии оценки процессов, протекающих в масле при статических и циклически изменяющихся температурах и триботехнических испытаниях.

2. Установлены общие закономерности и регрессионные уравнения изменения оптических свойств товарных и работающих трансмиссионных масел при окислении, характеризующиеся образованием двух видов продуктов различной оптической плотности, вызывающих изгиб зависимостей коэффициента поглощения светового потока от времени окисления, описываемых кусочно-линейными уравнениями и явления перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения, характеризующее процессы самоорганизации, протекающие в смазочном масле при окислении.

3. Предложены физическая модель процессов окисления трансмиссионных масел различной базовой основы, позволяющая обосновать альтернативный

критерий термоокислительной стабильности, учитывающий сопротивляемость температурным воздействиям, функциональные зависимости и регрессионные уравнения изменения противоизносных свойств окисленных трансмиссионных масел от концентрации продуктов окисления, а также критерий противоизносных свойств, характеризующий условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, позволяющий сравнивать различные масла.

4. Предложен электрометрический метод контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте в условиях граничного трения, позволяющий определить продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций, электропроводность граничного слоя и время формирования фрикционного контакта в зависимости от концентрации продуктов окисления (старения).

**Практическая значимость работы.** На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации, включающие технологии контроля: состояния трансмиссионных масел по составу продуктов старения; концентрации легких фракций и воды; концентрации продуктов износа; потенциального ресурса товарных и остаточного ресурса работающих трансмиссионных масел; сопротивляемости окислению; температур начала процессов окисления и испарения; состояния работающих масел парка машин; сопротивляемости старению работающих масел; противоизносных свойств товарных и работающих масел; выбора трансмиссионных масел для трансмиссий, а также по классификации и периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований использованы в учебном процессе Военно-инженерного института Сибирского федерального университета, на центральной базе резерва танков (войсковая часть № 54630) Министерства обороны Российской Федерации (пос. Козулька, Красноярский край).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на центральной базе резерва танков (пос. Козулька, Красноярский край, 2010–2014), научно-методических семинарах кафедры «Топливообеспечение и горючесма-

зочные материалы» (г. Красноярск, СФУ, 2008–2014), на первом международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире» (Красноярск, 2010), на 10-й Международной конференции «Трибология и надежность» (Санкт-Петербург, 2010).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, включая 8 работ в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, получено два патента РФ № 2453832, № 2485486.

Автор выражает признательность за помощь и поддержку научному руководителю доктору технических наук профессору Ю.Н. Безбородову, сотрудникам кафедры «Топливообеспечение и ГСМ» Института нефти и газа Сибирского федерального университета и кафедры «Физических методов и приборов контроля качества», Национального исследовательского Томского политехнического университета.

# 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

## 1.1 Краткие сведения о трансмиссиях, применяемых в бронетехнике

В период Великой Отечественной войны все серийные танки имели однопоточные механические ступенчатые трансмиссии, в состав которых входили: главный фрикцион сухого трения; простая коробка передач с переключением передач с помощью кареток или зубчатых муфт; механизм поворота в виде двух ступенчатых планетарных механизмов поворота или бортовых фрикционов; механические приводы управления непосредственного действия; однорядные или двухрядные бортовые редукторы.

Высокий КПД механической трансмиссии обеспечивал большой запас хода танка, а отсутствием дифференциала достигалось устойчивое прямолинейное движение. Применение механических трансмиссий объяснялось простотой и дешевизной их изготовления, легкостью ремонта в полевых условиях [1].

Гидромеханические трансмиссии отличались от механических следующим:

- плавной передачей от двигателя к ведущим колесам танка и непрерывным изменением крутящего момента в определенных пределах;
- меньшим числом передач и возможностью применения более простой конструкции автоматики переключения передач;
- возможностью, используя двухпоточные гидромеханические трансмиссии, осуществлять поворот танка на месте вокруг центра масс машины;
- предотвращением произвольного глушения двигателя при преодолении вертикальных противотанковых препятствий или при подводном вождении.

Преимущества электромеханических трансмиссий перед механическими заключаются в следующем:

- улучшении тяговых характеристик;
- снижении расхода топлива (так как частота вращения коленчатого вала

двигателя не зависела от скорости движения танка);

- улучшении поворотливости за счет непрерывного регулирования разности скоростей гусениц;
- улучшении тормозной характеристики за счет электродинамического торможения;
- легкости отбора мощности двигателя.

Кроме того, электромеханическая трансмиссия представляла собой передвижную электростанцию и позволяла ликвидировать дефицит электроэнергии в танке при одновременной и длительной работе многочисленных потребителей. В этой связи при создании первых послевоенных Отечественных танков были определены основные направления по совершенствованию трансмиссий.

## **1.2 Основные требования и классификация трансмиссионных масел**

Трансмиссионные масла представляют собой базовые масла, легированные различными функциональными присадками. В качестве базовых масел используют минеральные, частично или полностью синтетические масла. В агрегатах трансмиссий смазочное масло является неотъемлемым элементом конструкции. Способность масла выполнять и длительно сохранять функции конструкционного материала определяется его эксплуатационными свойствами. Общие требования к трансмиссионным маслам определяются конструктивными особенностями, назначением и условиями эксплуатации агрегата трансмиссии. Трансмиссионные масла работают в режимах высоких скоростей скольжения, давлений и при широких диапазонах температур. Их пусковые свойства и длительная работоспособность должны обеспечиваться в интервале температур от  $-40$  до  $+150$  °С. Поэтому к трансмиссионным маслам предъявляют довольно жесткие требования.

Основными функциями трансмиссионных масел являются [2]:

- предохранение поверхностей трения от износа, заедания, питтинга и других повреждений;
- снижение до минимума потерь энергии на трение;

- отвод тепла от поверхностей трения;
- снижение шума и вибрации зубчатых колес, уменьшение ударных нагрузок;
- масла не должны быть токсичными.

Для обеспечения надежной и длительной работы агрегатов трансмиссий смазочные масла должны обладать определенными характеристиками [2]:

- иметь достаточные противозадирные, противоизносные и противопиттинговые свойства;
- обладать высокой антиокислительной стабильностью;
- иметь хорошие вязкостно-температурные свойства;
- не оказывать коррозионного воздействия на детали трансмиссии;
- иметь хорошие защитные свойства при контакте с водой;
- обладать достаточной совместимостью с резиновыми уплотнениями;
- иметь хорошие антипенные свойства;
- иметь высокую физическую стабильность в условиях длительного хранения.

Все эти свойства трансмиссионного масла могут быть обеспечены за счет введения в состав базового масла соответствующих функциональных присадок: депрессорной, противозадирной, противоизносной, антиокислительной, антикоррозионной, антиржавейной, антипенной и др.

Многообразие вырабатываемых трансмиссионных масел, предназначенных для разнообразной техники, вызвало необходимость разработки и использования классификаций масел, позволяющих правильно решить вопрос выбора сорта масла для данной конструкции трансмиссии. Отечественная классификация трансмиссионных масел отражена в ГОСТ 17479.2–85.

В зависимости от уровня кинематической вязкости при 100 °С трансмиссионные масла разделяют на четыре класса ( таблица 1.1).

В соответствии с классом вязкости ограничены допустимые пределы кинематической вязкости при 100 °С и отрицательная температура, при которой дина-

мическая вязкость не превышает 150 Па·с. Эта вязкость считается предельной, так как при ней еще обеспечивается надежная работа агрегатов трансмиссий.

Таблица 1.1 – Классы трансмиссионных масел по ГОСТ 17479.2–85

Класс вязкости	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	Температура, при которой динамическая вязкость не превышает 150 Па·с, °С, не выше
9	6,00–10,99	–35
12	11,00–13,99	–26
18	14,00–24,99	–18
34	25,00–41,00	–

В зависимости от эксплуатационных свойств и возможных областей применения масла для трансмиссий автомобилей, тракторов и другой мобильной техники отнесены к пяти группам: ТМ-1–ТМ-5, указанным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Группы трансмиссионных масел по ГОСТ 17479.2–85 [2]

Группа масел по эксплуатационным свойствам	Состав масел	Рекомендуемая область применения
1	Минеральные масла без присадок	Цилиндрические, конические и червячные передачи, работающие при контактных напряжениях от 900 до 1600 МПа и температуре масла в объеме до 90 °С
2	Минеральные масла с противоизносными присадками	То же, при контактных напряжениях до 2 100 МПа и температуре масла в объеме до 130 °С
3	Минеральные масла с противозадирными присадками умеренной эффективности	Цилиндрические, конические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях до 2 500 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С
4	Минеральные масла с противозадирными присадками высокой эффективности	Цилиндрические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях до 3 000 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С
5	Минеральные масла с противозадирными присадками высокой эффективности и многофункционального действия, а также универсальные масла	Гипоидные передачи, работающие с ударными нагрузками при контактных напряжениях выше 3 000 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С



Группу масел устанавливают по результатам оценки их свойств по ГОСТ 9490–75 при разработке новых трансмиссионных масел и постановке их на производство, а также при периодических испытаниях товарных масел 1 раз в 2 года.

По классификации ГОСТ 17479.2–85 масла маркируют по уровню напряженности работы трансмиссии и классу вязкости. Например, в маркировке масла ТМ-5-18: ТМ означает начальные буквы русских слов «трансмиссионное масло», первая цифра – группа масла по эксплуатационным свойствам, вторая цифра – класс вязкости масла.

### **1.3 Важнейшие эксплуатационные свойства трансмиссионных масел**

Основной функцией трансмиссионного масла является снижение износа и предотвращение задира. Это свойство называют смазывающей способностью масла, которая возрастает при увеличении вязкости.

В зубчатых передачах реализуется гидродинамическое, смешанное и граничное трение, в подшипниках качения – эластогидродинамическое и граничное трение. Однако гидродинамический режим трения возникает только на периферии контакта зубчатых передач. Непосредственно в полосе зацепления наблюдается режим граничного трения. При этом режиме трения под воздействием высоких температур и нагрузок защита от износа и задира обеспечивается при помощи противозадирных и противоизносных присадок, в качестве которых используют серу-фосфор-бор – содержащие вещества.

В режиме граничного трения пленка смазочного масла, разделяющего поверхности трения очень тонкая, при этом в точках микроконтактов зубчатых колес возникают температуры (вспышки), которые в десятитысячные доли секунды достигают и превосходят температуру плавления металла. В этих условиях активные элементы противоизносных и противозадирных присадок вступают в химическое взаимодействие с металлом, образуя модифицированные слои с более низким напряжением сдвига. В зависимости от состава присадок эти слои пред-

ставляют собой сульфиды, оксиды, фосфаты или фосфиды железа. Модифицированная пленка образуется мгновенно и предотвращает задиры зубчатых колес.

Вязкость масла в этих условиях не имеет принципиального значения как при режиме гидродинамического смазывания. Однако в тонком слое масла с малой вязкостью может содержаться недостаточное количество противозадирной присадки, вследствие чего возникает опасность непосредственного контакта металлических поверхностей. Поэтому при производстве маловязких трансмиссионных масел их противозадирный потенциал повышают, увеличивая концентрацию присадок в 1,5 раза.

Вязкостно-температурные свойства трансмиссионного масла имеют большое значение для его эксплуатационной характеристики. От вязкости зависят потери мощности на трение и способность масла удерживаться в смазываемом узле.

Между вязкостью и потерями мощности в агрегатах трансмиссии существует прямая связь. Чем меньше вязкость масла, тем меньше потери энергии на внутреннее трение, тем выше КПД трансмиссии. Однако при уменьшении вязкости масла существует опасность увеличения задира, истирания и питтинга. Кроме этого, уменьшение вязкости масла ниже определенного уровня может привести к увеличению его расхода из-за несовершенства уплотнений и недостаточной герметизации трансмиссии. В связи с этим к маслу при его разработке предъявляют противоречивые требования. Для обеспечения холодного пуска трансмиссии при низких температурах и снижения потерь на внутреннее трение вязкость масла должна быть минимальной, а для обеспечения высокой несущей способности масляной пленки и снижения утечек через уплотнения – максимальной. Однако по мере совершенствования конструкций агрегатов трансмиссий повышение интенсивности их работы производится за счет граничного и смешанного трения, при которых вязкость масла теряет свое прежнее значение, а первостепенным является введение в масло эффективных функциональных присадок, осуществляющих защиту поверхностей трения от задира и износа. Улучшение материалов уплотнений позволяет использовать маловязкие масла в агрегатах трансмиссий.

В процессе работы зубчатых передач вследствие трения трансмиссионные масла интенсивно разогреваются. Повышенная температура в сочетании с активным действием кислорода воздуха и каталитическим действием металлических поверхностей приводит к усиленному окислению масла, образованию в нем нерастворимых веществ, выпадающих в осадок.

В результате окисления масла изменяются его физико-химические и эксплуатационные свойства: увеличивается вязкость, возрастает коррозионная активность, ухудшаются противозадирные свойства. Скорость и глубина окисления масла зависят от длительности окисления, температуры масла, каталитического действия металла, концентрации кислорода. Наибольший эффект на окисление масла оказывает температура. Состав базового масла также оказывает влияние на окисляемость трансмиссионного масла. Так, при уменьшении в основе содержания остаточного компонента наблюдается пропорциональное увеличение термоокислительной стабильности масла.

При работе смазочного масла в трансмиссии окисляются все его компоненты, в том числе и присадки. При этом эксплуатационные свойства масла ухудшаются. Особенно опасно уменьшение содержания в масле противозадирной присадки, что может вызвать отказ механизма. Для замедления процесса окисления в трансмиссионные масла вводят антиокислительные присадки. Эти ингибиторы действуют в двух направлениях – одни разрушают свободные радикалы, тем самым разрывают окислительную цепь, а другие взаимодействуют с пероксидами, образующимися в процессе окисления. В моторных и трансмиссионных маслах применяют антиокислители, работающие по механизму разрушения пероксидов. К ним относятся дитиофосфаты металлов.

Для защиты деталей от коррозии в трансмиссионные масла вводят ингибиторы. Эти вещества или тормозят процесс окисления, снижая в масле концентрацию агрессивных элементов, или нейтрализуют образовавшиеся в масле кислые продукты, или образуют на поверхностях трения плотную защитную пленку, исключая прямой контакт с ними агрессивных продуктов. Такая пленка пассивирует металл, предупреждая его каталитическое воздействие на окисление

масла. Поэтому большинство ингибиторов коррозии являются дезактиваторами металла.

Во время эксплуатации трансмиссионные масла могут обводняться. Это происходит вследствие поступления влаги через зазоры уплотнений и вследствие конденсации паров воды из воздуха и создает условия для появления электрохимической коррозии, которую устраняют введением в состав масла защитных присадок, называемых противоржавейными. Механизм действия защитных присадок сводится к вытеснению влаги и других электролитов с поверхности металла и образованию на нем прочной адсорбционной пленки, предотвращающей контакт металла с агрессивной средой.

В процессе работы зубчатых передач смазочное масло подвергается интенсивному перемешиванию, вследствие чего в него попадает воздух и образуется пена, а также ускоряются процессы окисления. Стойкость масел к вспениванию в значительной степени зависит от углеводородного состава масла, способа и глубины его очистки, природы функциональных присадок, давления и температуры.

В нефтяных маслах растворимость воздуха больше, чем в парафиновых. Растворимость воздуха в масле снижается при уменьшении температуры и давления. При повышении температуры процесс образования пены интенсифицируется и тем эффективней, чем меньше вязкость масла. Загрязняющие примеси и в некоторых случаях функциональные присадки увеличивают поверхностное натяжение пленки, повышая устойчивость пены, в результате зубчатые колеса смазываются масловоздушной смесью, что приводит к отказам зубчатых передач.

Основное назначение антипенных присадок – предупреждение образования стабильной пены в работающем агрегате. Антипенные присадки вызывают уменьшение поверхностного натяжения пленок, разделяющих мелкие пузырьки воздуха, которые объединяются в более крупные и легко разрываются, и пена гасится.

Анализ важнейших эксплуатационных свойств трансмиссионных масел показал, что основными из них, влияющими на надежность агрегатов трансмиссий, являются смазывающие свойства, а определяют ресурс масла – термоокис-

лительная стабильность и вязкостно-температурная характеристика. Однако продукты окисления влияют как на смазывающие свойства масла, так и на вязкость, поэтому в настоящей работе основное внимание уделено изучению процессов окисления.

#### **1.4 Анализ эксплуатационных факторов, влияющих на надежность трансмиссий**

К факторам, влияющим на надежность трансмиссий, относятся нагрузка, температура и скорость скольжения. Температурные условия эксплуатации трансмиссий зависят не только от внешних условий, но главным образом от нагрузки и скорости скольжения, определяющих температуру в зоне контакта, процессы окисления и температурную деструкцию масляного слоя, разделяющего поверхности трения.

Основными элементами трансмиссий являются зубчатые передачи и подшипники качения, в которых реализуется граничная и эластогидродинамическая смазка, основным видом изнашивания является усталостное напряжение, а опасным повреждением – заедание, приводящее к необратимым разрушениям поверхностей контактирующих деталей. Эффективной мерой против заеданий является легирование трансмиссионных масел противозадирными присадками, обеспечивающими формирование на поверхностях трения защитных модифицированных слоев.

На усталостную долговечность поверхностей зубьев и подшипников качения влияют вязкость масла, его вязкостно-температурные и низкотемпературные свойства.

При подборе трансмиссионных масел их кинематическая вязкость и низкотемпературные свойства определяются климатическими условиями эксплуатации и хранения техники, особенностями конструкций передач, мощностью двигателя, нагрузочными характеристиками и температурными режимами работы трансмиссий.

Для трансмиссионных масел, работающих в широком диапазоне температур [3,4], важна пологость вязкостно-температурной кривой в области температур, где масла подчиняются закону Ньютона:

$$\tau = \eta \frac{dV}{dn}, \quad (1.1)$$

где  $\tau$  – напряжение внутреннего трения, Н/м;  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  $dV/dn$  – скорость деформации жидкости, м/с.

Зависимость кинематической вязкости от температуры [3, 4] определяется законом Вальтера

$$\lg \lg(\gamma + 0,8) = A = B \lg T, \quad (1.2)$$

где  $\gamma$  – кинематическая вязкость, мм<sup>2</sup>/с;  $A$  и  $B$  – константы, зависящие от углеводородного состава масла;  $T$  – температура, °С.

Индекс вязкости (ИВ) характеризует вязкостно-температурные свойства масел в области положительных температур [5]:

$$\text{ИВ} = \frac{L - U}{P} \cdot 100, \quad (1.3)$$

где  $L$  – кинематическая вязкость при 40 °С нефтепродукта с индексом вязкости  $D$ , обладающего той же кинематической вязкостью при 100 °С, что и испытуемый нефтепродукт, мм<sup>2</sup>/с;  $U$  – кинематическая вязкость при 40 °С нефтепродукта, индекс вязкости которого требуется определить, мм<sup>2</sup>/с;  $D = L - H$ , где  $H$  – кинематическая вязкость при 40 °С нефтепродукта с индексом вязкости 100, обладающего той же кинематической вязкостью при 100 °С, что и испытуемый нефтепродукт, мм<sup>2</sup>/с;  $L$  и  $D$  определяются по таблице 3, приведенной в источнике [5].

Высокий индекс вязкости (>80) имеют хорошо очищенные масла, за исключением низко застывающих, загущенных полимерными присадками, которые независимо от углеводородного состава имеют высокий ИВ [6].

При низких температурах, близких к температуре застывания масла, вязкость зависит от градиента скорости сдвига, поэтому при динамической вязкости больше 4 000–5 000 Па·с, трогание с места автомобиля без подогрева трансмиссии затруднено [7].

По К.С. Рамайя [8], динамическая вязкость нефтяных и растительных масел удовлетворяет следующей зависимости от абсолютной температуры:

$$\eta = \exp\left(A\frac{B}{T}\right) \text{ или } \sqrt{\lg\eta} = \left(A\frac{B}{T}\right) \quad (1.4)$$

Как правило, динамическая вязкость качественных трансмиссионных масел нормируется при температуре на 5 °С выше температуры застывания.

При повышении давления вязкость масла повышается по экспоненциальному закону [8]:

$$\eta = \eta_0 e^{dp}, \quad (1.5)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость при давлении  $P$ ;  $\eta_0$  – динамическая вязкость при атмосферном давлении;  $e$  – основание натурального логарифма;  $d$  – пьезокоэффициент вязкости,

$$d = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{d\eta}{dp}.$$

Для нефтяных масел значение составляет от 0,0015 до 0,004 [9].

При выборе трансмиссионных масел необходимо учитывать, что для трансмиссий характерны высокие нагрузки на зубья передач (до 294,3 МПа) и непостоянство режимов работы. Износ, а в некоторых случаях заедание зубьев передач при их работе на маслах без присадок свидетельствует о том, что гидродинамические и контактно-гидродинамические законы смазки для них не характерны.

Ощутимое повышение долговечности зубчатых передач трансмиссий достигается применением противоизносных и противозадирных присадок к маслам.

Температура начала взаимодействия химически активных противозадирных присадок с металлом определяет условия их применения и правильность выбора. Присадки не должны реагировать с металлом при температуре масла, равной объемной температуре, чтобы не вызывать коррозию, но должны вступать в реакцию при температурах, которые возникают в контакте зубчатой передачи. Поэтому при подборе присадок и выборе масел с присадками необходимо иметь представление о температурах, возникающих на поверхностях трения. Следует отметить, что работ в области определения температур начала действия противоизносных и противозадирных присадок на триботехнические характеристики масел очень мало. В работе [10] предложен метод контроля влияния температуры и нагрузки на триботехнические характеристики масел, позволяющий определить температуру начала действия присадок, предотвращающего схватывание, а в работе [11] – метод управления смазывающими свойствами масел, заключающийся в изменении электрического потенциала на поверхностях трения, усиливающего процессы формирования модифицированных и граничных слоев.

Температура на поверхностях трения может быть приближенно рассчитана по формулам Блока [3, 12, 13]. Температура контакта на головке зуба шестерни  $\theta_{V_{ш}}$  (ножка зуба колеса) рассчитывается по формуле:

$$\theta_{V_{ш}} = 0,83 \frac{fq \left( \frac{V'_{ш} - V''_{к}}{\sqrt{V'_{ш}} + \sqrt{V''_{к}}} \right)}{\sqrt{\lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot \nu_1 V_{ш}}}, \quad (1.6)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $q$  – погонная нагрузка на зуб, Н;  $V'_{ш}$  – скорость головки зуба шестерни, м/с;  $V''_{к}$  – скорость ножки зуба колеса, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость стали, Дж/(кг·К);  $\nu_1 V_{ш}$  – половина ширины полосы контакта на головке зуба шестерни, см.



Температура контакта на головке зуба колеса (ножке зуба шестерни) рассчитывается по формуле:

$$\theta_{V_K} = 0,83 \frac{fq \left( \frac{V'_K - V''_{ш}}{\sqrt{V'_K} + \sqrt{V''_{ш}}} \right)}{\sqrt{\lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot \vartheta_1 V_K}}, \quad (1.7)$$

где  $V'_K$  – скорость головки зуба колеса, м/с;  $V''_{ш}$  – скорость ножки зуба шестерни, м/с;  $\vartheta_1 V_K$  – половина ширины полоски контакта на головке колеса, см.

Расчетные значения  $\theta_{V_{ш}} = 275 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{V_K} = 281 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Контактная нагрузка  $H$  на головке зуба шестерни:

$$P_{V_{ш}} = q/2\vartheta_1 V_{ш}, \quad (1.8)$$

где  $\vartheta_1 V_{ш}$  – половина ширины полоски контакта на головке зуба шестерни, см.

Контактная нагрузка на головке зуба колеса:

$$P_{V_K} = q/2\vartheta_1 V_K. \quad (1.9)$$

Механизм заедания в зубчатых передачах по данным [14] является трех-стадийным процессом. На первой стадии происходит разрушение эластогидродинамической пленки, разделяющей трущиеся поверхности, а при дальнейшем ужесточении режимов эксплуатации – разрушение граничных смазочных слоев. Второй стадией заедания является схватывание и разрушение обнажившихся вершин микронеровностей на отдельных участках поверхностей контактирующих тел. Третья стадия необратимое схватывание и повреждение активных участков поверхностей деталей.

На первой стадии заедания [15] переход к нему осуществляется при невысоких скоростях от эластогидродинамической смазки к граничной, а затем к режиму заедания. При высоких скоростях переход происходит непосредственно от частично эластогидродинамического режима к заеданию, поэтому его можно рассматривать как кинетический, на первой стадии которого происходит разрушение

смазочного слоя, а на втором – образование и разрушение адгезионных связей между контактирующими телами в процессе относительного перемещения. На третьей стадии количество образовавшихся связей возрастает до критического числа, превышение которого вызывает лавинный процесс заедания. Представленный механизм заедания показывает, какую роль играет смазочный материал и легирующие присадки, способные повысить нагрузку схватывания.

На трехстадийную модель заедания смазанных тяжело нагруженных трибо-сопряжений существенное влияние оказывает температура и качество смазочного материала. Многостадийность процесса заедания подтверждается исследованиями Г.В. Виноградова [16] и И.В. Крагельского [17], которые выявили два типа заедания – холодное и горячее. Б.И. Костецкий [18] рассматривает два типа схватывания – низкотемпературное (низкоэнергетическое) и высокотемпературное (высокоэнергетическое). В.Н. Кащеев [19] различает холодный задир, в котором ведущую роль играет твердость материала, и горячий, при котором скорость изнашивания практически не зависит от исходной твердости материала. Однако границы перехода одного вида задир в другой авторами работ не установлены.

Авторы [20] считают, что существуют четыре типа катастрофического изнашивания, из которых два можно отнести к низкоэнергетическому типу, а два – к высокоэнергетическому. Задир при низкоэнергетическом изнашивании реализуется при скорости деформирования меньше 0,4 м/с, при этом твердость ядра задир будет больше твердости поверхности. Схватывание при низкоэнергетическом изнашивании реализуется при тех же скоростях деформирования, но твердость ядра будет меньше твердости поверхности.

Высокоэнергетическое изнашивание реализуется при скоростях деформирования больше 0,7 м/с, причем заедание первого рода наступает при температуре меньше критической, а заедание второго рода – при температуре больше критической. Заедание первого рода характеризуется развитием аморфного формирования адгезионно сцепленных микронеровностей с последующим их перемешиванием и размазыванием по поверхности с большим коэффициентом перекрытия.

Заедание второго рода – функциональным нагревом и размягчением материала одной из поверхностей и намазыванием его на другую, более холодную поверхность. Однако в рассмотренных работах отсутствуют критерии перехода одного вида заедания в другой.

Согласно представлениям В.И. Владимирова, В.В. Рыбина и др. [21, 22], уже при сравнительно небольших деформациях дислокационный механизм сменяется дисклинационным, основанным на ротации больших структурных элементов, присущих фрагментированным структурам, образующимся в поверхностных слоях при трении [23].

Перемещаясь через весь кристалл, дислокация двигает его части на один период кристаллической решетки параллельно самим себе. Размножаясь, дислокации препятствуют взаимному перемещению, вследствие чего происходит упрочнение на поверхности трения. При плотности дислокации  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$  их поля напряжений взаимодействуют между собой интенсивнее, чем с внешним полем, поэтому они собираются и перемещаются коллективно как единый ансамбль [20]. Если такой ансамбль содержит дислокации разных знаков, то его перемещение приводит к повороту кристалла, т. е. осуществляется ротационная мода деформирования. При скоростях деформации меньше 0,4 м/с – это дислокационная мода (низкоэнергетическое изнашивание), а при скоростях больше 0,7 м/с – это аморфная деформация (высокоэнергетическое изнашивание).

В этой связи если твердость адгезионного зародыша превысит твердость обеих поверхностей трения, то изнашивание развивается по механизму задира. Если поверхности близки по твердости, то смазочный материал течет кругообразно вокруг адгезионного соединения и, как результат, в зоне контакта стягивается в упрочненное ядро – зародыш задира. Если твердость какой-либо деформации из поверхностей трения выше твердости адгезионного зародыша, то изнашивание развивается по механизму схватывания, которое развивается за счет переноса и локального аккумуляирования порций мягкого материала на продольных твердых гребнях контрповерхности. Отдельные островки перенесенного металла объеди-

няются в твердый выступ, который на поздней стадии наклепа пропахивает мягкую поверхность, оставляя на ней глубокую борозду.

Таким образом, задир характеризуется пластическим деформированием обеих поверхностей трения и отсутствием макроскопического адгезионного переноса. При задирах твердость адгезионного ядра больше твердости поверхности трения, поэтому оно служит «затравкой» для двух механически сцепленных клиньев, поочередно скользящих и развивающихся каждый на той поверхности, из материала которой он формируется.

Схватывание характеризуется пластическим деформированием и формированием расширяющихся борозд только на одной, мягкой, поверхности и макроскопическим адгезионным переносом материала с более мягкой поверхности на более твердую. В отличие от задира, образующийся при этом нарост формируется из материала сопряженной поверхности и прочно скреплен со скоплением металла в головке борозды.

Для предупреждения задира необходимо увеличить твердость одной из поверхностей выше определенного предела, что переведет фрикционное сопротивление в зону схватывания и тем самым повысит критическое давление и снизит износ обеих поверхностей. При этом увеличение твердости поверхности трения с большим коэффициентом перекрытия (вала) выгоднее, чем с меньшим (колодки). Устранить заедание первого рода возможно только подбором смазочного материала, а заедание второго рода можно устранить, повысив теплостойкость материалов пары трения.

Известно [24], что на участках фактического контакта поверхностей трения происходит циклический переход напряжений от одного знака к другому, в результате чего постепенно создаются условия усталостного разрушения. Впереди микровыступа перемещается волна сжатия, а вслед за ним – растяжение, что является особенностью усталостного изнашивания. Поэтому установление закономерностей и количественных характеристик фрикционной усталости – актуальная задача триботехники.

Методы оценки усталости материала при трении можно разделить на три группы [24]:

- методы оценки характеристик фрикционной усталости без триботехнических испытаний;
- триботехнические испытания на износ;
- регистрация косвенных параметров при триботехнических испытаниях.

К первой группе методов относятся:

- метод оценки характеристик усталостного разрушения по испытаниям на объемную усталость [25, 26];
- метод [27], связывающий долговечность с прочностью флуктуации температуры;
- расчетные методы определения параметров фрикционной усталости, основанные на оценке напряжений при трении скольжения и прочностных материалов [28].

Методы второй группы при испытании на износ, предусматривают использование машин трения, позволяющих определить число циклов фрикционного нагружения материала единичным индентором [29, 30] до появления частиц износа.

К третьей группе относятся методы определения характеристик фрикционной усталости на стандартных машинах трения с ускоренными испытаниями на износостойкость. Наиболее распространенным методом является оценка характеристик усталостного разрушения при трении с использованием измерения ширины рентгеновских дифракционных линий  $\beta$  [31, 32]. Авторами [32] установлено, что изменение ширины указанных линий, характеризующих зависимость плотности дислокаций в материале от числа проходов контртела по поверхности образцов, носит трехстадийный характер: упругопластическая стадия; пластически деструкционная; появление и распространение магистральной трещины. В качестве структурно-чувствительного параметра, контролирующего процесс усталости при трении скольжения, использовалось контактное электросопротивление

[33–35]. Отмечено наличие корреляции между периодическими изменениями контактного электросопротивления с шириной дифракционной линии.

В работе [36] в качестве параметра, характеризующего усталостное разрушение, принята работа выхода электрона. Этот параметр обладает высокой чувствительностью к явлениям, сопровождающим процесс трения в зоне фрикционного контакта: пластическому деформированию, обновлению поверхности, адсорбции, окислению, фазовым переходам, перераспределению легирующих компонентов сплава [37–39]. Эффективность применения данного параметра доказана в работах [40–42].

В работе [43] рассмотрено влияние параметров трения на энергию активации трибохимического разложения смазочных материалов в зоне трения качения. Показано, что ресурс подшипника качения с одноразовой закладкой смазки связан не с усталостным изнашиванием, заеданием или износом, а со скоростью протекания реакций трибопревращений смазочного материала, которая значительно выше, чем износостойкость контактирующих поверхностей [44].

В результате испытания подшипников качения на продолжительность работоспособности смазочного материала в зависимости от температуры, нагрузки и скорости вращения с одноразовой закладкой смазки на пятишариковой машине трения установлено следующее:

- Связь между предельной работоспособностью  $\tau$  и объемной температурой узла трения  $T$  при постоянной нагрузке и скорости вращения описывается уравнением Аррениуса.
- При прочих равных условиях, чем больше среднее контактное напряжение  $\sigma$  и скоростной фактор  $d_n$ , тем меньше продолжительность работоспособности смазочного материала.

Состав продуктов и основные закономерности трибопревращений смазочного материала в зоне трения изучались с использованием методов разделения и анализа [45, 46]. Установлено, что смолообразные продукты способны поддерживать работоспособность масел, а коксообразные резко ее снижают.

Энергия активации, вычисляемая по уравнению Аррениуса, является кажущейся, поскольку включает в себя значение теплоты адсорбции и химического взаимодействия смазочного материала с материалами тел качения и дорожками качения:

$$\frac{1}{\tau} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1.10)$$

где  $1/\tau$  – константа скорости химической реакции;  $A$  – const;  $E$  – суммарная энергия активации;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;

$$A = \ln\left(\frac{1}{\tau}\right). \quad (1.11)$$

$$E = E_1 + a_1\sigma + a_2d_n, \quad (1.12)$$

где  $E_1$  – константа,  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты, характеризующие влияние контактного напряжения  $\sigma$  и скоростного фактора  $d_n$  на суммарную энергию активации  $E$ .

Чем больше величина суммарной энергии активации  $E$  для принятых условий испытания, тем более триботехнически стабильным является смазочный материал. Константа  $E_1$  отражает вклад в суммарную энергию активации срабатывания смазочного материала факторов, не связанных с параметрами трения: испарение, окисление, термический распад и растекание смазочного материала, характеризуемое величиной поверхностного натяжения. Величины  $E$  и  $E_1$  при испытании в вакууме снижаются по сравнению с испытаниями в атмосферном воздухе.

При граничной смазке металлический контакт трущихся тел предотвращается за счет образования на поверхностях трения граничных слоев различного происхождения. Они образуются в результате взаимодействия рабочих поверхностей, активированных процессом трения, с активными компонентами смазочного материала [47].

Способность смазочного материала образовывать прочные граничные слои достаточной толщины за короткое время (температурные вспышки) в значительной степени определяет долговечность тяжело нагруженных трибосопряжений, работающих постоянно или периодически в режиме граничной смазки [48].

Среди известных образований и разрушений граничных слоев важное место занимают кинетические модели, позволяющие описать взаимосвязь термодинамических и кинетических параметров процессов образования и разрушения граничных слоев в зависимости от параметров нагружения.

Кинетические модели граничной смазки можно условно подразделить на четыре группы:

- модели разрушения граничных слоев вследствие порчи смазочной средой своих активных элементов;
- модели образования граничных слоев за время, предоставленное трибологическим процессом;
- модели перехода к заеданию при превышении скорости разрушения граничных слоев над скоростью их образования;
- модели изнашивания при граничной смазке [48].

И. Ленгмюром, В. Бюхе, Б.В. Дерягиным [49] установлено, что участвующий в трибологическом процессе смазочный материал постепенно срабатывается и не может в дальнейшем выполнять свои функции, поскольку его активные компоненты адсорбируются на продукты износа и уносятся вместе с ними из контакта либо взаимодействуют с металлической поверхностью вследствие триботехнических превращений под воздействием тепловой энергии, генерируемой в процессе трения, и каталитического воздействия свежей обнаженной поверхности металла (группа 1). В таких случаях противозадирные свойства смазочного материала не играют решающей роли в обеспечении работоспособности узла трения. Согласно [50], предложен метод оценки кинетических характеристик этого процесса, учитывающий, что заедание имеет место в случае, когда скорость  $V_{пр}$  превращений смазочного материала в продукты, не обладающие смазочной способностью, превышает скорость  $V_{п}$  поступления смазоч-



ного материала в зону трения. Скорость разложения оценивается по закону Аррениуса:

$$\lg V_{\text{пр}} = A - (E / 2,3RT) \quad (1.13)$$

где  $A$  – постоянная,  $T$  – абсолютная температура в контакте,  $E$  – энергия активации процесса трибологических испытаний,  $R$  – газовая постоянная.

Связь между  $V_{\text{пр}}$  и скоростью относительного перемещения трущихся тел  $V_0$  можно выразить уравнением [48]

$$V_{\text{пр}} = V_0 / L \quad (1.14)$$

где  $L$  – длина герцовского контакта, графически оцениваемая параметром аппроксимации линейной зависимости  $\ln(V_0 / L)$  и  $1 / T$ .

Таким образом, можно определить энергию активации  $E$  процесса деградации смазочного материала, как произведение тангенса угла наклона этой зависимости на величину газовой постоянной  $R$ .

Модели образования граничных слоев за время, предоставленное трибологическим процессом (группа 2), достаточно упрощенные и предназначены не столько для описания трибологического процесса, сколько для оценки кинетической характеристики процесса, используемой с целью оптимизации либо состава смазочного материала, либо микрогеометрии трибологического контакта.

В работе [50] выведено кинетическое уравнение для расчета энергии активации процесса образования модифицированного слоя на основе сравнения времени, необходимого для достижения модифицированным слоем в трибологическом контакте толщины, достаточной для эффективного снижения коэффициента трения и замены интенсивного адгезионного изнашивания более мягким коррозионно-механическим, и времени между последовательными контактами микронеровностей, за которое возможен рост этого слоя. Модель позволяет оценить температуру начала эффективного действия химически активных приса-

док и предельную температуру, при которой граничная смазка полностью теряет эффективность. В этой связи необходимо отметить, что испытания смазочных материалов при низких температурах могут искажать их действительные противозносные свойства в условиях граничной смазки.

Модели перехода к заеданию (группа 3) при превышении скорости разрушения граничных слоев над скоростью их образования можно разделить на две подгруппы. К первой относятся модели, основанные на представлении о том, что разрушение граничного слоя достаточно для реализации заедания узла трения, ко второй – модели предполагающие, что для реализации заедания сопряжения необходимо достижение критического цикла адгезионных связей между контактирующими поверхностями на участках металлического контакта, образовавшихся вследствие разрушения граничного слоя, причем рост числа связей рассматривается как кинетический процесс.

Модели третьей группы можно классифицировать по происхождению граничного слоя, разрушение которого является одним из необходимых этапов для реализации заедания. Процессы разрушения граничного слоя происходят вследствие конкуренции адсорбции и десорбции молекул поверхностно-активных веществ. Разрушения модифицированного слоя рассматриваются как кинетические, и их скорости обуславливаются химической кинетикой. Заедание трибосопряжения возникает при температуре, когда скорость разрушения модифицированных слоев превышает скорость их образования. Температура вызывает термическое разложение модифицированных слоев, скорость их разложения описывается уравнением Аррениуса.

Кинетические модели изнашивания при граничной смазке (группа 4) достаточно изучены. Поскольку первичным этапом образования граничных слоев является адсорбция активных компонентов смазочного материала на поверхностях трения, можно ожидать, что при невысоких нагрузках и контактных температурах могут быть эффективны модели изнашивания, основанные на адсорбционных представлениях.

Кинетическая модель Б.И. Костецкого [18] включает три стадии: 1 – адсорб-

ция молекул реагента на поверхностях трения; 2 – взаимодействие этих молекул с поверхностным слоем металла и образованием модифицированного слоя; 3 – разрушение этого слоя с обнажением поверхности активированного металла, готового к дальнейшему взаимодействию со средой. Исходя из этого было предложено следующее уравнение для оценки интенсивности –  $I$  механического изнашивания при граничной смазке

$$I = 2h_{\mu} \gamma k^P \sqrt{\frac{(s \cdot h_{\mu} / \Gamma \cdot h_{\text{ад}}) k_1^A}{k_2^D + k^M}}, \quad (1.15)$$

где  $h_{\mu}$  – толщина модифицированного слоя;  $\gamma$  – удельная масса вторичных структур;  $k^P$ ,  $k_1^A$ ,  $k_2^D$ ,  $k^M$  – контакты скорости разрушения, адсорбции, десорбции и модификации соответственно;  $S$  – площадь пятна контакта;  $\Gamma$  – адсорбция;  $h_{\text{ад}}$  – толщина адсорбционного слоя.

Однако применение данного уравнения на практике затруднительно из-за отсутствия значений констант.

На долговечность узлов трансмиссией существенно влияют органические отложения. Известно [51], что при трении в режиме граничной смазки на поверхностях формируются: слой физически адсорбированных молекул смазочного материала, относительно слабо связанных с поверхностью ( $A$ -слой); хемосорбционный слой, прочно связанный с поверхностью органических отложений, образуемый преимущественно продуктами окисления и деструкции смазочного материала ( $D$ -слой), а также химически модифицированный слой на базовом металле при прямых химических реакциях металла с молекулами присадок ( $M$ -слой).

Большое количество работ посвящено изучению состава, структуры и толщины  $A$  и  $M$ -слоев и в значительно меньшей степени изучены свойства  $D$ -слоев. Их формирование зафиксировано для многих типов контактных пар трения при различных условиях эксплуатации, включая: трения основных и благородных металлов в условиях как повышенных, так и невысоких температур [52]; фреттинг в условиях без существенного повышения температур [53]; контакт смазочного

материала с горячей поверхностью металла.

В динамическом контакте определение вклада *D*-слоя в уровень регистрируемых фрикционных характеристик, как и вообще его обнаружение, затруднено. Для изучения свойств *D*-слоев используются методы электрофизического зондирования [54]. Модельные эксперименты доказали, что как химически активные присадки минерального масла, так и его инактивные компоненты могут формировать *D*-слои при контакте с умеренно нагретой ( $\approx 220$  °С) поверхностью стали. При комнатной температуре *D*-слои повышают несущую способность контакта при нормальном нагружении, а их антифрикционные свойства и износостойкость при трении скольжения зависят от природы смазочного материала и условий формирования этих слоев. Однако механизм образования *D*-слоев изучен недостаточно.

Анализ полученных данных показывает, что при режимах эксплуатации узла трения, когда химически модифицированные слои на поверхностях трения за счет прямых реакций с присадками не образуются, формирование *D*-слоев может оказать определенное влияние на фрикционное поведение контакта.

Образование защитных слоев, вторичных структур, выход дислокаций на поверхность – все эти процессы являются элементами самоорганизации трибосистемы, в которой участвует пара материалов трения и смазочный материал. Поэтому трение является классическим примером неравновесного процесса, который можно рассматривать с позиции теории самоорганизации необратимых процессов [55]. Из кажущейся хаотичности процессов, происходящих при трении, выделяются те, которые всегда имеют место. Это, во-первых, явление изнашивания и, во-вторых, явление образования вторичных структур, или явление структурной приспособляемости при трении.

Стабилизация параметров трения и снижения износа сопровождаются образованием и стабилизацией состава вторичных структур, которые осуществляют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействия внутри твердых тел и препятствуя их непосредственному взаимодействию. Трибосистема стремится сосредоточить все виды взаимодействия в тонких поверхностных сло-

ях. Согласно данным Б.И. Костецкого [56], от 90 до 98 % энергии трения аккумулируется во вторичных структурах, поэтому они являются зоной преимущественного рассеивания энергии.

При трении внешние воздействия не позволяют трибосистеме достичь состояния равновесия, поэтому с помощью уравнений равновесий термодинамики затруднительно описать процессы, протекающие при трении. Управляющие параметры характеризуются тем, что при превышении ими некоторого критического значения в системе происходят процессы самоорганизации. В трибосистеме таким управляющим параметром является скорость скольжения, которая приводит к неравновесной ситуации за счет подвода энергии. Если при трении вторичные структуры не образуются, то энергия распределяется по телу согласно монотонно убывающей функции в зависимости от расстояния до зоны трения.

В процессе трения к телу может подводиться такое количество энергии, которое не успевает диссипироваться по всему трущемуся телу: тепло- и электропроводность, диффузия и др. Это может привести либо к катастрофическому износу при схватывании, либо к появлению и образованию вторичных структур около поверхности трения, с образованием которых в трущемся теле происходит перераспределение энергии. Следовательно, процесс образования вторичных структур, приводящий обычно к снижению коэффициента трения и, значит, к интенсивности изнашивания, соответствует процессам самоорганизации и образования диссипативных структур. Вторичные структуры являются устойчивыми защитными образованиями на трущихся поверхностях, состав которых определяется составом трущихся материалов.

Таким образом, защитные функции трибосистемы определяют ее способность к адаптации к внешним взаимодействиям. Сущность явления структурной приспособляемости заключается в том, что при ее реализации все взаимодействия трущихся тел и среды локализуются в тонких слоях вторичных структур трения, образующихся на исходных материалах вследствие их структурной перестройки и взаимодействия со средой [57].

Вторым явлением, характерным для любых процессов трения, можно считать

явление поверхностного разрушения. При трении материал не разрушается, а трансформируется в некие структуры, осуществляющие защитные функции. Л.И. Бершадский [47] показал, что минимальная интенсивность изнашивания соответствует области минимального производства энтропии трибосистемы. Необходимо отметить, что трибохимические реакции отличаются от термоактивируемых способом подвода энергии к реагентам. Механоактивация в условиях функционального взаимодействия происходит за счет широкого спектра физических и физико-химических явлений, порождаемых трением и объединенных понятием «трибоплазма» [58] – особо высоковозбужденного состояния вещества, время существования которого в зонах физического контакта твердых тел составляет  $\approx 10^{-7}$  с. В ходе трибохимических реакций при граничном трении могут преодолеваются значительно более высокие, чем у термоактивируемых реакций, энергетические уровни. Длительность переходных состояний у термоактивируемых реакций составляет  $10^{-11} - 10^{-13}$  с, а длительность трибоплазмы  $10^{-7}$  с в зонах фрикционного контакта. Поскольку процесс трения сопровождается непрерывным образованием и разрывом адгезионных связей, то взаимодействие твердых тел с адсорбированными на их поверхностях молекулами смазочного материала в условиях граничного трения приводит к инверсной обратимости по сравнению с термоактивированными реакциями и обуславливает их хаотическое распределение по поверхности фрикционного контакта.

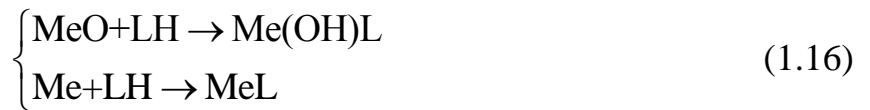
Свойства трибосистемы, работающей в условиях граничного трения, определяются в первую очередь теми продуктами, которые идентифицируются на поверхности трущихся тел после трения различными физическими методами, а непрерывно генерируемым и постоянно существующим в трибосистеме в возбужденном состоянии является вещество реализующееся только в условиях фрикционного взаимодействия. Таким образом, процесс граничного трения сопровождается непрерывной механической «подкачкой» возбужденных состояний в трибосистеме.

Так как количество накапливающейся в системе энергии конечно, то необходим стационарный или периодический сброс избыточной энергии с верхних

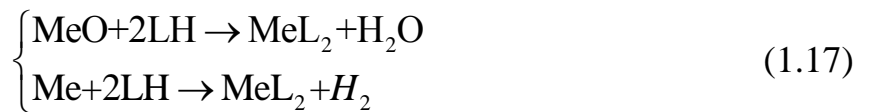
уровней на нижележащие, а поскольку процесс трения необратим и система не может вернуться в исходное состояние, то существуют промежуточные энергетические уровни. Поэтому в простейшем случае, при неизменных внешних условиях функционирования, трибосистема – это, как минимум, система трехуровневого типа, что напоминает принцип работы лазера.

В трибосистемах с граничным трением особую роль играет трибокоординация – образование координационных соединений на поверхности трущихся тел и в объеме смазочного материала, протекающие по следующим общим схемам:

Реакции на поверхности трения

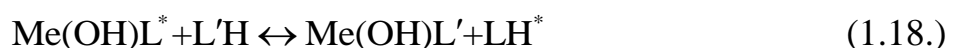


Реакции в смазочном материале



Здесь MeO и Me – оксидные или металлические поверхностные слои трущихся тел или частицы износа; LH – свободный лиганд, специально введенный в состав смазочного материала или образующийся в нем в процессе трения за счет трибодеструкции и (или) трибоокисления основы смазочного материала; Me(OH)L, MeL – поверхностные соединения лиганда с оксидом металла или металлом; MeL<sub>2</sub> – координационные соединения металлов трущейся пары в объеме смазочного материала.

Поскольку эволюция трибосистемы сопровождается переходом из одного стационарного состояния в другое, то с учетом трибокоординации, первоначальный сброс избыточной энергии трибосистемы на ее промежуточные энергетические уровни с участием лигандов LH протекает согласно реакции обмена лигандов объема смазочного материала с лигандами поверхностных комплексов по следующей схеме:



В этой реакции механически возбужденный поверхностный комплекс  $Me(OH)L^*$  обменивается лигандом  $L'H$  из смазочного материала, а уходящий в объем смазочного материала возбужденный лиганд  $LH^*$  уносит с собой избыточную энергию, диссипирует ее по тепловому или излучательному каналам в поверхность или объем смазочного материала, т. е. лиганд является своеобразным молекулярным энергетическим контейнером.

Помимо химической дезактивации должны реализовываться другие механизмы диссипации избыточной энергии, например, сброс за счет накопления структурных дефектов в контактирующих твердых телах, вплоть до появления частиц износа.

При экспериментальных исследованиях стали 45 изменение электрического сопротивления фрикционного контакта однозначно коррелирует и изменением силы трения. Структура и свойства граничного слоя в процессе трения не остаются неизменными: в местах фактического контакта они другие по сравнению с остальной поверхностью. В момент перехода от одного стационарного состояния в другое толщина граничной пленки и ее энергонапряженность меняется скачкообразно. Каждое стационарное состояние в процессе самоорганизации реализуется в строго определенных условиях трения и не наблюдается при выходе за границы этих условий.

### **1.5 Современные методы контроля эксплуатационных свойств трансмиссионных масел**

Основной задачей методов контроля эксплуатационных свойств трансмиссионных масел является определение предельного состояния в процессе эксплуатации техники. Для решения этой задачи необходимо разработать мероприятия по созданию на предприятиях специальных групп диагностики смазочных масел, обеспечению их средствами контроля и обучению персонала работе на них. Основной задачей групп диагностики является текущее планирование отбора проб масел, проведение анализа товарных и работающих масел и определение



сроков замены. Основное требование к средствам контроля заключается в возможности анализа малых объемов проб масел.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствует контроль товарных масел на предприятиях, поэтому эксплуатационники пользуются данными классификации масел, предусматривающей их разделение на классы вязкости, определяющие климатические условия применения, и группы по уровню эксплуатационных свойств, указывающие применение масел по степени нагруженности агрегатов трансмиссий. Такая информация для проектировщиков трансмиссий не всегда объективно отражает качество трансмиссионных масел, так как не содержит данных по температурной области работоспособности, ресурсу, скорости окисления, возможности формировать на поверхностях трения защитных граничных слоев, увеличивающих нагрузку схватывания. Поэтому для выбора трансмиссионных масел их испытывают на машинах трения, стендах или на агрегатах трансмиссий.

При эксплуатации трансмиссий масла окисляются вследствие интенсивного перемешивания. Окислительные процессы более активно протекают на поверхностях трения из-за высоких температур, кроме того, давление в контакте подвергает их температурной деструкции. Образующиеся в этих условиях низкомолекулярные кислоты способны улучшать противоизносные свойства за счет образования хемосорбционных слоев на поверхностях трения, представляющих собой химические соединения металлов с продуктами окисления и легирующими присадками [59–63].

Качество работающих трансмиссионных масел определяется концентрацией противоизносных и противозадирных присадок, эксплуатационных примесей и степенью их окисления, поэтому количество, состав и химическая структура примесей является основанием для разработки методов, направленных на оценку отработанного ресурса. Данные методы можно подразделить на количественные и качественные.

Количественные методы определяют массу твердых загрязнений в масле и регламентируются стандартами (ГОСТ 6370–83 и ГОСТ 12275–66). При большой

концентрации твердых частиц применяются объемные методы оценки (стандарт США ASTM D 2272, нормаль H8016 – 60) с применением центрифугирования, однако точность их невысока.

Гранулометрический состав загрязнения масел определяется седиментационными и микроскопическими методами [64]. Широкое применение находят оптические методы седиментационного анализа, основанные на фотоколориметрическом способе измерения количества оседающих частиц: они используются при контроле технологических процессов производства масел, а также при определении размеров частиц износа, присутствующих в масле [65, 66]. Электрооптический метод позволяет определить дисперсный состав частиц износа [67, 68] при создании статического электрического поля, а затем при его снятии.

Микроскопические и ультразвуковые методы определения гранулометрического состава загрязнений масел основаны на подсчете количества частиц износа и измерений скорости распространения ультразвука.

Стандартные методы контроля качества смазочного материала включают определение кислотного числа (ГОСТ 11362–96, ИСО 6619–88), щелочного числа (ГОСТ 113 62–96, ИСО 6619–88), кинематической вязкости (ГОСТ 33– 2000, ИСО 3104–94) и температуры вспышки (ГОСТ 4333–87). Для более глубокого анализа рабочих свойств масел используется широкий спектр лабораторных методов: от электрохимического анализа продуктов гидролиза до масс спектроскопии структуры углеводородов [69].

Количественный анализ позволяет определить химический состав масла, содержание нерастворимых компонентов и концентрацию присадок. Однако лабораторные методы, хотя и обладают высокой информативностью, чувствительностью и точностью, требуют значительных затрат времени, поэтому не оперативны. Поэтому для оптимизации контроля состояния масел, своевременной их замены и обеспечения надежной работы трансмиссий необходимо использовать методы непрерывного или периодического контроля, характеризующиеся низкой стоимостью и достаточной достоверностью анализа.

Авторами [69] рекомендуются следующие показатели качества масел для

оперативного контроля: кинематическая вязкость, диэлектрическая проницаемость, проводимость, коррозионная активность, кислотное и щелочное числа, спектральное поглощение, оптическая плотность и флуоресценция. Предлагаемые показатели позволяют определить степень окисления и загрязнения масла, срабатываемость присадок и наличие воды в масле.

Основное влияние на снижение ресурса смазочных масел, в том числе трансмиссионных, оказывает вода, обнаружение которой является одним из сигналов потенциально возможного катастрофического износа оборудования. Она попадает в масляную систему вследствие конденсации влаги из воздуха, проникающего через уплотнения. В зоне трения вода вытесняет масло и нарушает режим смазки, вступает в химические реакции с рядом присадок и стимулирует химическую коррозию поверхностей.

Вода может присутствовать в масле в трех состояниях [70–72]:

- растворенном – молекулы воды связаны посредством водородных связей с углеводородными молекулами масла, присадок и продуктами окисления;
- эмульсионном – пересыщенный раствор, в котором вода не полностью отделена от масла, при этом масло становится мутным;
- свободном – перенасыщенный раствор, в котором вода содержится в каплях и отделяется от масла.

Растворимость воды возрастает при увеличении отработанного ресурса [73]. Чистые минеральные масла насыщаются водой при ее концентрации 0,0001 масс %, трансформаторные – при 0,0001 – 0,0003 масс %, гидравлические жидкости – при 0,01 – 0,10 масс %, промышленные при содержании воды 0,06 – 0,50 масс %, а автомобильные масла – при концентрации воды 1 – 5 масс % [73]. Растворимость воды в масле экспоненциально увеличивается с ростом температуры [72].

Лабораторным методом определения содержания концентрации воды является инфракрасная Фурье-спектроскопия [74], основанная на поглощении молекулами воды (гидроксильная группа) определенного спектра длин волн. Фотоакустическая спектроскопия [75] позволяет обнаруживать низкие концентрации

воды в трансмиссионных маслах (0,0045 масс %), гидравлических (0,006 масс %) и синтетических моторных маслах (0,0515 масс %). Метод К. Фишера (метод титриметрии) [76] основан на реакции специального реагента с водой в присутствии метилового спирта, который оценивает концентрацию воды выше 0,03 масс %.

Более простым в реализации является стандартный метод определения содержания растворенной воды с использованием реакций взаимодействия пробы масла с гидридом кальция [77]. Весовое количество продукта реакции, например образующихся кислоты и газа, пропорционально весовому содержанию воды в пробе [78].

Работоспособность трансмиссионных масел оценивают по предельным значениям групп единичных показателей качества, в число которых входит вязкость. Вязкость зависит от степени загрязнения масла нерастворимыми продуктами и от его диспергирующе-стабилизирующих свойств.

Для оценки концентрации противоизносных и противозадирных присадок применяют водородный показатель РН, являющийся индикатором появления кислот, наличие которых не допускается из-за активации коррозионного изнашивания.

Состояние узлов трения можно диагностировать на основе анализа частиц износа и свойств смазочной среды. Параметры частиц износа отражают природу и степень износа трущихся поверхностей, а размер и концентрация частиц износа является надежным индикатором состояния агрегата или машины в целом. Концентрация частиц износа в пробе масла и распределение их по размерам характеризует скорость изнашивания и степень износа [79, 80].

Для выявления вида изнашивания по параметрам частиц принята их классификация по международному «Атласу частиц износа» [81]. Здесь параметры частиц связаны с их происхождением, на основе которого разработаны методы контроля качества смазочных масел. Так, при адгезионном изнашивании образуются чешуйчатые частицы размером до 15 мкм и толщиной 0,25 – 1,0 мкм. При усталостном изнашивании, характерном для зубчатых передач и подшипников качения, частицы износа приобретают сферическую форму размером бо-

лее 3 мкм. Механизм образования таких частиц многие авторы связывают с попаданием в зону контакта крупных частиц износа, которые выкрашиваются при развитии усталостных микротрещин. Возникающие при этом высокие давления вызывают локальную вспышку температур, расплавляющих частицы и формируют их в виде сферы [82–84].

Методы диагностики состояния механизмов, основанные на анализе частиц износа, включают два класса: методы внешнего анализа (переносные устройства) и методы, предусматривающие использование диагностических средств, встроенных в масляную систему (бортовые). Характеристики этих методов и их возможности представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Лабораторные методы диагностики смазанных трибосопряжений [85]

Метод анализа	Характеристика					Непрерывность контроля	Использование экспресс-приборов
	Состав частиц	Концентрация частиц	Фракционный состав	Морфология	Общая загрязненность масла		
Эмиссионная спектрометрия	+	+	–	–	–	–	–
Атомно-абсорбционная спектрометрия	+	+	–	–	–	–	–
Атомно-флуоресцентная спектрометрия	–	+	–	–	+	–	+
Микроскопия	–	+	+	+	–	–	–
Феррография	+	+	+	–	–	+	+
Метод ядерного магнитного резонанса	–	+	–	–	–	–	–
Нейтронно-активационный анализ	–	+	–	–	–	–	–
Седиментация	–	+	+	–	–	–	–
Полярография	+	+	–	–	–	–	–
Хроматография	–	+	+	–	–	–	–

Физические и физико-химические методы контроля частиц износа требуют дорогостоящего оборудования и высококвалифицированных специалистов, поэтому они не нашли широкого применения на эксплуатационных предприятиях, которые рассматривают наработку механизма как основной показатель ресурса масел различного назначения, установленный заводом-изготовителем техники. В этой связи очевидной является необходимость разработки для предприятий простых и доступных по стоимости приборов и методов контроля как товарных, так и работающих трансмиссионных масел и масел другого назначения.

В Сибирском федеральном университете на кафедре «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы» разработаны методы и средства контроля смазочных материалов различного назначения, включающие:

- фотометрическое устройство [86], предназначенное для прямого фотометрирования смазочных масел (товарных и работающих);
- малообъемный вискозиметр, предназначенный для измерения кинематической вязкости в температурном диапазоне от 40 до 140 °С;
- устройство для термостатирования масел в диапазоне температур от 80 до 200 °С с перемешиванием, предназначенное для исследования процессов окисления товарных масел;
- устройство для термостатирования масел в диапазоне температур от 80 до 300 °С без перемешивания, предназначенное для исследования процессов температурной деструкции масел;
- магнитный сепаратор, предназначенный для определения концентрации в масле ферромагнитных частиц;
- трехшариковая машина трения со схемой «шар – цилиндр» [87], предназначенная для определения противоизносных свойств смазочных масел, продолжительности пластических, упругопластических и упругих деформаций, электросопротивления фрикционного контакта;
- прибор для определения температуры застывания нефтепродуктов.

Качество товарных и работающих масел определяется по коэффициенту пог-

лощения светового потока; концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения (окисления); кинематической вязкости; испаряемости; концентрациям в масле воды и ферромагнитных примесей; противоизносным свойствам и сопротивлению окислению.

### **1.6 Анализ современных методов контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел**

Наиболее весомым фактором, определяющим ресурс смазочного материала, а значит, и надежность трибосистемы, является температура. Она определяет интенсивность химических реакций, термоокислительную стабильность, температурную стойкость, ресурс присадок и базовой основы и вызывает изменение вязкости, кислотного и щелочного числа, накопление продуктов старения. Поэтому термоокислительной стабильности как показателю эксплуатационных свойств уделяется особое внимание, однако окислительные процессы представляют собой сложный механизм, который изучен недостаточно.

Термоокислительные процессы в базовом масле и в маслах с присадками являются причиной его старения и представляют собой комплекс сложных многостадийных реакций углеводородов с кислородом воздуха, растворенного в жидкости и находящегося в молекулах взаимодействующих веществ, а также продуктов этого процесса с металлическими поверхностями. Процесс окисления включает следующие стадии [88–91]: инициирование молекул тепловой энергией, которая может приводить к диссоциации и разрыву химических связей с образованием радикалов (части молекул, имеющих на конце неспаренный электрон); взаимодействие активированных фрагментов молекул один с другим и другими молекулами в виде цепной реакции автоокисления с образованием радикалов перекисей  $RO_2$  и гидроперекисей  $ROOH$ .

Определение термоокислительной стабильности некоторых видов масел регламентируется ГОСТ 13300–67 [92], устанавливающим метод определения их коррозионных свойств и окисляемости. Метод позволяет определить испаряе-

мость масла, оцениваемую по разности количества масла до и после испытания и выражаемую в процентах.

Окисляемость масел определяют после двух часов испытания по количеству нерастворимого в петролейном эфире осадка. Для этого 5–10 г отработанного масла растворяют в 10–30-кратном количестве петролейного эфира, раствор выдерживают в темном месте не более 10–12 ч и затем фильтруют через бумажный фильтр «синяя лента». После перенесения всего осадка на фильтр его промывают раствором до тех пор, пока фильтр не станет бесцветным. По окончании промывки фильтр с осадком переносят в бюксу и доводят до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 150 °С.

Содержание образовавшегося осадка ( $X_1$ ) в процентах вычисляют по формуле:

$$X_1 = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100\%, \quad (1.19)$$

где  $m_1$  – масса бюксы с фильтром и осадком, г;  $m_2$  – масса бюксы с чистым фильтром, г;  $m$  – навеска масла, г.

ГОСТ 11063–77 [93] предусматривает окисление масла при 200 °С в приборе ДК–НАМИ в течение времени, указанного в нормативной документации, с последующим определением осадка в окисленном масле и относительного изменения его вязкости. Прирост вязкости масла при 50 и 100 °С в результате окисления вычисляют по формуле:

$$\Delta V = \frac{V - V_0}{V_0} \cdot 100\%, \quad (1.20)$$

где  $V$  – кинематическая вязкость окисленного масла, мм<sup>2</sup>/с;  $V_0$  – кинематическая вязкость товарного масла, мм<sup>2</sup>/с.



Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [94] предусматривает нагревание их в присутствии воздуха, перемешивание и определение параметров оценки процесса окисления по таким показателям, как скорость образования растворимых и нерастворимых продуктов окисления, и температура начала окисления.

Прибор для оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов [95] предназначен для определения термоокислительной стабильности, температурной области работоспособности, скорости окисления и коррозионной активности в зависимости от времени и температуры испытания.

Способ [96] определения термоокислительной стабильности смазочных материалов включает нагревание смазочного масла в присутствии воздуха, перемешивание, фотометрирование и определение параметров оценки процесса окисления по времени образования нерастворимых продуктов и ресурса работоспособности исследуемого масла по предельному значению коэффициента поглощения светового потока.

Способ [97] определения работоспособности смазочных масел предназначен для выявления отработанного ресурса по таким показателям, как вязкость, коэффициент поглощения светового потока до и после центрифугирования окисленного масла.

Способ [98] определения термоокислительной стабильности смазочных материалов предусматривает использование комплексного показателя термоокислительной стабильности, учитывающего изменение вязкости и коэффициента поглощения светового потока при фотометрировании исследуемого масла, а также скорости образования растворимых и нерастворимых продуктов окисления.

В работе [99] термоокислительная стабильность определяется по критической температуре работоспособности, температуре начала окисления и температуре начала испарения. Данный способ более информативный и позволяет идентифицировать масла по группам эксплуатационных свойств.

Комплексная оценка термоокислительной стабильности смазочных масел может осуществляться в приборе [100], включающем узел предварительного

окисления масла в объеме и узел окисления в тонком слое.

ГОСТ 18136 – 72 [101, 102] предусматривает определение термоокислительной стабильности смазочных масел по таким показателям, как кислотное число, число омыления, вязкость, коксуемость, содержание смол и нерастворимого осадка, тангенс угла диэлектрических потерь, удельное электрическое сопротивление, цвет и масса катализатора, внешний вид, цвет и масса конденсата.

Широкое применение находит фотометрический метод контроля термоокислительной стабильности смазочных масел различного назначения, позволяющий исследовать как товарные, так и работающие масла.

Способ [103] предусматривает термостатирование масел в температурном интервале с повышением и понижением температуры, определение коэффициента поглощения светового потока, испаряемости, скорости окисления и ее приращение, а термоокислительную стабильность определяют по количеству циклов колебаний приращения скорости окисления до установленного значения коэффициента поглощения светового потока и предельной температуре работоспособности, при которой приращения скорости окисления и испарения равны нулю.

Способ [104] определения термоокислительной стабильности предусматривает термостатирование масел как минимум при трех температурах ниже критической. При этом относительную вязкость находят как отношение вязкости окисленного масла к вязкости товарного, а термоокислительную стабильность определяют по показателю отношения коэффициента поглощения светового потока к относительной вязкости, устанавливающему однородность состава продуктов окисления и температурную область работоспособности исследуемого масла.

Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [105] заключается в том, что пробу смазочного материала термостатируют в присутствии кислорода воздуха и через равные промежутки времени взвешивают, определяют массу испарившегося масла, коэффициент испарения  $K_G$  из соотношения  $K_G = m / M$ , где  $m$  – масса испарившегося масла при окислении;  $M$  –

масса пробы после окисления;  $E_{\Pi}$  – коэффициент энергии превращения в продукты окисления:

$$E_{\Pi} = K_{\Pi} + K_G, \quad (1.21)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $K_G$  – коэффициент испарения. Затем строят графическую зависимость  $E_{\Pi} = f(K_{\Pi})$ , продлевают линию зависимости до пересечения с осью ординат и по ординате этой точки находят величину энергии начала превращения тепловой энергии в продукты окисления, а термоокислительную стабильность определяют по коэффициенту сопротивления окислению  $K_{co}$  из выражения:

$$K_{co} = (E_{\Pi} - A) / K_{\Pi} \quad (1.22)$$

где  $A$  – коэффициент, характеризующий начало превращения тепловой энергии. Данный способ позволяет по коэффициенту сопротивления окислению сравнивать различные масла, имеющие одну группу эксплуатационных свойств.

Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [106] включает нагревание масла в присутствии воздуха, перемешивание, испытание без катализатора и с катализатором при циклическом изменении температуры испытания в зависимости от температуры начала окисления до предельной температуры, а затем понижают температуру от предельной до температуры начала окисления в течение постоянного времени. Причем после каждой температуры испытания с катализатором и без катализатора пробы взвешивают, определяют массу испарившегося масла и коэффициент испаряемости как отношение пробы после окисления, фотометрированием находят коэффициент поглощения светового потока без катализатора и с катализатором, устанавливают коэффициент термоокислительной стабильности как сумму коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости, затем находят

коэффициент каталитического влияния катализатора  $K_{\text{BK}}$  на окислительные процессы по формуле:

$$K_{\text{BK}} = K_{\text{K}} / K, \quad (1.23)$$

где  $K_{\text{K}}$  и  $K$  – коэффициенты термоокислительной стабильности проб окисленного масла с катализатором и без катализатора соответственно, а термоокислительную стабильность смазочных масел определяют по значениям коэффициента влияния катализатора на процессы окисления. Данный метод позволяет определить влияние конструкционных материалов на процессы окисления и учитывать эти данные при установлении ресурса смазочных масел.

Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [107] предусматривает термостатирование масел в температурном интервале с перемешиванием в присутствии воздуха в течение постоянного времени, затем пробу после окисления фотометрируют, находят коэффициент поглощения светового потока, а термоокислительную стабильность определяют по температуре термостатирования с наименьшим коэффициентом поглощения светового потока.

Важное значение при окислении трансмиссионных масел имеет установление влияния продуктов окисления на их противоизносные свойства.

Известен способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [108], предусматривающий разделение проб окисленного масла на две части: первую фотометрируют, определяют коэффициент поглощения светового потока, а вторую испытывают на трехшариковой машине трения со схемой «шар – цилиндр» не менее 2 ч, измеряют среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах, строят графическую зависимость размера пятна износа от коэффициента поглощения светового потока, по которой определяют влияние продуктов окисления на противоизносные свойства испытуемого смазочного материала.

Способ определения качества смазочных масел [109] позволяет установить влияние сталей на процессы окисления и противоизносные свойства масел, окисленных со сталью. С этой целью предложен коэффициент  $K_{\text{вс}}$  влияния стали на процессы окисления и триботехнические характеристики масел, определяемый по формуле:

$$K_{\text{вс}} = (V_{\text{п}} - V_{\text{пс}})/V_{\text{п}} \cdot 100\%, \quad (1.24)$$

где  $V_{\text{п}}$  и  $V_{\text{пс}}$  – соответственно скорости изменения коэффициента противоизносных свойств масел, испытанных без стали и со сталью.

Коэффициент противоизносных свойств –  $\Pi$  ( $\text{мм}^{-1}$ ) определяется как частное

$$\Pi = K_{\text{п}}/U, \quad (1.25)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $U$  – параметр износа при триботехнических испытаниях окисленного масла.

Способ определения качества смазочных масел [110] позволяет установить влияние продуктов окисления на противоизносные свойства окисленных масел, при этом вводится коэффициент противоизносных свойств, рассчитываемый по формуле (1.26), а по тангенсу угла наклона графической зависимости коэффициента противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока к оси абсцисс определяют качество окисленных масел: чем больше тангенс угла наклона, тем выше противоизносные свойства испытанных масел.

Способ определения работоспособности работающих смазочных масел [111] заключается в том, что отбирают пробу работавшего масла, делят её на три части: первую часть пробы используют для определения вязкости, вторую часть подвергают центрифугированию с последующим фотометрированием и находят коэффициент поглощения светового потока отцентрифугированной пробы масла, третью часть пробы испытывают на термоокислительную стабильность в течение не более двух часов при температуре, соответствующей температуре базовой

основы смазочного масла, затем рассчитывают коэффициент поглощения светового потока и вязкость окисленной пробы, а работоспособность работающего смазочного масла  $\Pi_p$  определяют из выражения

$$\Pi_p = (K_{\text{по}} - K_{\text{пц}})\eta_o / \eta, \quad (1.26)$$

где  $K_{\text{по}}$  – коэффициент поглощения светового потока пробы окисленного масла;  $K_{\text{пц}}$  – коэффициент поглощения светового потока пробы работавшего масла после центрифугирования;  $\eta_o$  и  $\eta$  – соответственно вязкость окисленной и исходной проб работавшего масла.

Применение данного способа позволяет определить качество товарного масла, максимально использовать ресурс исследуемого масла при эксплуатации техники, периодически осуществлять контроль за его состоянием в процессе применения и хранения и рассчитать остаточный ресурс работы масла сравнив с предельным значением коэффициента работоспособности.

Способ определения работоспособности смазочных масел [112] предназначен для обоснования предельного состояния отработанных масел парка машин. Способ предусматривает отбор пробы отработанного масла из механизма, которую делят на две части: первую часть подвергают фотометрированию, рассчитывают коэффициент поглощения светового потока, вторую часть постоянной массы подвергают термостатированию с перемешиванием, фотометрируют, находят коэффициент поглощения светового потока, строят две графические зависимости распределения количества проб от выбранных интервалов значений коэффициента поглощения светового потока и по точке пересечения двух кривых зависимостей рассчитывают предельное значение коэффициента поглощения светового потока, затем по его величине определяют работоспособность смазочного масла: если значение коэффициента поглощения светового потока меньше предельного значения, то испытуемое масло работоспособно, а если больше предельного значения, то неработоспособно.

С помощью данного способа можно установить предельное состояние для любых масел, используемых в различных механизмах. Применение фотометрического метода контроля термоокислительной стабильности апробировано для различных трансмиссионных масел [113–117].

### **Выводы по первой главе**

1. Для разработки комплексной методики контроля качества товарных и работающих трансмиссионных масел из известных эксплуатационных свойств наиболее приемлемым является термоокислительная стабильность, так как при окислении образуются продукты, влияющие на оптические свойства масел, смазывающую способность, вязкость, коррозионную активность, защитные свойства и стойкость к пенообразованию. Кроме того, кинетические зависимости процесса окисления от времени и температуры испытания позволяют сравнивать трансмиссионные масла как одной, так и различных групп по уровню эксплуатационных свойств.

2. Анализ современных методов определения термоокислительной стабильности смазочных масел показал, что методическая база и приборное обеспечение позволяют исследовать термоокислительную стабильность, вязкость, коррозионную активность и другие параметры масла при окислении, однако они в основном применимы в лабораторных условиях и не экспрессивны.

3. Из анализа следует, что наиболее перспективным методом контроля термоокислительной стабильности является фотометрический метод, обладающий низкой трудоемкостью и возможностью применения на эксплуатационных предприятиях.

4. Анализ современных методов контроля качества смазочных материалов показал, что оценка их качества должна быть комплексной, учитывать не только изменение показателей термоокислительной стабильности, но и их триботехнические характеристики, главным образом определяющие долговечность трибосопряжений, а приборное обеспечение должно быть ориентировано на при-

менение в эксплуатационных предприятиях для достижения максимальной эффективности использования и выработки ресурса масел диагностики текущего их состояния.



## **2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЗМА СТАРЕНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ ПРИ ХРАНЕНИИ БРОНЕТЕХНИКИ**

### **2.1 Выбор трансмиссионных масел для исследования**

Выбор трансмиссионных масел основан на рекомендациях заводов-изготовителей бронетехники и включает моторно-трансмиссионное масло МТ-8п. Оценка влияния сроков хранения на состояние трансмиссионных масел проводилась на данном масле. Для сравнения механизма старения трансмиссионных масел при хранении и термостатировании в лабораторных условиях выбраны товарные масла МТ-8п, ТСзп-8, МС-20 и масла различной базовой основы: минеральное BIZOL80W-90GL4; частично-синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90GL4, GL5; синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90GL5.

Для исследования влияния сроков хранения на механизм старения трансмиссионных масел пробы отбирались непосредственно с трансмиссий после полигонных испытаний, обеспечивающих их перемешивание в объеме 1,5 л. При оценке показателей старения масел на средствах измерения пробы тщательно перемешивались.

Характеристика исследуемых масел представлена в главе 3.

### **2.2 Основные требования и краткая характеристика средств контроля состояния работающих и товарных масел**

#### **2.2.1 Основные требования к средствам контроля**

При выборе средств контроля учитывались следующие условия:

- использование малого объема проб масел для исследования;
- возможность определения кинематической вязкости, испаряемости, концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения (окисления), оценки триботехнических характеристик, и концентрации легких фракций и воды;

- возможность испытания товарных масел в диапазоне температур от 120 до 150 °С;
- автоматическое поддержание температуры испытания в пределах  $\pm 1$  °С;
- автоматическое поддержание частоты вращения мешалки при перемешивании масла в процессе испытания;
- контроль за температурой испытания и частотой вращения осуществляемый с помощью терморегуляторов;
- триботехнические характеристики, определяемые на машине трения со схемой «шар – цилиндр» при постоянных параметрах, включая процессы, протекающие на фрикционном контакте.

Для исследования эксплуатационных свойств работающих и товарных трансмиссионных масел использованы следующие средства контроля: фотометрическое устройство; малообъемный вискозиметр; прибор для термостатирования масел с перемешиванием; центрифуга; трехшариковая машина трения со схемой «шар – цилиндр», устройство для переточки цилиндра; опти-ческий микроскоп «Альтами Мет1М» и электронные весы.

### 2.2.2 Фотометрическое устройство

Предназначено для прямого фотометрирования смазочных масел и состоит (рисунок 2.1) из измерительного блока 1 и фотометрической кюветы 2, предназначенной для создания фотометрического слоя толщиной 0,03; 0,15; 2,0 и 8 мм (таблица 2.1).



Рисунок 2.1 – Фотометрическое устройство [86]: 1 – измерительный блок; 2 – фотометрическая кювета

Оптические свойства отработанных и термостатирование товарных масел зависят от концентрации продуктов старения (окисления) и измеряются коэффициентом поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ , определяемого по формуле:

$$K_{\text{п}} = \frac{300 - \Pi}{300}, \quad (2.1)$$

где 300 – фототок, генерируемый фотоэлементом при отсутствии смазочного масла в кювете мкА,  $\Pi$  – фототок, генерируемый фотоэлементом при наличии масла в кювете, мкА.

Параметры устройства представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Техническая характеристика фотометрического устройства

Наименование параметров	Единица измерения	Значение параметра
Диапазон измерения	мкА	0..300
Фотоэлемент	—	Сф2–1А
Погрешность измерения	%	$\pm 2,0$
Время одного измерения с учетом вспомогательного	мин	$3,0 \pm 0,1$
Время непосредственного измерения	с	$5,0 \pm 1$
Толщина фотометрируемого слоя при фотометрировании моторных масел: дизельных двигателей бензиновых двигателей трансмиссионных масел гидравлических и промышленных масел	мм	0,03 0,15 2,0 8,0
Напряжение питания	В	9 (батарея «крона»)
Потребляемый объем масла	мг	от 0,1 до 1,0
Потребляемая мощность	ВА	$0,2 \pm 0,01$
Время нагрева прибора для нормальной работы	мин	$3,0 \pm 0,5$
Габариты: высота ширина длина масса	мм   кг	105 $\pm$ 1 225 $\pm$ 1 40 $\pm$ 1 1,2 $\pm$ 0,1

При фотометрировании применяется стабилизированный монохроматический свет красного спектра (700 нм). Перед настройкой прибора на показания

300 мкА и после измерения оптических свойств масла кювета промывается бензином и протирается насухо мягкой ветошью.

### 2.2.3 Малообъемный вискозиметр

Прибор (рисунок 2.2) разработан с целью использования малых объемов смазочных масел для исключения влияния отбора проб на механизм старения. Прибор содержит измерительный блок и металлический стакан для пробы масла.

Принцип измерения вязкости заключается в измерении времени погружения плоского диска на заданную глубину при заданной температуре, поэтому чем больше вязкость масла, тем больше время погружения диска. Индикация времени погружения диска регистрируется цифровым индикатором в импульсах, которые переводятся в сантистоксы по формуле:

$$\mu = \frac{\Pi - K}{tga}, \quad (2.2)$$

где  $\Pi$  – показания счетчика в импульсах;  $K$  и  $tga$  коэффициенты, зависящие от



Рисунок 2.2 – Прибор для определения вязкости

геометрических размеров диска, стакана, глубины погружения диска, определяемые экспериментально при тарировке вискозиметра по графику рисунка 2.3

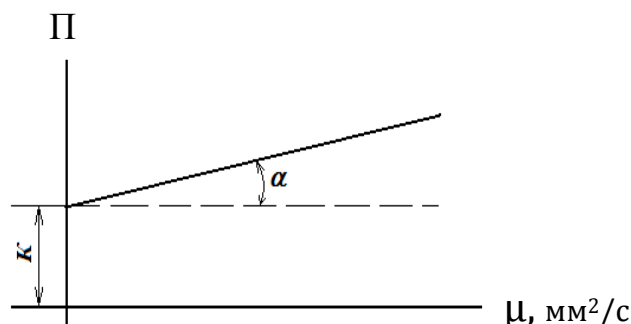


Рисунок 2.3 – Тарировочный график малообъемного вискозиметра

Таблица 2.2 – Технические характеристики вискозиметра

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Напряжение питания	В	$\sim 12 \pm 1,0$
Максимальная мощность нагревателя	ВА	$42 \pm 2$
Погрешность измерения	%	$\pm 2$
Объем испытуемого масла	мл	8,5
Температура измерения вязкости масла:	$^{\circ}\text{C}$	
Моторного и трансмиссионного		100
Гидравлического и промышленного		40
Время одного измерения	мин.	$5 \pm 0,2$
Габариты прибора	мм	100x160x260
Масса прибора	кг	$3,0 \pm 0,2$

#### 2.2.4 Прибор для термостатирования смазочных масел

Относится к испытательной технике и предназначен для оценки склонности масел к окислению. Прибор (рисунок 2.4) позволяет испытывать как товарные, так и работающие масла и состоит из измерительного – 1 и механического – 2 блоков. Техническая характеристика прибора представлена в таблице 2.3.

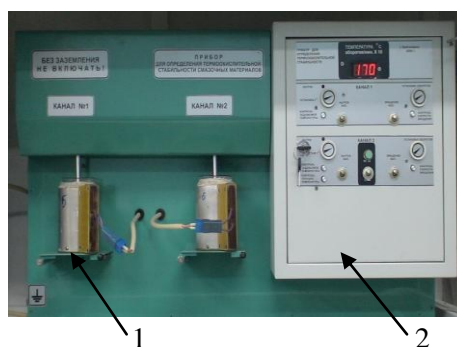


Рисунок 2.4 – Прибор для термостатирования смазочных материалов: 1 – механический блок; 2 – блок измерения и управления

Блок 1 обеспечивает задание температуры испытания, частоты вращения мешалки для перемешивания масла и контроля этих параметров во время испытаний. Механический блок включает два цилиндрических корпуса, которые установлены на поворотных платформах, обеспечивающих их съем. В корпусах установлены термоизолированные термостойкие стеклянные стаканы. Перемешивание масел во время испытания производится с помощью стеклянных мешалок, приводящихся во вращение с помощью микроэлектродвигателя. Температура масла в стакане измеряется с помощью термопары «хромель – копель».

Испытания масел проводятся в температурном диапазоне до 200 °С с перемешиванием. Температура задается дискретно и при термостатировании поддерживается автоматически с точностью  $\pm 2$  °С. Частота вращения мешалки также устанавливается дискретно с постоянной частотой 300 об/мин.

Таблица 2.3 – Технические характеристики прибора для термостатирования смазочных материалов

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Напряжение питания	В	$\sim 220 \pm 10\%$
Потребляемая мощность	ВА	$400 \pm 10\%$
Частота вращения мешалки (регулируемая)	об/мин	$300 \pm 2\%$
Температурный диапазон	°С	От 50 до 200
Масса испытуемого масла	г	$100 \pm 0,1$
Датчик температуры		Хромель-копель
Габариты: высота ширина длина	мм	$450 \pm 5,0$ $170 \pm 5,0$ $740 \pm 5,0$
Масса	кг	$8,5 \pm 0,5$

### 2.2.5 Трехшариковая машина трения

Машина трения (рисунок 2.5) относится к испытательной технике и предназначена для определения противоизносных свойств товарных, отработанных и окисленных в лабораторных условиях смазочных масел со схемой трения «шар – цилиндр», причем каждый из трех шаров взаимодействует с цилиндром по индивидуальной дорожке трения, что позволяет исследовать и фотографировать изно-

шенные поверхности. Технические характеристики машины трения приведены в таблице 2.4.

В качестве испытательных образцов использовались шары диаметром 9,5 мм от шарикоподшипника № 204 (ГОСТ 8338) и обойма диаметром 80 мм от роликового подшипника № 42416 (ГОСТ 8328), изготовленные из стали ШХ15.

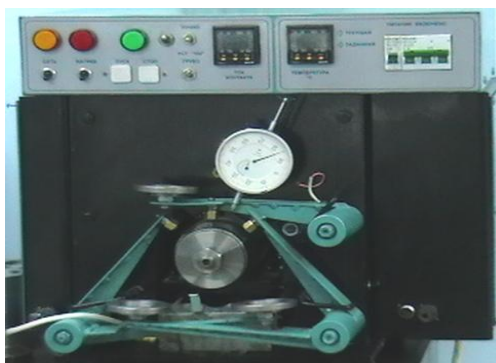


Рисунок 2.5 – Трехшариковая машина трения [87]

Для исследования процессов, протекающих на фрикционном контакте, через один из шаров пропускался постоянный ток величиной 100 мкА от внешнего стабилизированного источника питания 3 В, который через аналоговый преобразователь *RS-485* записывался в виде диаграммы на мониторе компьютера. Параметры трения выбраны с максимальной чувствительностью на изменения свойств масел и составляли: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме 80 °С; время испытания – 2 ч.

Таблица 2.4 – Технические характеристики трехшариковой машины трения

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Напряжение питания	В	~380±10%
Потребляемая мощность	ВА	650±5
Схема трения	—	«Шар – цилиндр»
Диаметр шарика	мм	9,5
Диаметр цилиндра	мм	80,0
Скорость скольжения	м/с	0,68; 0,34; 0,17; 1, 0,8
Нагрузка на шарики	Н	0–40
Ток фрикционного контакта	мкА	0–100
Объем пробы масла	мл	20,0±1,0
Температура масла	°С	0–120
Габариты прибора	мм	500x460x400±0,5
Масса прибора	кг	72,0±1,0

Противоизносные свойства смазочных масел оценивались по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трех шарах и электропроводности фрикционного контакта. Для исключения влияния механических свойств материалов пар трения на противоизносные свойства масел шары использовались многократно: они проворачивались в оправках для подведения в контакт новой поверхности, а обойма перетачивалась на стенде тремя абразивными лентами различной зернистости, обеспечивая шероховатость поверхности 0,8 мкм.

Диаметры пятен износа измерялись на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ1М». В качестве вспомогательных средств испытания использовались центрифуга и электронные весы. Центрифуга применялась для определения моуще-диспергирующих свойств отработанных масел по свойствам осадка, а совместно с фотометрическим устройством устанавливалась концентрация растворимых и нерастворимых продуктов старения в трансмиссионных маслах, находящихся на хранении. Частота вращения ротора центрифуги составляла 8 000 об/мин.

Электронные весы с пределом измерения до 1,2 кг и точностью 0,1 г применялись для измерения массы испарившегося масла при термостатировании.

### **2.3 Методика контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел**

Методика предусматривала применение следующих средств испытания и измерения: прибор для термостатирования трансмиссионных масел; фотометрическое устройство; малообъемный вискозиметр и электронные весы. Термоокислительная стабильность при термостатировании оценивалась по изменению оптических свойств (коэффициенту поглощению светового потока  $K_{\text{п}}$ ), кинематической вязкости  $\mu$  и испаряемости  $G$ . Для исследования проба трансмиссионного масла массой  $100 \pm 0,1$  г заливалась в стеклянный стакан прибора для термостатирования (см. рисунок 2.4) и термостатировалась при температуре  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения  $300 \pm 0,2$  об/мин. в



течение 8 ч. После этого стакан с окисленной пробой масла взвешивался для определения массы испарившегося масла по формуле:

$$\Delta G = G_1 - G_2, \quad (2.3)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – массы пробы масла со стаканом до и после термостатирования, г.

Часть пробы окисленного масла отбиралась для прямого фотометрирования при толщине фотометрического слоя 2 мм и определения коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  по формуле (2.1), а часть пробы (8,5 г) отбиралась для определения кинематической вязкости при 100 °С по формуле (2.2). После пятикратного измерения вязкости и фотометрирования пробы масел из стакана вискозиметра и кюветы фотометра сливались в стеклянный стакан прибора для их термостатирования. Затем стакан с пробами повторно взвешивался и испытания продолжались следующие 8 ч. Продолжительность испытаний ограничивалась достижением коэффициента поглощения светового потока значений, равных 0,75– 0,8 ед., что обеспечивалось максимальной чувствительностью фотометра при толщине фотометрического слоя 2 мм.

В связи с тем, что исследованию подлежали масла различных классов вязкости, то для удобства их сравнения и оценки изменения вязкости при их окислении принят коэффициент относительной вязкости  $K_{\mu}$ , определяемый выражением

$$K_{\mu} = \mu_0 / \mu_{\text{тов}}, \quad (2.4)$$

где  $\mu_0$  и  $\mu_{\text{тов}}$  – соответственно кинематические вязкости окисленного и товарного масел.

Введение коэффициента относительной вязкости позволяет независимо от класса вязкости принимать ее за единицу.

По полученным экспериментальным данным строились графические зависимости коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$ , коэффициента относительной вязкости и испаряемости от времени испытания, по которым сравнива-

лись трансмиссионные масла различных базовых основ и классов вязкости и обосновывался критерий термоокислительной стабильности.

Данная методика апробирована на различных смазочных материалах и опубликована в работах [118–122, 113, 114, 123] (рисунок 2.6).

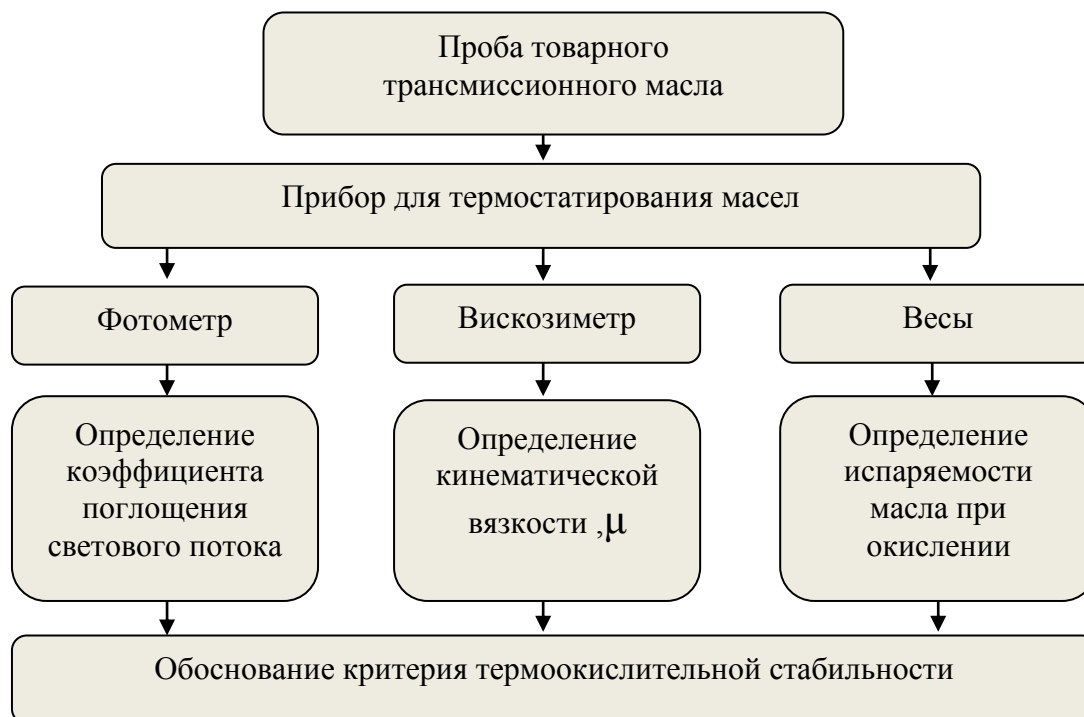


Рисунок 2.6 – Блок-схема методики контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел

#### 2.4 Методика контроля трансмиссионных масел, находящихся на длительном хранении

Исследования проводились на минеральном трансмиссионном масле МТ-8п, находящемся в бронетехнике длительного хранения. Для определения состояния масел при длительном хранении применялись следующие средства испытания и измерения: фотометрическое устройство для определения оптических свойств масел по коэффициенту поглощения светового потока, характеризующего концентрацию общих продуктов старения; центрифуга, обеспечивающая совместно с фотометром определение концентраций в масле растворимых и нерастворимых

продуктов старения ( $K_{пр}$  и  $K_{пн}$ ); вискозиметр – для измерения кинематической вязкости масел; прибора для термостатирования масел, используемый для установления концентраций легких фракций, воды и сопротивляемости окислению.

Пробы масел отбирались из трансмиссий после полигонных испытаний бронетехники в объеме 1,5 л. (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Блок-схема методики контроля состояния работающих трансмиссионных масел

Сущность методики контроля масел, находящихся на длительном хранении в технике, заключается в следующем (рисунок 2.7). Отобранные пробы масел из трансмиссий тщательно перемешиваются, отбирается часть пробы для прямого фотометрирования и определения концентрации общих продуктов старения при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм. Часть пробы (8 г) центрифугируется в течение 1 ч, после чего фотометрируется для определения концентрации растворимых продуктов старения, причем проба масла с кюветы центрифуги отбирается

с верхнего слоя масла. По разности коэффициентов поглощения светового потока до и после центрифугирования определяется концентрация нерастворимых продуктов старения  $K_{\text{пн}}$  по формуле:

$$K_{\text{пн}} = K_{\text{п}} - K_{\text{пр}}, \quad (2.5)$$

где  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{пр}}$  – соответственно коэффициенты поглощения светового потока, характеризующие концентрации общих и растворимых продуктов старения.

Часть пробы работавшего масла используется для определения кинематической вязкости. Этот показатель не должен превышать вязкость товарного масла на 30–35 % или быть ниже 20 % и применяется для установления отработанного ресурса.

Определяется наличие в отработанных маслах легких фракций, образующихся в результате механической и температурной деструкции, и воды они термостатируются в приборе при температуре 120 °С в течение 20 минут, после чего проба взвешивается на весах. Разность масс пробы до и после термостатирования показывает массу легких фракций и воды в масле.

Прибор для термостатирования масел используется для определения сопротивляемости работающих трансмиссионных масел окислению. Технология определения приведена в подразделе 2.3 с той лишь разницей, что время термостатирования составляет 3 ч. По данным термостатирования определяется изменение состояния масел по парку машин.

По полученным экспериментальным данным строятся кривые распределения концентраций общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения, кинематической вязкости, концентрации легких фракций и воды, изменения потенциального ресурса при термостатировании масел от количества проб и формулируется заключение о состоянии трансмиссионных масел в парке машин, выявляются машины, требующие замены масел и назначается время очередного контроля для масел, ресурс которых на исходе. Данная методика апробирована в работах [112, 117, 123, 131, 132].

## **2.5 Методика контроля противоизносных свойств трансмиссионных масел**

Оценка триботехнических характеристик товарных и работающих масел производилась на трехшариковой машине трения (см. подраздел 2.2.5) при постоянных параметрах трения: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; время испытания – 2 ч; температура масла в объеме – 80 °С. Противоизносные свойства товарных окисленных масел и работающих оценивались среднеарифметическим значением диаметров пятен износа на трех шарах из двух опытов с помощью оптического микроскопа «Альтами МЕТ1М».

Противоизносные свойства товарных масел зависят от химического состава, полярности базовой основы, композиции присадок и их концентрации, вязкостно-температурной характеристики, а также свойств граничных слоев, механических свойств материалов деталей и способности масла химически модифицировать поверхности сопряженных деталей.

Противоизносные свойства окисленных товарных и работающих масел зависят дополнительно от концентрации продуктов окисления или старения, концентрации продуктов износа и загрязнений, попадающих извне.

Множество факторов, влияющих на износ деталей трансмиссий, различия в режимах трения и видах изнашивания узлов, температурных условий затрудняет оптимизацию определения предельных показателей триботехнических характеристик с учетом физико-химических свойств смазочного материала. Поэтому для повышения противоизносных и противозадирных свойств трансмиссионных масел их легируют присадками, содержащими серу, фосфор, галогены, бор. Триботехнические характеристики для малого количества масел нормированы стандартами и техническими условиями, определяемые на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) ГОСТ 9490–75 и проводятся для контроля в процессе производства.

Важной характеристикой масел по снижению коррозионного износа является их нейтрализующая способность, показателем которой в нормативной документации служит щелочное (кислотное) число.

В настоящей работе для оценки влияния продуктов окисления на противоизносные свойства товарных трансмиссионных масел применена трехшариковая машина трения со схемой «шар – цилиндр», что позволило определить влияние базовой основы на их триботехнические характеристики и сравнить с результатами испытания работающих масел, находящихся на хранении в технике.

Методика контроля триботехнических характеристик заключалась в следующем (рисунок 2.8). После тщательного перемешивания проба масла (после окисления, отработанная) объемом 20 мл заливалась в емкость машины трения, которая устанавливалась в термостат. С помощью программы терморегулятора ТРМ-101 задавалась температура 80 °С. Запускалось вращение цилиндрического образца, который смачивался испытуемым маслом, залитым в емкость, а три шара до набора температуры не соприкасались с цилиндром. При наборе заданной температуры (80 °С) шары опускались плавно на цилиндр с нагрузкой—13 Н и регистрировалось время начала испытания. Температура масла измерялась термопарой «хромель – копель» и поддерживалась автоматически с точностью  $\pm 2$  °С.

После двухчасовых испытаний шары с оправкой промывались в бензине и протирались ветошью, смоченной в спирте, затем на оптическом микроскопе «Альтами MET1M» производились измерения диаметров пятен износа по максимальному и минимальному диаметру, определялся средний диаметр пятна износа и среднеарифметическое значение на трех шарах.

Испытания проводились дважды на одном и том же масле. По полученным результатам износа строились графические зависимости от коэффициента поглощения светового потока, по которым сравнивались товарные масла различной базовой основы, и работающие, а также производился поиск критерия противоизносных свойств в зависимости от концентрации продуктов окисления или старения.

После каждых испытаний ванночка (емкость) для испытуемого масла промывалась бензином и вытиралась насухо, а шары проворачивались на небольшой угол в оправках для подведения новой поверхности и контролировались с помощью оптического микроскопа, а цилиндр перетачивался на стенде тремя абра-

зивными лентами разной зернистости до шероховатости 0,8 мм, что повышало точность экспериментальных результатов. После переточки цилиндр промывался и устанавливался на машину трения.



Рисунок 2.8 – Блок-схема контроля противоизносных свойств трансмиссионных масел

Для контроля интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте через пару трения, пропускался постоянный ток (100 мкА) от внешнего стабилизированного источника напряжения 3 В, что позволило по диаграммам записи изменения тока на мониторе компьютера при изнашивании определить продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций и оценить влияние продуктов окисления и старения на интенсивность этих процессов и величину износа, а также обосновать критерий противоизносных свойств. Данная методика изложена в работах [35, 124–126, 133].

## 2.6 Методика обработки экспериментальных данных

Сопоставимость экспериментальных данных и достоверность показаний приборов по определению коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости, испаряемости и противоизносных свойств проводилась по результатам пяти опытов на одном масле МТ-8п при температуре 150 °С. При этом использовалась литература [127–129]. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием лицензионной программы Advanced Grapher [130].

Для оценки величины случайной ошибки результата измерения рассчитана среднеквадратическая ошибка по формуле:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.6)$$

где  $n$  – число измерений;  $\bar{x}$  – среднееарифметическое значение показателя;  $x_i$  – результаты измерений.

Значение измеряемой величины находили как среднееарифметическое из полученных результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.7)$$

Погрешность  $i$ -го измерения  $\Delta x_i$  каждого прибора определяли как разность между среднееарифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при измерении по формуле:

$$\Delta x_i = [\bar{x} - x_i]. \quad (2.8)$$

Средняя относительная погрешность (%) рассчитывалась по формуле:



$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} \cdot 100. \quad (2.9)$$

Статистические данные обработки результатов испытаний приведены в таблицах 2.5– 2.7.

Таблица 2.5 – Данные статистической обработки и регрессионного анализа результатов испытания товарного масла МТ-8п при температуре 150 °С

Показатель	Коэффициент поглощения светового потока, $K_{\Pi}$								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Время испытания, ч	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Опыт № 1	0,103	0,167	0,223	0,28	0,343	0,43	0,503	0,61	0,693
Опыт № 2	0,099	0,162	0,221	0,278	0,34	0,445	0,5	0,59	0,69
Опыт № 3	0,098	0,165	0,22	0,28	0,34	0,44	0,51	0,6	0,68
Опыт № 4	0,101	0,17	0,224	0,285	0,339	0,43	0,49	0,6	0,69
Опыт № 5	0,1	0,169	0,222	0,282	0,34	0,44	0,499	0,61	0,685
Среднее значение $K_{\Pi}$ , $\bar{x}$	0,1002	0,1666	0,222	0,2804	0,3404	0,437	0,5004	0,602	0,6876
Средняя квадратичная погрешность $S_n$	0,0019	0,0032	0,0016	0,0036	0,0015	0,0067	0,0072	0,0084	0,0051
Средняя относительная погрешность, %	1,44	1,49	0,54	0,88	0,31	1,28	0,98	1,06	0,59
Доверительный интервал $\Delta t \bar{x}$	$\pm 0,004$	$\pm 0,006$	$\pm 0,003$	$\pm 0,007$	$\pm 0,003$	$\pm 0,013$	$\pm 0,014$	$\pm 0,017$	$\pm 0,01$
Уравнение регрессии	$K_{\Pi} = 9,89 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,01 \cdot t + 0,03$								
Коэффициент корреляции	0,9997								
Среднее квадратическое отклонение	0,26								
Средняя погрешность аппроксимации	0,39								
Показатель	Коэффициент относительной вязкости, $K_{\mu}$								
Опыт № 1	0,843	0,814	0,835	0,843	0,907	0,917	0,924	0,962	0,97
Опыт № 2	0,84	0,82	0,83	0,85	0,86	0,92	0,93	1,004	0,99
Опыт № 3	0,837	0,814	0,831	0,852	0,89	0,922	0,935	1,02	1,03
Опыт № 4	0,842	0,822	0,84	0,845	0,898	0,91	0,934	0,99	1,05
Опыт № 5	0,835	0,81	0,838	0,85	0,9	0,91	0,92	1,02	1,02
Среднее значение $K_{\mu}$ , $\bar{x}$	0,8394	0,816	0,8348	0,848	0,891	0,9158	0,9286	0,9992	1,012

Окончание таблицы 2.5

Средняя квадратичная погрешность $S_n$	0,0034	0,0049	0,0043	0,0038	0,0184	0,0056	0,0065	0,0243	0,0319
Средняя относительная погрешность %	0,32	0,49	0,41	0,38	1,44	0,51	0,57	1,86	2,53
Доверительный интервал $\Delta t \bar{X}$	$\pm 0,007$	$\pm 0,01$	$\pm 0,009$	$\pm 0,008$	$\pm 0,037$	$\pm 0,011$	$\pm 0,013$	$\pm 0,049$	$\pm 0,064$
Уравнение регрессии	$K_{\mu} = -(6,236 \cdot 10^{-9}) \cdot t^5 + (1,1432 \cdot 10^{-6}) \cdot t^4 - (7,9307 \cdot 10^{-5}) \cdot t^3 + 0,0025 \cdot t^2 - 0,0316 \cdot t + 0,9465$								
Коэффициент корреляции	0,9675								
Среднее квадратическое отклонение	0,54								
Средняя погрешность аппроксимации	0,66								
Показатель	Испаряемость $G$ , г								
Опыт № 1	0,8	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4
Опыт № 2	0,9	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4
Опыт № 3	0,85	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4
Опыт № 4	0,7	0,7	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
Опыт № 5	0,7	0,6	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Среднее значение $G$ , $\bar{X}$	0,64	0,6	0,44	0,54	0,46	0,48	0,42	0,52	0,42
Средняя квадратичная погрешность, $S_n$	0,114	0,0707	0,0548	0,0548	0,0548	0,0447	0,0447	0,0447	0,0447
Средняя относительная погрешность, %	5,71	6,67	10,91	8,89	10,43	6,67	7,62	6,15	7,62
Доверительный интервал $\Delta t \bar{X}$	$\pm 0,228$	$\pm 0,141$	$\pm 0,11$	$\pm 0,11$	$\pm 0,11$	$\pm 0,089$	$\pm 0,089$	$\pm 0,089$	$\pm 0,089$
Уравнение регрессии	$G = -(7,3194 \cdot 10^{-4}) \cdot t^2 + 0,1353 \cdot t + 0,4937$								
Коэффициент корреляции	0,9974								
Среднее квадратическое отклонение	0,04								
Средняя погрешность аппроксимации	8,13								

Принимаем, что в доверительные интервалы будут укладываться 90 % результатов всех измерений. Значения средней относительной погрешности каждого измерения и средняя погрешность аппроксимации не превышает 9 %.

Достоверность результатов измерения вязкости оценивалась при десятикратном испытании одного сорта масла. Среднее значение вязкости определяли как среднеарифметическое из 10 измерений.

Таблица 2.6 – Показания вискозиметра при температуре 100 °С минерального масла МТ-8п и результаты статической обработки

	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3	Опыт № 4	Опыт № 5
1	2	3	4	5	6
Показания вискозиметра, сСт	9,3	9,1	9,3	9,5	9,3
	9,3	9,1	9,1	9,1	9,3
	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
	9,1	8,9	8,9	8,9	9,1
	9,1	8,9	9,1	8,9	9,1
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Среднее значение вязкости, сСт	9,06	8,98	9,02	9,02	9,06
Средняя квадратичная ошибка, $S_n$	0,16	0,1	0,14	0,19	0,16
Средняя относительная погрешность, %	2	1	2	2	2
Доверительный интервал $\Delta\tau_{\bar{x}}$	$\pm 0,32$	$\pm 0,2$	$\pm 0,28$	$\pm 0,38$	$\pm 0,32$

Таблица 2.7 – Данные статической обработки результатов испытания трансмиссионного масла МТ-8п на противоизносные свойства

Показатель	Износ $U$ , мм			
	л	ц	п	ф, ср.
Опыт № 1	0,30	0,26	0,28	0,280
Опыт № 2	0,28	0,30	0,28	0,287
Опыт № 3	0,26	0,30	0,30	0,287
Опыт № 4	0,26	0,28	0,30	0,280
Опыт № 5	0,30	0,30	0,28	0,293
Среднее значение	–	–	–	0,2854
Абсолютная погрешность опыта	Минимальная 1,89 %			
	Максимальная 2,66 %			

Таким образом, при испытании на изнашивание достаточно проводить два опыта, при этом абсолютная погрешность не будет превышать 3 %.

Графические данные изменения коэффициента поглощения светового потока, коэффициента относительной вязкости и испаряемости минерального трансмиссионного масла МТ-8п при окислении после статистической обработки представлены на рисунке 2.9.

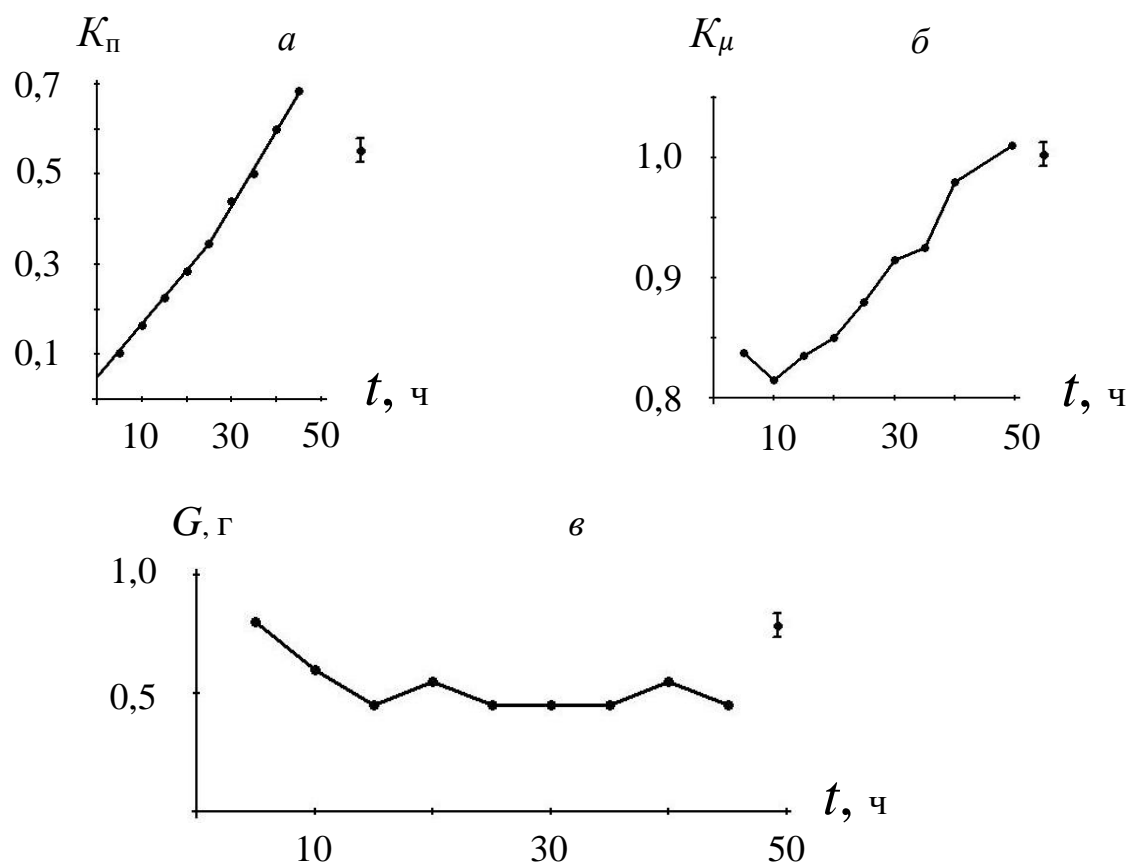


Рисунок 2.9 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$  (а), коэффициента относительной вязкости  $K_{\mu}$  (б) и испаряемости  $G$  (в) от времени окисления минерального трансмиссионного масла МТ-8п при статистической обработке данных.

## Выводы по второй главе

1. Разработан комплексный метод контроля процессов окисления товарных и старения работающих трансмиссионных масел, предусматривающий применение прибора для термостатирования, фотометрического устройства, малообъемного

вискозиметра, трехшариковой машины трения, центрифуги и электронных весов, позволяющий получить дополнительную информацию об изменении свойств масел при термостатировании и старении в трансмиссиях, определить влияние продуктов этих процессов и базовой основы на противоизносные свойства, а применение электрометрического метода – контролировать процессы, протекающие на фрикционном контакте при граничном трении скольжения.

2. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных и регрессионный анализ по изменению оптических свойств масел, кинематической вязкости, испаряемости и противоизносным свойствам при их окислении.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

#### 3.1 Результаты испытания минерального трансмиссионного масла ТСзп-8

Данное масло производится по ТУ 38.1011280–89 и является маловязким, низкозастывающим, загущенным стойкой к деструкции вязкостной присадкой, содержит противозадирную, противоизносную, антиокислительную и антипенную присадки. Масло предназначено для смазывания агрегатов трансмиссий, имеющих планетарные редукторы, коробок передач и некоторых систем гидроуправления мобильных транспортных средств [124].

По классификации трансмиссионных масел (ГОСТ 17479.2–85) масло ТСзп-8 относится к группе ТМ-3-9. Рекомендуемая область применения: цилиндрические, конические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях до 2 500 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С.

На рисунке 3.1 представлен результат испытания трансмиссионного масла ТСзп-8.

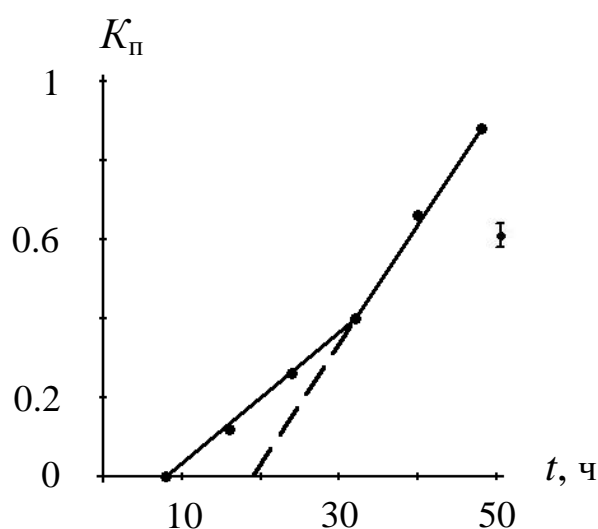


Рисунок 3.1 – Зависимость коэффициента поглощения светового потока от времени окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 при температуре 150 °С

Данная зависимость имеет изгиб после 32 ч испытания, что свидетельствует о том, что в процессе окисления образуются два вида продуктов с различной оптической плотностью. Начало образования более оптически непрозрачных продуктов определяется продлением участка зависимости  $K_{\Pi} = f(t)$  после изгиба до пересечения с осью абсцисс. Образование этих продуктов начинается от 20 ч. Установлено, (рисунок 3.1), что в течение 8 ч окислительные процессы практически отсутствуют т. е. существует область сопротивляемости исследуемого масла температурным воздействиям.

Вязкость окисленного масла оценивалась коэффициентом относительной вязкости  $K_{\mu}$ , по выражению

$$K_{\mu} = \mu_{\text{ок}} / \mu_{\text{тов}}, \quad (3.1)$$

где  $\mu_{\text{ок}}$  и  $\mu_{\text{тов}}$  – соответственно вязкости окисленного и товарного масел, сСт.(мм<sup>2</sup>/с).

Установлено (рисунок 3.2, а), что вязкость при окислении масла увеличивается по линейной зависимости и за 48 ч испытания она увеличилась на 20 %. Известно [135], что вязкость масел в процессе эксплуатации не должна увеличиваться более чем на 20–30 %, так как это увеличивает потери на трение и снижает КПД трансмиссии.

Испаряемость масла (рисунок 3.2, б) увеличивается по экспоненте и за 48 ч испытания составила 21,1 г, а за первые 8 ч – 6,1 г.

Полученные результаты исследования показали, что термоокислительная стабильность масла зависит от скоростей изменения коэффициента поглощения светового потока и испаряемости, так как вязкость окисляемого масла определяется концентрацией продуктов окисления, их составом, а также массой испарившихся лёгких фракций и деструкцией вязкостной присадки. В этой связи для оценки термоокислительной стабильности смазочных масел предложен коэффициент  $E_{\text{тос}}$ , учитывающий эти два параметра [105, 115, 121, 126, 117, 136–138]:

$$E_{\text{тоc}} = K_{\Pi} + K_G, \quad (3.2)$$

где  $K_{\Pi}$  и  $K_G$  – коэффициенты поглощения светового потока и испаряемости

$$K_G = m/M, \quad (3.3)$$

где  $m$  – масса испарившегося масла за определённый отрезок времени;  $M$  – масса пробы масла после окисления за тот же период окисления.

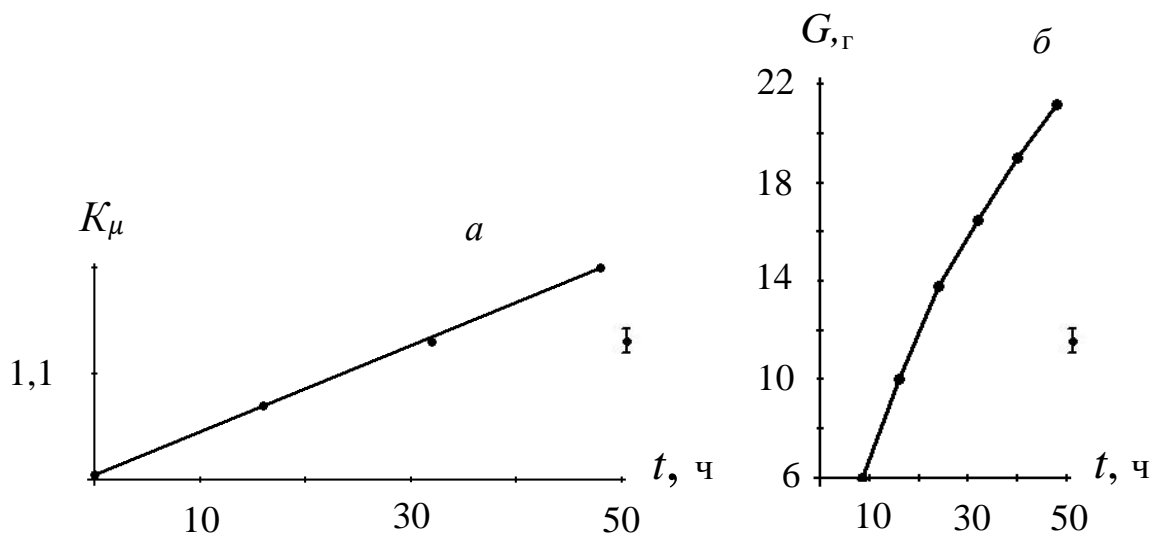


Рисунок 3.2 – Зависимости коэффициента относительной вязкости  $K_{\mu}$  (а) и испаряемости  $G$  (б) от времени окисления трансмиссионного масла ТСзп-8

Коэффициент  $E_{\text{тоc}}$  является безразмерным (рисунок 3.3). Тенденция изменения коэффициента термоокислительной стабильности аналогична зависимости  $K_{\Pi} = f(t)$  (рисунок 3.2). Различия заключаются лишь в том, что область сопротивляемости окислению сократилась с 8 до 5 ч, а начало образования продуктов окисления с бóльшей оптической плотностью сократилось с 20 до 14 ч за счёт влияния испаряемости масла при окислении.

Процессы окисления и испарения оценивались скоростью их изменения во времени (рисунок 3.4, а и б). Установлено, что скорость окисления и испарения непостоянны, и объясняется этот факт процессами самоорганизации [57, 58], сог-



ласно которым избыточная тепловая энергия поглощается продуктами окисления и испарения, а в процессе окисления происходит ее перераспределение между продуктами с различной оптической плотностью и испарения. Так, при увеличении скорости окисления  $V_{K_{II}}$  происходит уменьшение скорости испарения  $V_G$ .

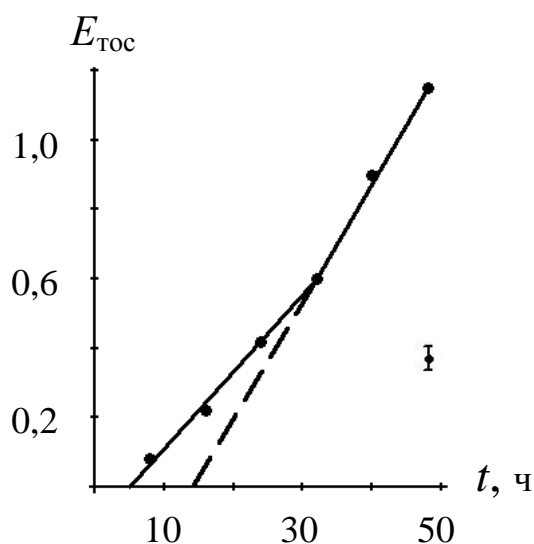


Рисунок 3.3 – Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8

Перераспределение избыточной энергии наблюдается при переходе начальных продуктов окисления в более энергоёмкие (с большей оптической плотностью), при этом скорость окисления уменьшается (рисунок 3.4, *a* время 24–32 ч). Поэтому можно утверждать, что процесс окисления является периодическим: в начале образуются менее энергоёмкие продукты, при достижении определённой концентрации часть их переходит в более энергоёмкие. Этот процесс характеризуется колебанием концентрации начальных продуктов окисления и периодическим увеличением концентрации энергоёмких продуктов окисления. Интенсивность процесса самоорганизации предложено оценивать коэффициентом  $K_c$ , ( $\Gamma^{-1}$ ) по выражению [120]:

$$K_c = V_{K_{II}}/V_G, \quad (3.4)$$

где  $V_{K_{II}}$  и  $V_G$  – скорости окисления и испаряемости соответственно.

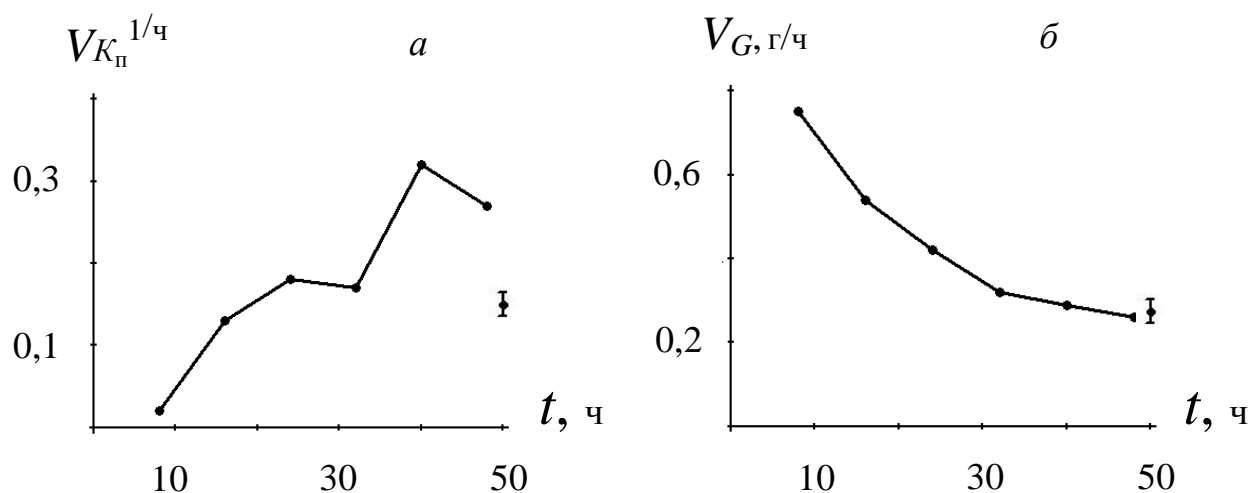


Рисунок 3.4 – Зависимости скоростей окисления  $V_{K_{II}}$  (а) и испаряемости  $V_G$  (б) от времени испытания трансмиссионного масла ТСзп-8

Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации (рисунок 3.5) представляет ломаную кривую, подтверждающую наличие перераспределения тепловой энергии. Так, в период времени испытания от 8 до 16 ч соотношение скоростей окисления и испаряемости уменьшается одинаково, в период от 16 до 32 ч скорость окисления преобладает над скоростью испарения, а от 32 до 40 ч в момент образования более энергоёмких продуктов окисления, скорость окисления резко увеличивается, а в период времени от 40 до 48 ч соотношение уменьшается за счет увеличения испаряемости масла.

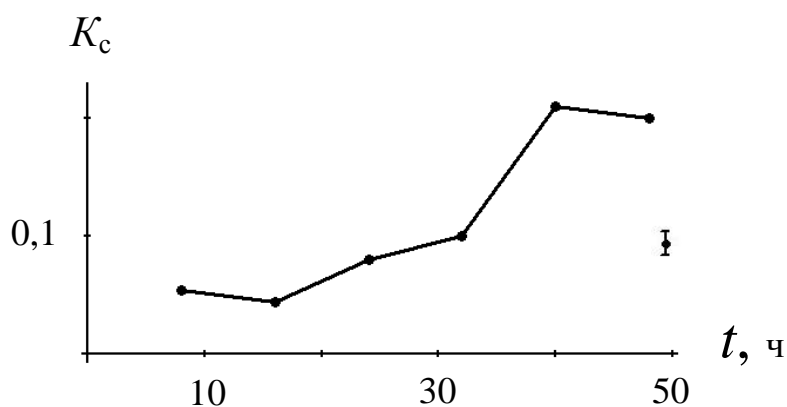


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента интенсивности процесса самоорганизации от времени окисления трансмиссионного масла ТСзп-8

Динамика окисления трансмиссионного масла при циклическом изменении температуры испытания [99, 103] представлена зависимостями коэффициента поглощения светового потока от температуры и времени испытания (рисунок 3.6). Масло выдержало 5 циклов: 3 цикла повышения температуры от 120 до 150 °С и два цикла понижения температуры от 150 до 120 °С в течение 138 ч, при этом коэффициент  $K_{\Pi}$  составил 0,8 ед. Установлено, что процесс окисления начинается при температуре 140 °С или после 24 ч испытания.

Применение метода циклического изменения температуры при оценке термоокислительной стабильности позволяет сравнивать различные смазочные материалы по количеству циклов повышения и понижения температуры испытания, а по скоростям окисления и испарения в каждом из циклов определить температуры, при которых эти параметры минимальны, определяющие температурный диапазон работоспособности исследуемых масел.

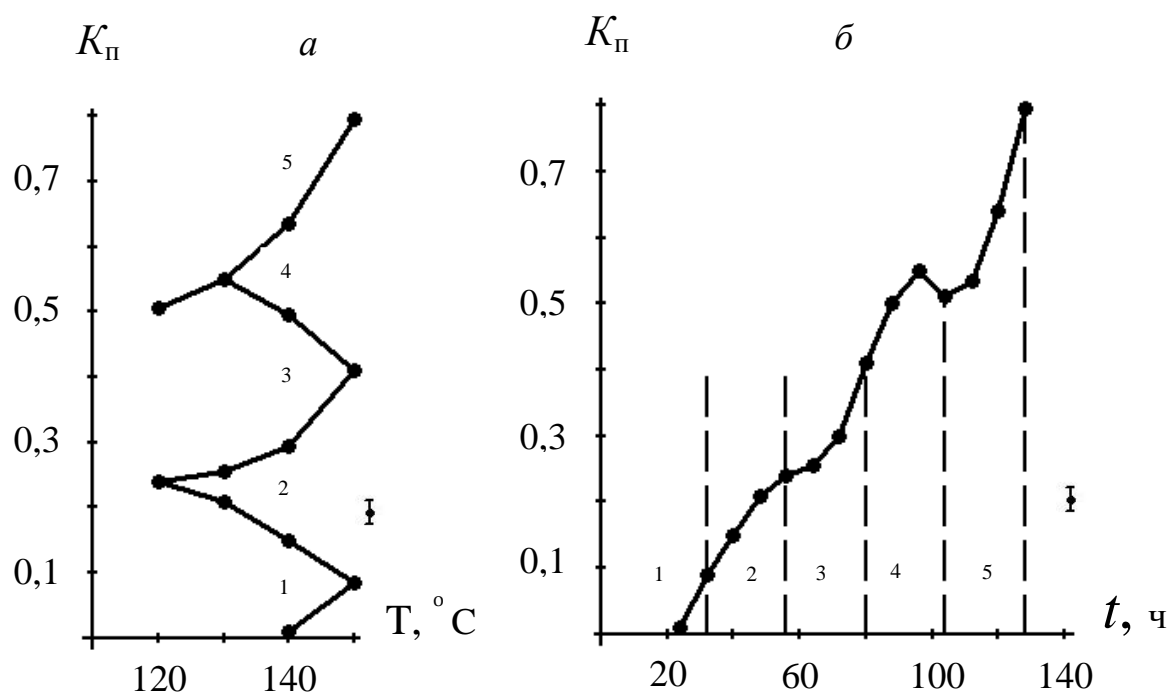


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента поглощения светового потока от температуры термостатирования (а) и времени испытания (б) при циклическом изменении температуры: чётные цифры – циклы понижения температуры; нечётные – циклы повышения температуры

Влияние температуры на процессы окисления и испарения оценивалось их скоростями (рисунок 3.7). Показано, что во 2-м цикле понижения температуры до 120 °С окислительные процессы продолжаются, однако в 4-м цикле понижения температуры скорость окисления приобретает отрицательное значение. Испаряемость масла в циклах понижения температуры до 120 °С не прекращается, поэтому температура работоспособности масла ТСзп-8 должна быть ниже 150 °С, что не соответствует требованиям ГОСТ 17479.2–85.

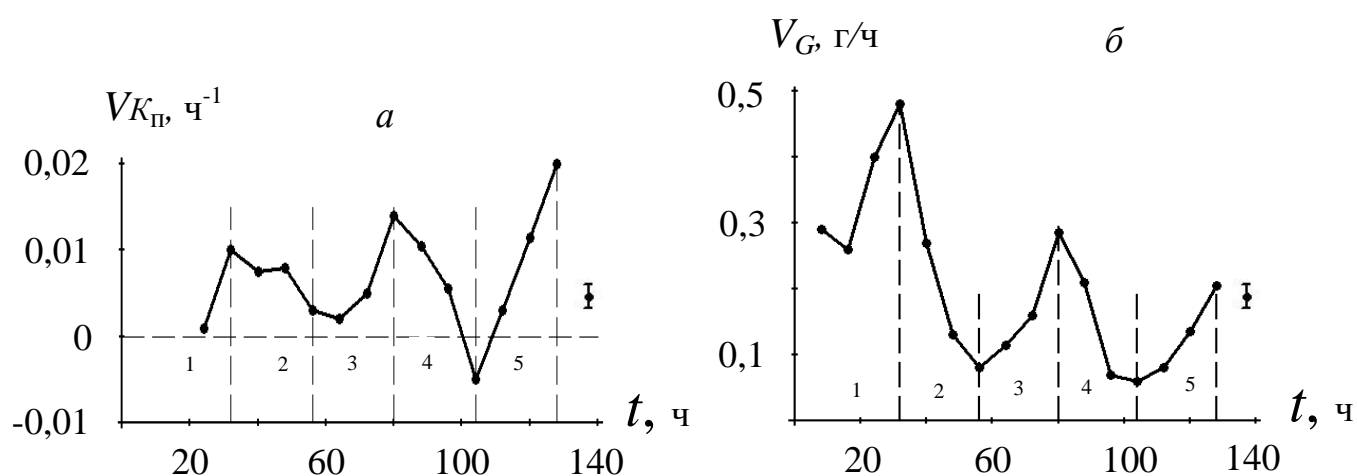


Рисунок 3.7 – Зависимости скоростей окисления  $V_{K_{П}}$  (а) и испарения  $V_G$  (б) от времени окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 при циклическом изменении температуры испытания: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры от 120 до 150 °С; 2, 4 – циклы понижения температуры от 150 до 120 °С.

Второй метод обоснования критерия термоокислительной стабильности основан на физической имитационной модели, заключающейся в том, что сброс избыточной тепловой энергии происходит по двум каналам: изменению оптических свойств смазочного масла и испаряемости. Изменения этих показателей зависят от сопротивляемости смазочного масла температурным воздействиям, а так как эти процессы протекают одновременно и параллельно, то эквивалентное сопротивление  $R_3$  можно определить, применив законы электротехники при параллельном соединении сопротивлений:

$$R_3 = \frac{K_{П} \times K_G}{K_{П} + K_G}, \quad (3.5)$$

где  $K_{\Pi}$  и  $K_G$  – коэффициенты поглощения светового потока и испаряемости.

Если принять, что сопротивление любого смазочного материала равно единице, то при его термостатировании в зависимости от качества присадок и базовой основы сопротивляемость будет различна, что позволит их сравнивать по этому показателю, определяемому выражением [139]:

$$R_o = 1 - \frac{K_{\Pi} \cdot K_G}{K_{\Pi} + K_G}, \quad (3.6)$$

где  $R_o$  – коэффициент, характеризующий сопротивляемость исследуемого масла окислению.

Зависимости коэффициента сопротивления окислению от времени окисления трансмиссионного масла ТСЗп-8 и коэффициента поглощения светового потока представлены на рисунке 3.8.

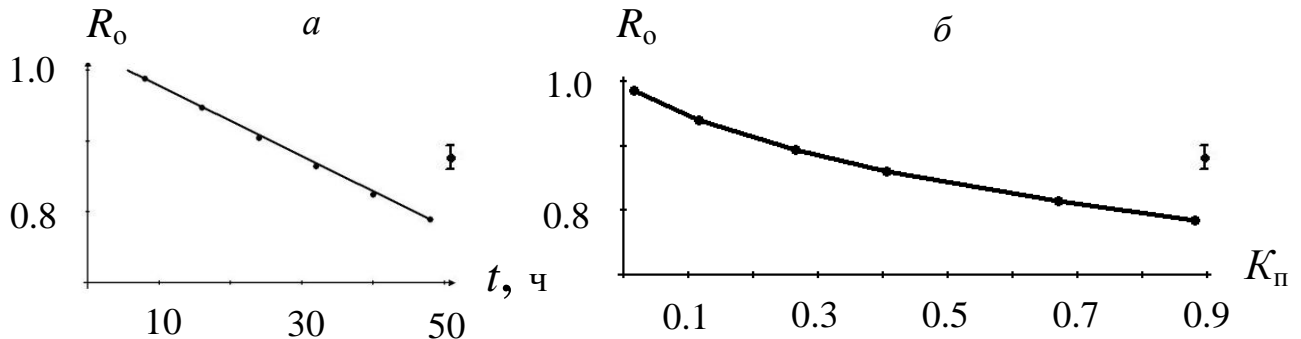


Рисунок 3.8 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла ТСЗп-8 от времени окисления (а) и коэффициента поглощения светового потока (б)

Зависимость  $R_o = f(t)$  имеет линейный характер и описывается регрессионным уравнением:

$$R_o = -0,00453t + 1,01, \quad (3.7)$$

где 0,00453 – коэффициент, характеризующий скорость изменения сопротивления окислению; 1,01 – коэффициент, характеризующий потенциальное сопротивление окислению товарного масла.

Коэффициент корреляции составил – 0,9924.

Зависимость коэффициента сопротивления от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 3.8б) описывается уравнением второго порядка, а регрессионное уравнение имеет следующий вид:

$$R_o = 0,1949 \cdot K_{\Pi}^2 - 0,3925 \cdot K_{\Pi} + 0,993, \quad (3.8)$$

где значение коэффициента 0,3925 характеризует скорость изменения коэффициента сопротивления окислению, а значение 0,1949 – его ускорение при увеличении коэффициента поглощения светового потока.

Коэффициент корреляции составил – 0,9947.

Зависимости коэффициента сопротивления окислению от температуры и коэффициента поглощения светового потока при циклическом изменении температуры окисления в диапазоне температур от 120 до 150 °С и от 150 до 120 °С представлены на рисунке 3.9. Установлено, что независимо от циклов повышения или понижения температуры окисления коэффициент сопротивления окислению уменьшается (рисунок 3.9, а). Однако наибольшее уменьшение коэффициента сопротивления окислению наблюдается при температуре 150 °С.

Зависимость коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока при циклическом изменении температуры окисления (рисунок 3.9, б) описывается регрессионным уравнением вида

$$R_{oц} = 0,12079 \cdot K_{\Pi}^2 - 0,3742 \cdot K_{\Pi} + 0,9785, \quad (3.9)$$

где значение коэффициента 0,3742 характеризует скорость изменения коэффициента сопротивления окислению, а значение 0,12079 – его ускорение при увеличении коэффициента поглощения светового потока.

Коэффициент корреляции составил – 0,9976.

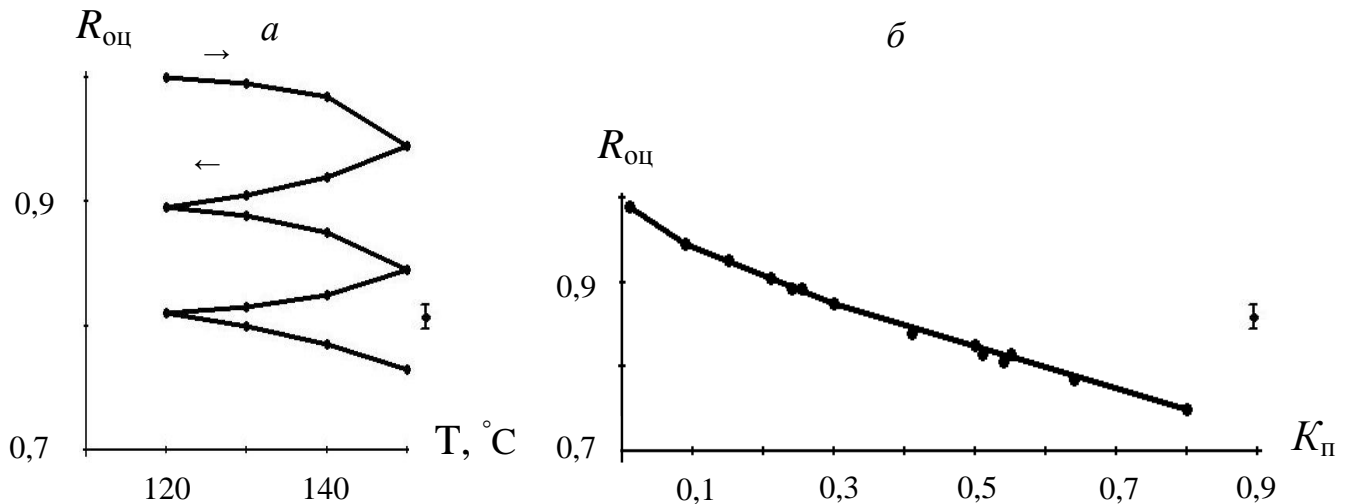


Рисунок 3.9 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению от температуры испытания (а) и коэффициента поглощения светового потока (б) при циклическом изменении температуры окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8

Сравнивая зависимости  $R_o=f(K_{\text{п}})$  и  $R_{\text{ox}}=f(K_{\text{п}})$  (рисунок 3.8, б и 3.9, б) видим, что при коэффициенте поглощения светового потока, например 0,8 ед., коэффициент сопротивления окислению при статической температуре испытания 150 °С равен 0,8 ед., а при циклической – 0,75ед. Снижение значения коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры окисления вызвано увеличением времени окисления.

Изменение противоизносных свойств трансмиссионного масла ТСзп-8 оценивалось по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах, среднеарифметическому значению площади пятна износа на трех шарах, коэффициенту электропроводности фрикционного контакта  $K_3$  и продолжительности формирования номинальной площади контакта  $t_{\text{фпк}}$ , определяемых по диаграммам записи тока (рисунок 3.10) согласно методике, описанной в работе [140]. Регистрация коэффициента  $K_3$  и время  $t_{\text{фпк}}$  производилась при наступлении установившегося изнашивания. В этом случае коэффициент  $K_3$  приобретал минимальное значение, а время  $t_{\text{фпк}}$  соответствовало упругим деформациям в контакте.

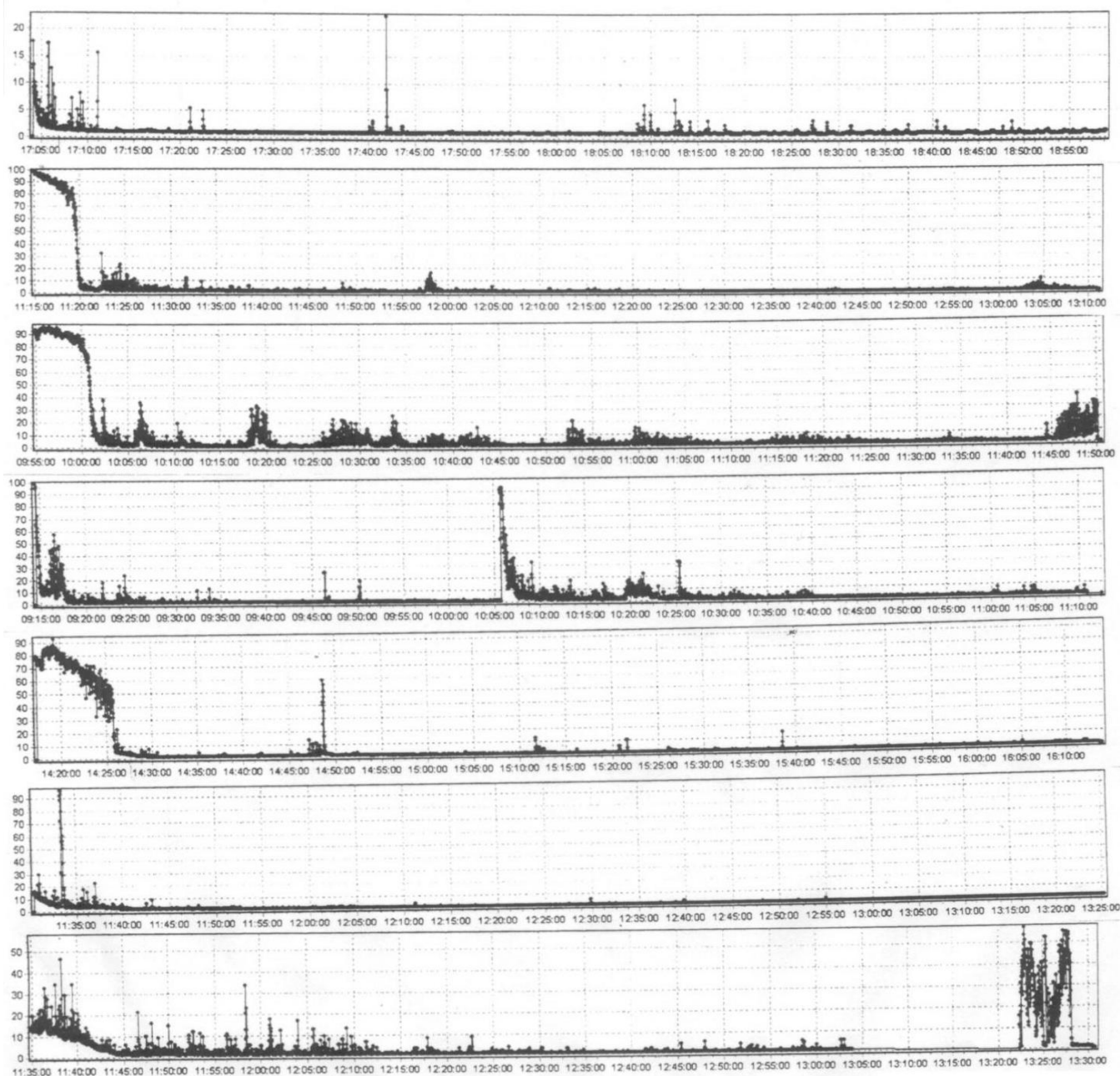


Рисунок 3.10 – Диаграммы изменения тока, протекающего через фрикционный контакт при триботехнических испытаниях окисленных трансмиссионных масел ТСзп-8

Зависимости этих параметров от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  представлены на рисунке 3.11. Установлено (рисунок 3.11, а), что противозносные свойства масла при малых значениях  $K_{\Pi} = 0,13$  ед. понижаются на 11 %, после чего они повышаются до значения коэффициента  $K_{\Pi} = 0,45$  ед. и становятся



выше, чем у товарного масла (точка на ординате) на 6 %, затем наступает повторное понижение до значения  $K_{\text{п}} = 0,64$  ед. с последующей стабилизацией. Такое изменение противоположных свойств объясняется различием в составе и свойствах продуктов окисления и их склонностью к формированию на поверхностях

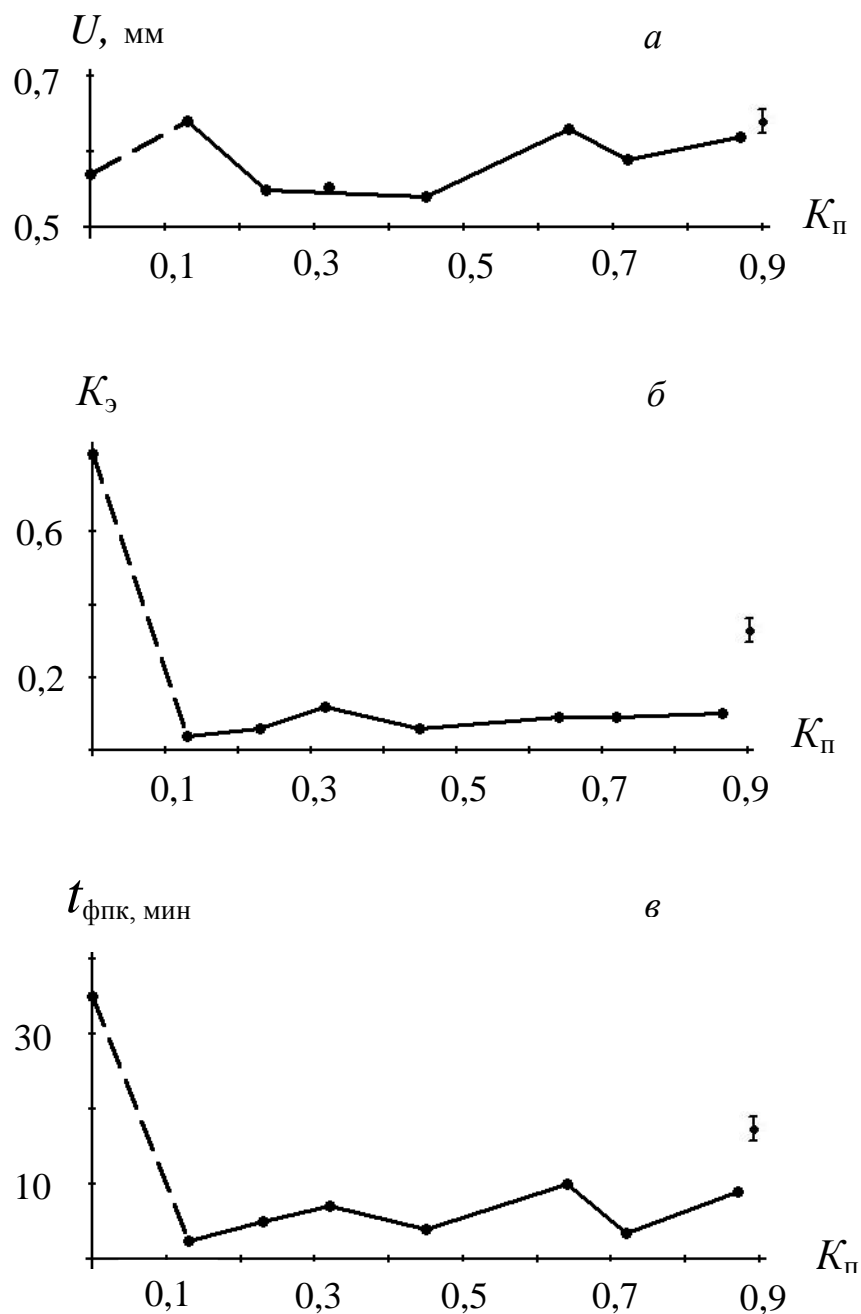


Рисунок 3.11 – Зависимости диаметра пятна износа  $U$  (а), коэффициента электропроводности фрикционного контакта  $K_{\text{з}}$  (б) и времени формирования номинальной площади контакта  $t_{\text{фпк}}$  от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла ТСзп-8 (в)

трения адсорбционных или хемосорбционных граничных слоёв. Показано, что при окислении масла уменьшается коэффициент  $K_3$  (рисунок 3.11, б) за счёт разделения поверхностей трения граничным слоем высокого электрического сопротивления и низким значением времени формирования номинальной площади фрикционного контакта, не превышающим 10 мин (рисунок 3.11, в).

На основании полученных результатов исследования противоизносных свойств при окислении трансмиссионного масла предложен критерий противоизносных свойств  $\Pi$  ( $\text{мм}^{-1}$ ), определяемый отношением [108–110, 115]:

$$\Pi = K_{\Pi} / U \quad (3.10)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $U$  – параметр износа, мм.

Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента  $K_{\Pi}$  представлена на рисунке 3.12 и описывается линейным уравнением:

$$\Pi = 2 \cdot K_{\Pi} \quad (3.11)$$

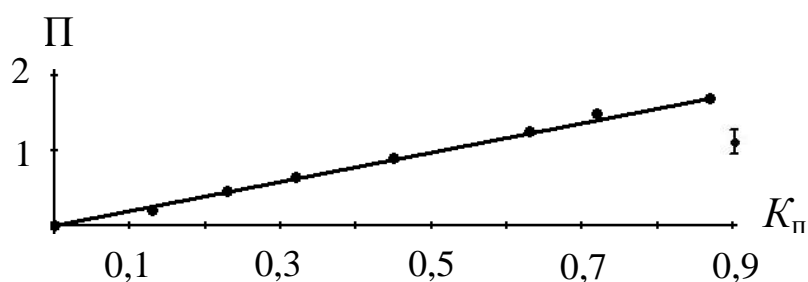


Рисунок 3.12 – Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла ТСзп-8

Данный критерий характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, а его зависимость от коэффициента поглощения светового потока является эмпирической, так как пло-

щадь контакта выражена среднеарифметическим значением диаметра пятна износа.

На рисунке 3.13 представлены зависимости среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта на трех шарах и критерия противоизносных свойств  $\Pi_s$  (рассчитанного по площади контакта) от коэффициента поглощения светового потока. Сравнив зависимости  $U=f(K_{\Pi})$  (рисунок 3.11, а) и  $S=f(K_{\Pi})$  (рисунок 3.13, а) видим, что применение диаметра в качестве показателя износа более наглядно при оценке влияния продуктов окисления на износ. Однако тенденция изменения противоизносных свойств от концентрации продуктов окисления сохраняется.

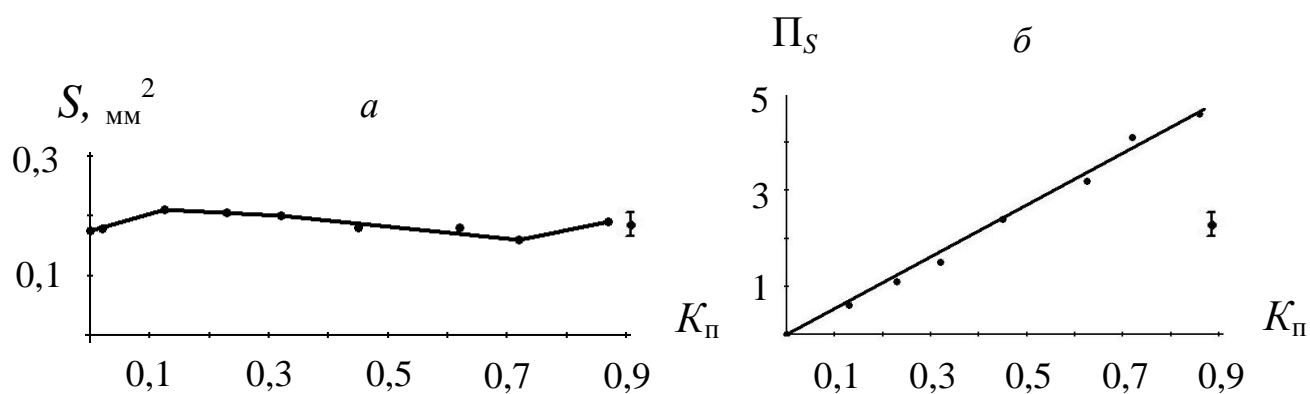


Рисунок 3.13 – Зависимости среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта (а) и критерия противоизносных свойств (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 при температуре 150 °С

Изменение критерия противоизносных свойств  $\Pi_s$ ,  $(\text{мм}^2)^{-1}$  определяемого отношением коэффициента поглощения светового потока к номинальной площади фрикционного контакта  $S$  (рисунок 3.13, б), описывается линейным регрессионным уравнением вида:

$$\Pi_s = 5.333 \cdot K_{\Pi} \quad (3.12)$$

Коэффициент корреляции составил – 0,985.

Таким образом, для вычисления критерия противоположных свойств можно пользоваться как диаметром, так и площадью пятна износа. Данный критерий применяется для сравнения различных масел, обоснования их ресурса и зависимости противоположных свойств от состава продуктов окисления. [116, 141–143], а также оценки триботехнических свойств работающих масел и масел, находящихся на длительном хранении.

Механохимические процессы, протекающие на фрикционном контакте предложено оценивать коэффициентом интенсивности  $K_{\text{МХП}}$ , (мм) по формуле [26] (рисунок 3.14):

$$K_{\text{МХП}} = U \cdot K_{\text{э}}, \quad (3.13)$$

где  $U$  – параметр износа, мм;  $K_{\text{э}}$  – коэффициент электропроводности фрикционного контакта, ед.

Параметр износа  $U$  – характеризует механическую составляющую при изнашивании, а коэффициент электропроводности фрикционного контакта  $K_{\text{э}}$  – химическую составляющую в области упругих деформаций.

Согласно полученным данным (рисунок 3.14) установлены две области различной интенсивности механохимических процессов: первая область при значениях коэффициента  $K_{\text{п}}$  до 0,32 ед., где механохимические процессы ускоряются, и

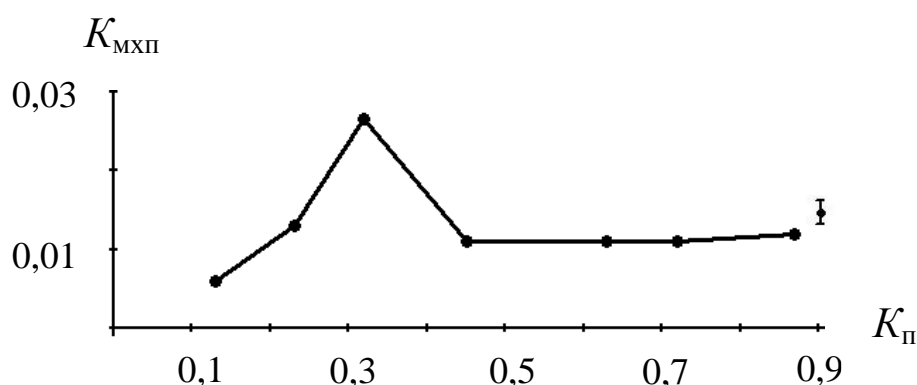


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента интенсивности механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте, от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла ТСзп-8

вторая область при  $K_{\text{п}} > 0,32$  ед., где эти процессы замедляются и переходят к стабилизации. Поэтому можно утверждать, что при увеличении концентрации продуктов окисления до значения коэффициента  $K_{\text{п}} = 0,32$  ед. на поверхностях трения формируются адсорбционные слои, а при  $K_{\text{п}} > 0,3$  ед. изнашивание протекает при формировании на поверхностях трения хемосорбционных граничных слоёв.

## Выводы

1. Термостатирование минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 при температуре  $150^{\circ}\text{C}$  показало, что оно выдержало 48 ч, при этом коэффициент поглощения светового потока составил 0,8 ед., вязкость увеличилась на 20 %, а летучесть составила 21,2 г. Установлено, что при окислении масла образуются два вида продуктов различной энергоёмкости.

2. Предложен коэффициент интенсивности процессов самоорганизации при окислении масел, определяемый отношением скорости окисления к скорости испарения, подтверждающий наличие явления перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения.

3. При циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от  $120$  до  $150^{\circ}\text{C}$  масло выдержало 5 циклов или 128 ч испытания, однако при температуре  $120^{\circ}\text{C}$  окислительные процессы прекращаются только в 4-м цикле понижения температуры, а скорость испарения при этой температуре составляет 0,06 г/ч, поэтому температура  $150^{\circ}\text{C}$  является высокой для данного масла, что не соответствует стандарту.

4. Предложен критерий противоизносных свойств трансмиссионного масла ТСзп-8, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа. Установлена линейная зависимость данного критерия от коэффициента поглощения светового потока, позволяющего определять противоизносные свойства масла в зависимости от степени их окисления.

5. Предложен коэффициент интенсивности механохимических процессов,

протекающих на фрикционном контакте, определяемый произведением параметра износа на коэффициент электропроводности фрикционного контакта. Установлены две области изменения механохимических процессов различной интенсивности, характеризующие области формирования адсорбционных граничных слоёв при коэффициенте поглощения светового потока  $K_{\Pi} < 0,32$  ед. и хемосорбционных слоёв при  $K_{\Pi} > 0,32$  ед.

### **3.2 Результаты испытания минерального трансмиссионного масла МС-20**

Масло МС-20 (ГОСТ 217 43-76) [2] селективной очистки применяется в поршневых двигателях самолётов, в составе маслосмесей с маслами МС-8 и МС-8п в смазочных системах турбовинтовых двигателей, в осевых шарнирах втулок винтов вертолётов, для смазывания мотокомпрессоров газоперекачивающих агрегатов, а также в качестве базового для некоторых моторных масел и смазок. Кинематическая вязкость при  $100^{\circ}\text{C}$ , не менее  $20,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ , индекс вязкости – не менее 80, температура вспышки в открытом тигле – не ниже  $265^{\circ}\text{C}$ , температура застывания, не выше  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Данное масло испытывалось при статической температуре  $150^{\circ}\text{C}$  и циклической в диапазоне от  $120$  до  $150^{\circ}\text{C}$ . После каждых 8 ч испытания определялись оптические свойства, вязкость и испаряемость. Продолжительность испытаний определялась временем достижения коэффициента поглощения светового потока, равного приблизительно значения 0,8 ед.

Зависимости коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости и испаряемости от времени окисления представлены на рисунке 3.15. Установлено, что зависимость коэффициента поглощения светового потока от времени окисления (рисунок 3.15, а) имеет изгиб при  $K_{\Pi} = 0,4$  ед., который вызван образованием двух видов продуктов окисления с различной оптической плотностью. Начало образования более энергоёмких продуктов начинается после

40 ч испытания и определяется продлением участка зависимости после изгиба до пересечения с осью абсцисс.

Вязкость масла (рисунок 3.15, б), выраженная коэффициентом относительной вязкости, в начале испытания (до 40 ч) уменьшается на 7 % а после 136 ч она увеличивается на 43 %. Дальнейшее увеличение времени окисления понижает вязкость. Необходимо отметить, что понижение вязкости происходит в период образования первичных продуктов окисления, что может объясняться температурной деструкцией вязкостной присадки.

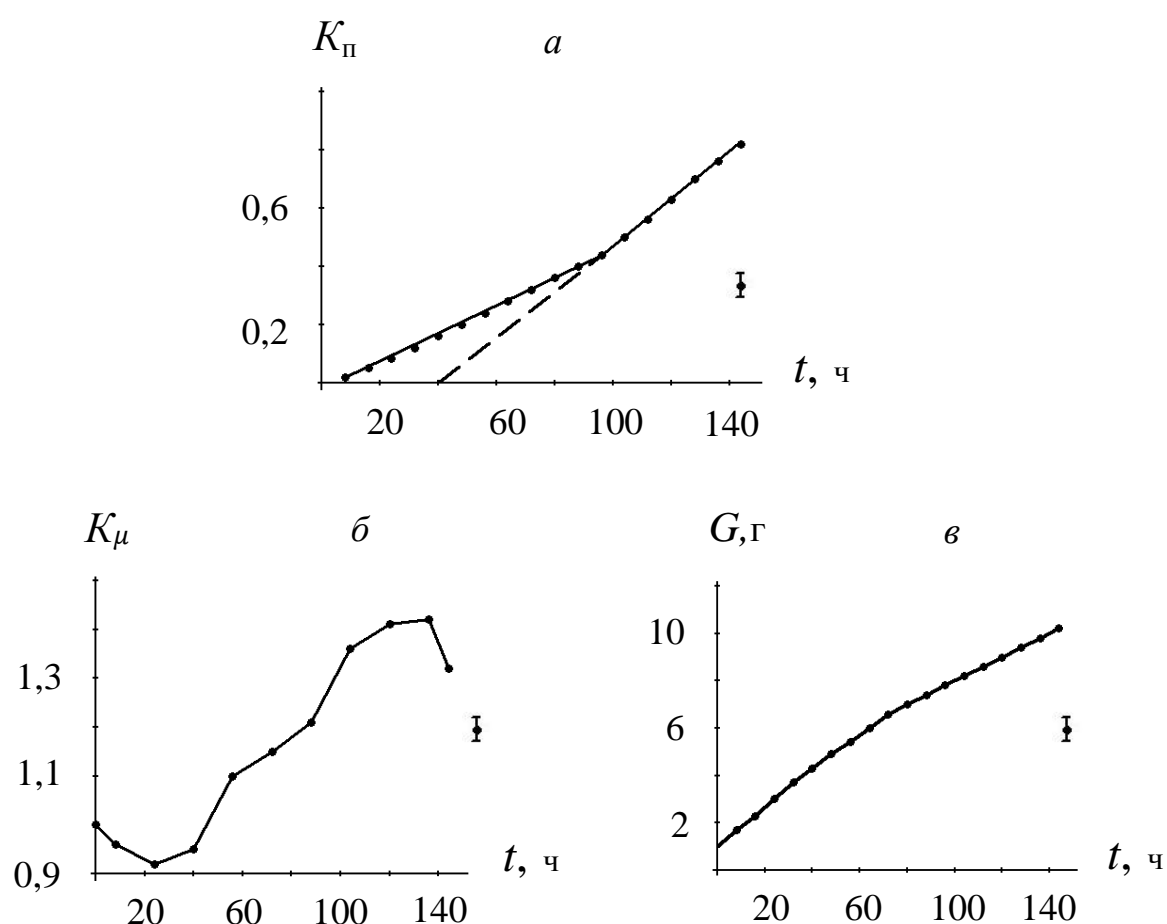


Рисунок 3.15 – Зависимости коэффициентов поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  (а), относительной вязкости  $K_{\mu}$  (б) и испаряемости  $G$  (в) от времени термоста-тирования трансмиссионного масла МС-20

Испаряемость масла МС-20 (рисунок 3.15, в) возрастает по экспоненте при увеличении времени окисления. За время испытания 144 ч она составила 10,3 г.

Продление зависимости до пересечения с осью абсцисс определяет концентрацию в масле лёгких фракций и воды, которая составляет 1 г.

Коэффициент термоокислительной стабильности  $E_{\text{тос}}$  (рисунок 3.16) характеризует количество поглощённой тепловой энергии продуктами окисления и испарения. Показано, что данная зависимость имеет изгиб, вызванный образованием двух видов продуктов окисления.

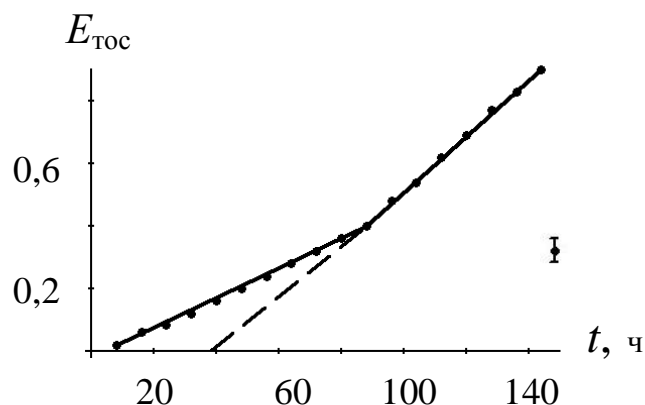


Рисунок 3.16 – Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности от времени термостатирования трансмиссионного масла МС-20 при температуре 150 °С

Эффективность применения фотометрического метода контроля термоокислительной стабильности масел различного назначения показана в работах [113, 114, 123, 144, 145].

Интенсивность процессов, протекающих в смазочном масле при термостатировании, оценивалась скоростями окисления и испарения (рисунок 3.17, а и б). Данные зависимости представляют ломаную кривую, вызванную перераспределением избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения, характеризующую процесс самоорганизации. Показано, что в начале образования более энергоёмких продуктов окисления ( $> 40$  ч) скорость окисления уменьшается, что подтверждает наличие процесса преобразования первичных продуктов в более энергоёмкие. Появление более энергоёмких продуктов вызы-



вает значительные колебания скорости окисления ( $t > 62$  ч) с сохранением тенденции её увеличения.

Скорость испарения (рисунок 3.17, б) в течение 84 ч испытания уменьшается, а затем стабилизируется, однако колебания скорости вызваны явлением перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения. Это подтверждается изменениями в противофазах скоростей окисления и испарения. Резкое падение скорости испарения в начале окисления масла вызвано наличием в товарном масле легких фракций и воды.

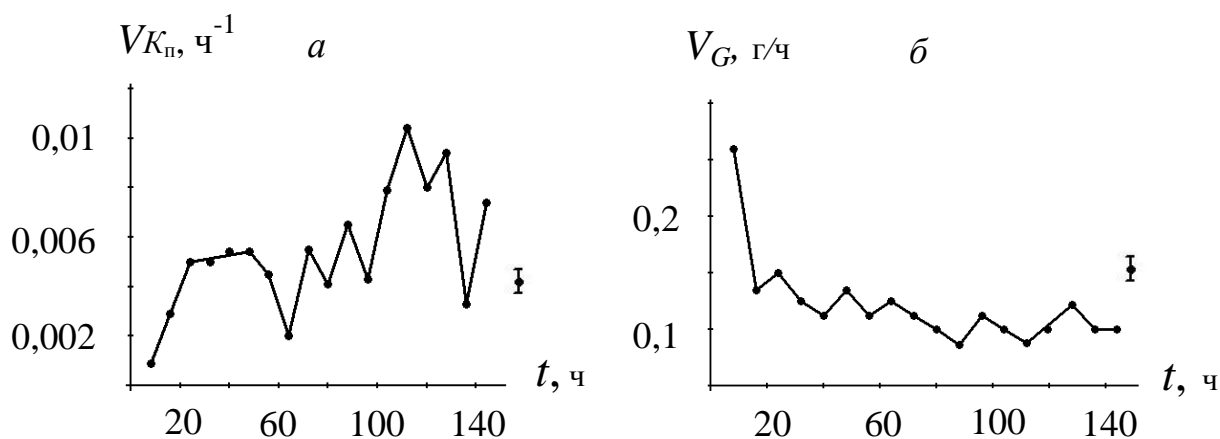


Рисунок 3.17 – Зависимости скоростей окисления  $V_{K_{п}}$  (а) и испарения  $V_G$  (б) от времени окисления трансмиссионного масла МС-20

Процессы самоорганизации, протекающие в смазочном масле, оценивались коэффициентом их интенсивности (рисунок 3.18).

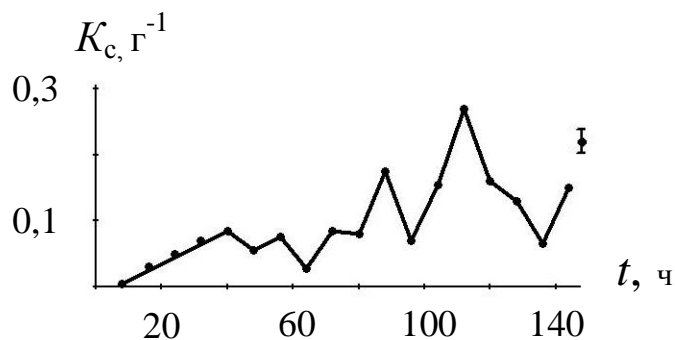


Рисунок 3.18 – Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации от времени окисления трансмиссионного масла МС-20

Установлено, что в период образования первичных продуктов окисления (40 ч) коэффициент интенсивности  $K_c$  увеличивается по линейной зависимости, а с появлением более энергоёмких продуктов он подвержен колебаниям из-за процессов перераспределения тепловой энергии, влияющих на скорости окисления и испарения.

При циклическом изменении температуры (рисунок 3.19) масло МС-20 выдержало 7 циклов повышения температуры от 120 до 150 °С и 6 циклов понижения температуры от 150 до 120 °С, т. е. всего 320 ч, причём коэффициент погло-

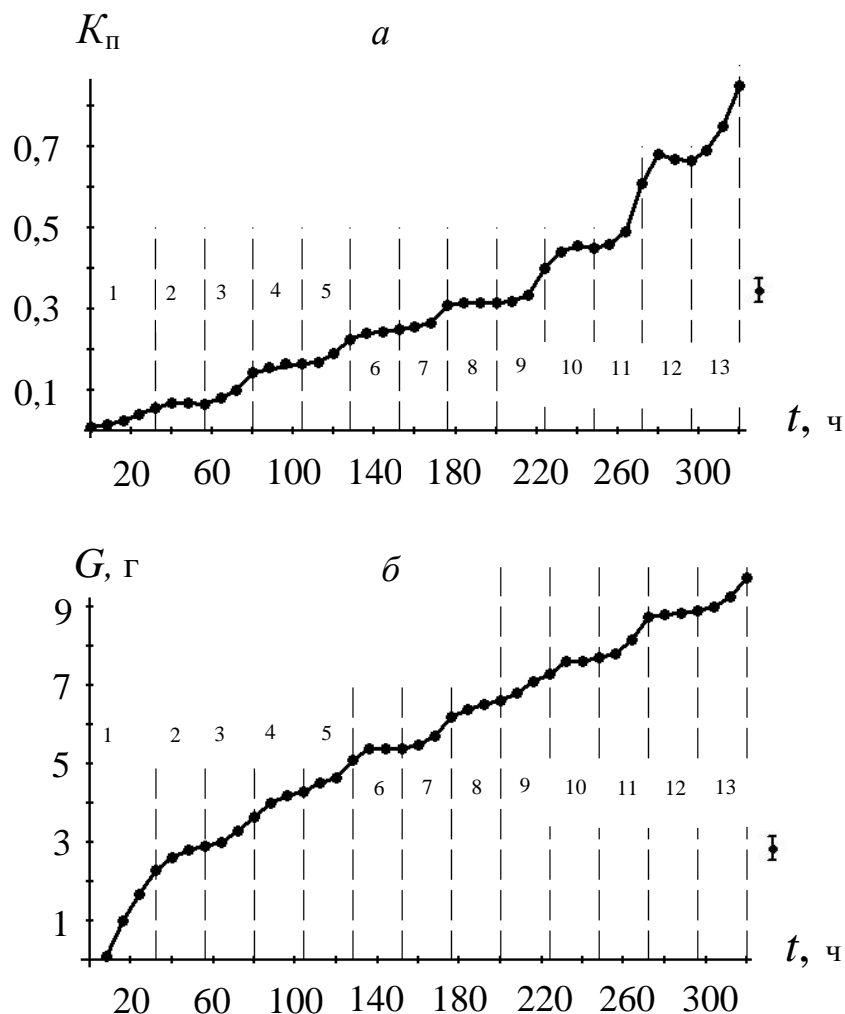


Рисунок 3.19 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока (а) и испаряемости (б) от времени испытания трансмиссионного масла МС-20 при циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С: нечетные цифры – циклы повышения температуры испытания от 120 до 150 °С; четные цифры – циклы понижения температуры испытания от 150 до 120 °С

щения светового потока составил 0,85 ед., испаряемость масла за 320 ч составила 9,8 г.

Испытания масла при циклическом изменении температуры применялись с целью определения температур начала окисления и испарения. Для этого построены зависимости скоростей окисления и испарения в циклах повышения и понижения температуры окисления (рисунок 3.20). Установлено, что в циклах понижения температуры скорость окислительных процессов замедляется практически до нуля, а в циклах 2, 10, 12 она приобретает отрицательные значения, поэтому температурой начала окисления масла можно считать 130 °С.

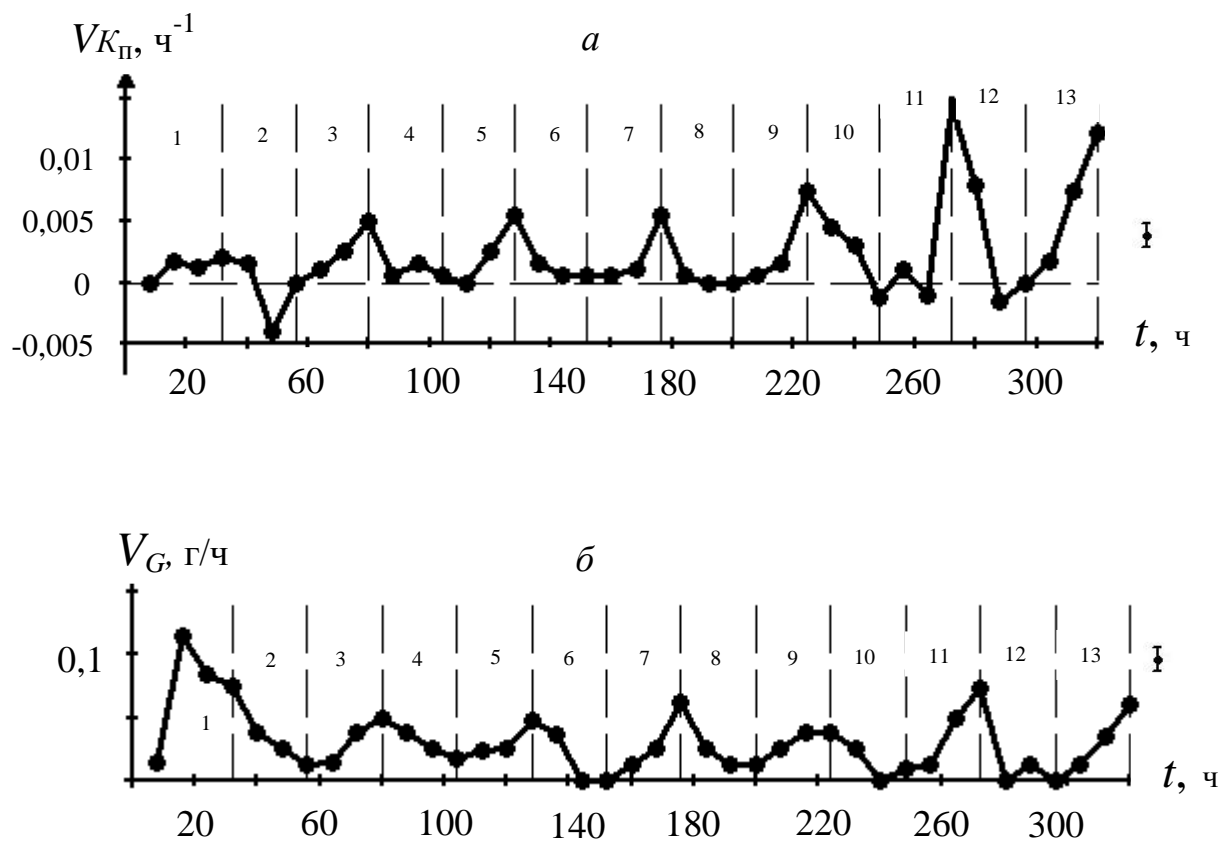


Рисунок 3.20 – Зависимости скорости окисления  $V_{K_{П}}$  (а) и скорости испарения  $V_G$  (б) от времени окисления при циклическом изменении температуры от 120 до 150 °С: нечетные цифры – циклы повышения температуры испытания от 120 до 150 °С; четные цифры – циклы понижения температуры испытания от 150 до 120 °С

Испаряемость масла (рисунок 3.20, б) в циклах понижения температуры 6, 10 и 12 приобретает нулевое значение, а при температуре 150 °С она приобретает скорость не более 0,075 г/ч, поэтому температурой начала испарения можно считать температуру 130 °С, при которой скорость испарения колеблется от 0 до 0,02 г/ч.

Коэффициент интенсивности процессов самоорганизации (рисунок 3.21) подвержен большим колебаниям, а в циклах 2, 10, 12 понижения температуры от 150 до 120 °С приобретает отрицательные значения, т. е. в этот период окислительные процессы останавливаются. Кроме того, в период образования начальных продуктов окисления амплитуда изменения коэффициента  $K_c$  не превышает значения 0,125 ед. (до 200 ч), а при образовании более энергоёмких продуктов она составляет до 0,22 ед., а в циклах понижения температуры испытания приобретает отрицательные значения. Это происходит из-за коагуляции более энергоёмких продуктов окисления, вызывающих осветление масла за счёт стягивания продуктов к центрам коагуляции и смещение скорости окисления в отрицательную сторону.

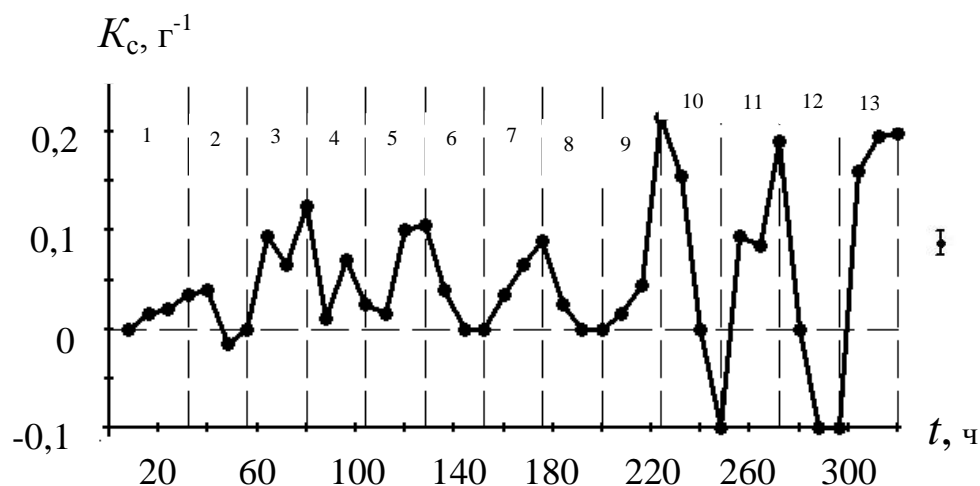


Рисунок 3.21 – Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в смазочном масле МС-20 при циклическом изменении температуры от времени испытания: нечетные цифры – циклы повышения температуры испытания от 120 до 150 °С; четные цифры – циклы понижения температуры испытания от 150 до 120 °С

Эффективность применения циклического метода изменения температуры испытания смазочных масел при контроле термоокислительной стабильности показана в работах [146–147].

Вторым методом обоснования критерия термоокислительной стабильности является использование коэффициента сопротивляемости смазочного материала температурным воздействиям (рисунок 3.22). Согласно модели под действием температуры избыточная тепловая энергия поглощается по двум каналам одновременно с образованием продуктов окисления, изменяющих оптические свойства масла ( $K_{\Pi}$ ) и продуктов испарения, количество которых выражено коэффициентом  $K_G$ . Оба показателя характеризуют сопротивляемость смазочного материала и определяются эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{ЭКВ}}$  из выражения

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{K_{\Pi} \cdot K_G}{K_{\Pi} + K_G}, \quad (3.14)$$

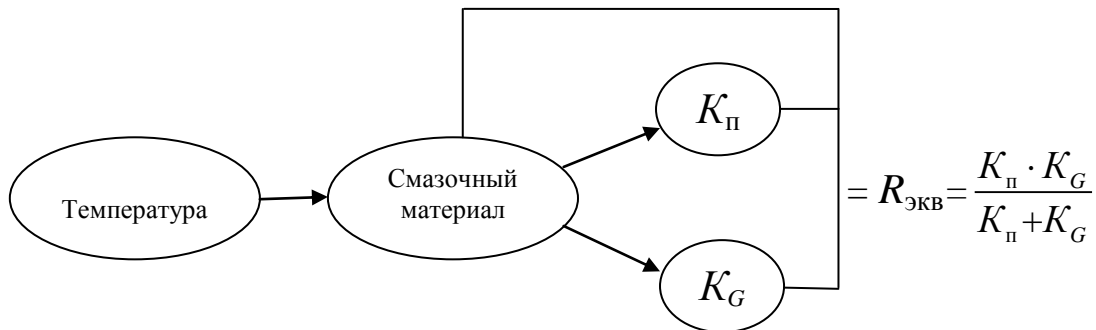


Рисунок 3.22 – Физическая модель сопротивления смазочного материала окислению

Используя формулу 3.6, можно вычислить коэффициент сопротивляемости окислению  $R_o$ :

$$R_o = 1 - \frac{K_{\Pi} \cdot K_G}{K_{\Pi} + K_G}. \quad (3.15)$$

Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального масла МС-20 от времени и коэффициента поглощения светового потока представлены на рисунке 3.23, *а* и *б*. Зависимость коэффициента сопротивляемости окислению  $R_o$  от времени окисления (рисунок 3.23, *а*) описывается линейным регрессивным уравнением:

$$R_o = -0,00067t + 0,995, \quad (3.16)$$

где коэффициент  $-0,00067$ , характеризует скорость уменьшения сопротивляемости масла окислению от времени испытания;  $0,995$  – коэффициент, характеризующий сопротивляемость товарного масла перед испытаниями.

Коэффициент корреляции составил  $-0,9924$ .

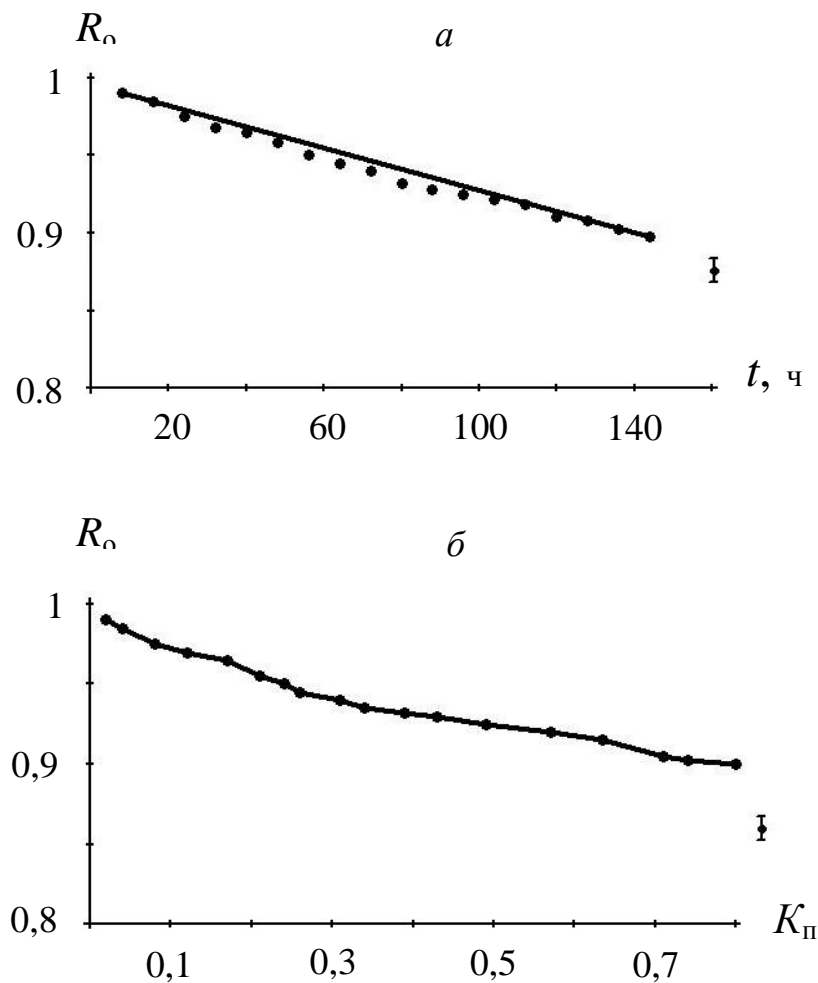


Рисунок 3.23 – Зависимость коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МС-20 от времени окисления (*а*) и коэффициента поглощения светового потока (*б*)

Зависимость коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 3.23б) описывается регрессивным уравнением вида

$$R_o = 0,0875 K_{\Pi}^2 - 0,18192 K_{\Pi} + 0,9919 \quad (3.17)$$

Коэффициент корреляции составил  $-0,9946$ .

При циклическом изменении температуры окисления в диапазоне температур от 120 до 150 °С коэффициент сопротивления окислению  $R_{\text{оц}}$  (рисунок 3.24, а) в основном изменяется при температуре 150 °С, а в циклах понижения температуры испытания от 150 до 120 °С он стабилизируется, т. е. температура 150 °С для масла МС-20 является предельной.

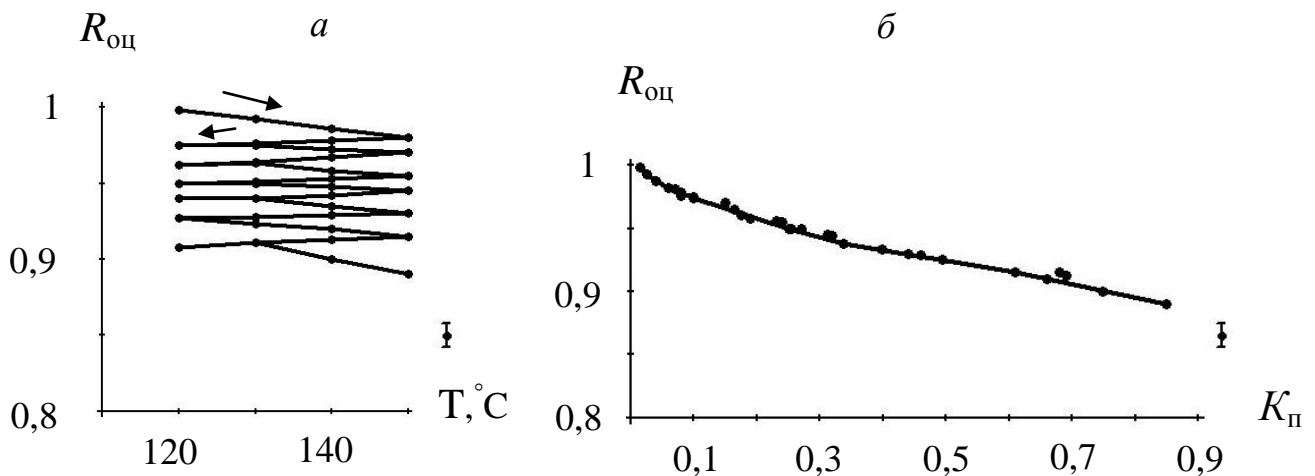


Рисунок 3.24 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МС-20 от температуры испытания (а) и коэффициента поглощения светового потока (б) при циклическом изменении температуры окисления от 120 до 150 °С и от 150 до 120 °С

Зависимость коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры  $R_{\text{оц}}$  от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 3.24, б) описывается регрессионным уравнением

$$R_{\text{оц}} = 0,10615 K_{\Pi}^2 - 0,19692 K_{\Pi} + 0,9954, \quad (3.18)$$

где значение коэффициента 0,10615 характеризует ускорение коэффициента сопротивления окислению; значение 0,19692 показывает скорость его замедления, а значение 0,9954 – потенциальная энергия товарного масла.

Коэффициент корреляции составил – 0,9873.

Противоизносные свойства масла МС-20, выраженные среднеарифметическим значением диаметра пятна износа (рисунок 3.25, *a*) в начале окисления повышаются по сравнению с товарным маслом (точка на ординате), а затем понижаются, но не превышают противоизносные свойства товарного масла, так как этому способствуют продукты окисления. В этой связи предложен критерий противоизносных свойств  $\Pi$ , определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  к параметру износа  $U$ , характеризующий условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, выраженной через среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах.

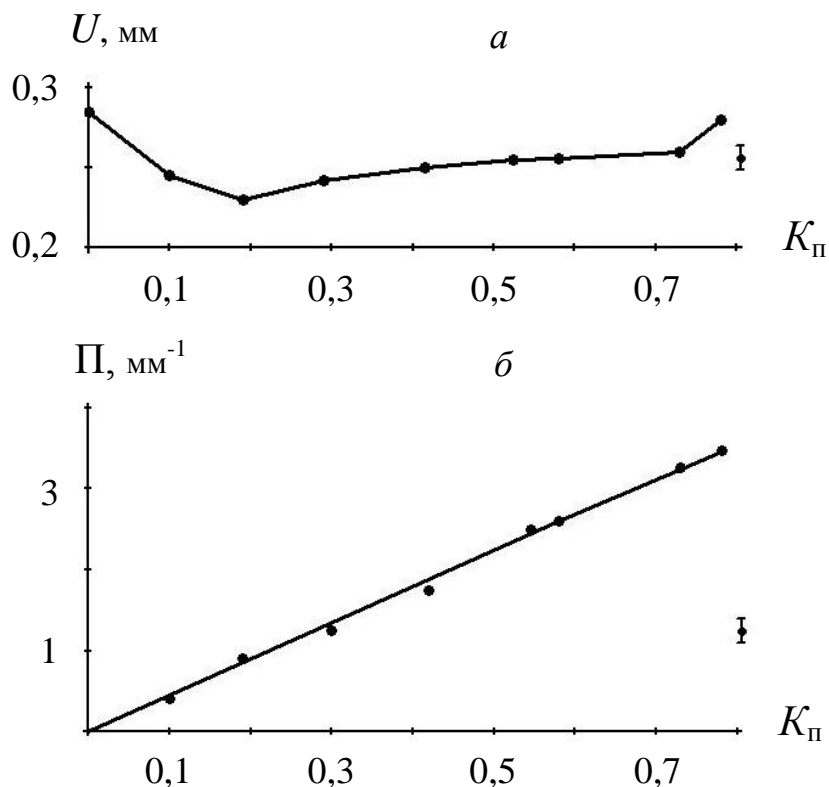


Рисунок 3.25 – Зависимости параметра износа  $U$  (*a*) и критерия противоизносных свойств  $\Pi$  (*б*) от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  при окислении минерального масла МС-20



Зависимость данного критерия от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 3.25, б) имеет линейный характер, и описывается регрессионным уравнением вида

$$\Pi = 4,386 \cdot K_{\Pi}. \quad (3.19)$$

Коэффициент – 4,386 характеризует скорость увеличения критерия противоизносных свойств при возрастании значения коэффициента поглощения светового потока.

Критерий противоизносных свойств можно выразить параметром износа через среднеарифметическое значение площади пятна износа  $S$ , определяемой как

$$S = \pi d^2, \quad (3.20)$$

где  $d$  – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа, измеренное на трех шарах.

Зависимости номинальной площади фрикционного контакта  $S$  и критерия противоизносных свойств  $\Pi_s$ , выраженного через площадь контакта, от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  представлены на рисунке 3.26. Показано (рисунок 3.26, а), что номинальная площадь фрикционного контакта уменьшается при увеличении коэффициента  $K_{\Pi}$  до значения 0,2 ед. Дальнейшее увеличение коэффициента  $K_{\Pi}$  вызывает колебание площади контакта из-за различий в соотношении первичных и вторичных (более энергоемких) продуктов окисления.

Зависимость критерия противоизносных свойств  $\Pi_s$ , выраженного через площадь фрикционного контакта, от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  (рисунок 3.26, б) описывается линейным регрессионным уравнением

$$\Pi_s = 22,222 K_{\Pi} \frac{1}{\text{мм}^2}, \quad (3.21)$$

где значение коэффициента – 22,222, характеризует скорость увеличения критерия  $\Pi_s$  при возрастании коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$ .

Однако линейность зависимости  $\Pi_s = f(K_{\Pi})$  сохраняется с увеличением коэффициента поглощения светового потока до значения равного – 0,3 ед. Дальнейшее увеличение коэффициента  $K_{\Pi}$  вызывает колебание критерия  $\Pi_s$ .

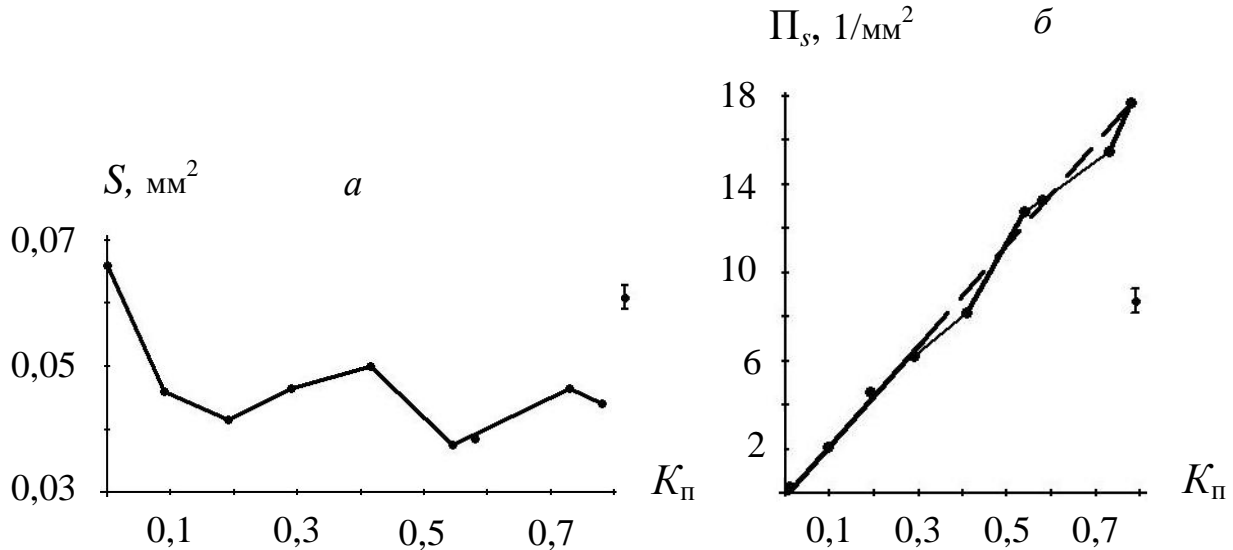


Рисунок 3.26 – Зависимости среднеарифметической номинальной площади пятна износа (а) и критерия противоположных свойств (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении минерального трансмиссионного масла МС-20 (срок хранения 10 лет)

Механохимические процессы, протекающие на фрикционном контакте оценивались коэффициентом электропроводности и временем его формирования, определяемые из диаграмм записи тока (рисунок 3.27). Здесь выделены две области до и после изгиба зависимости  $K_{\Pi} = f(t)$ , (рисунок 3.15, а), что позволяет установить влияние продуктов окисления различной оптической плотности на коэффициент электропроводности фрикционного контакта и время его формирования. Установлено, что в первой области коэффициент электропроводности  $K_3$  до значения  $K_{\Pi} = 0,2$  ед. уменьшается, а при значениях  $K_{\Pi} > 0,2$  (до 0,4 ед.) он увеличивается.

В области 2, отделённой от области 1 штриховой линией, коэффициент  $K_3$  вначале уменьшается, а затем увеличивается, однако его значение находится в пределах значений коэффициента  $K_{\Pi}$  от 0,75 до 0,53 ед. Увеличение коэффициента

ента  $K_3$  вызвано повышением кислотности масла и уменьшением электрического сопротивления граничного слоя.

Время формирования номинальной площади фрикционного контакта  $t_{\text{фпк}}$  (рисунок 3.27, б) в первой области уменьшается, а во второй – после стабилизации при  $K_{\text{п}} > 0,7$  ед. увеличивается.

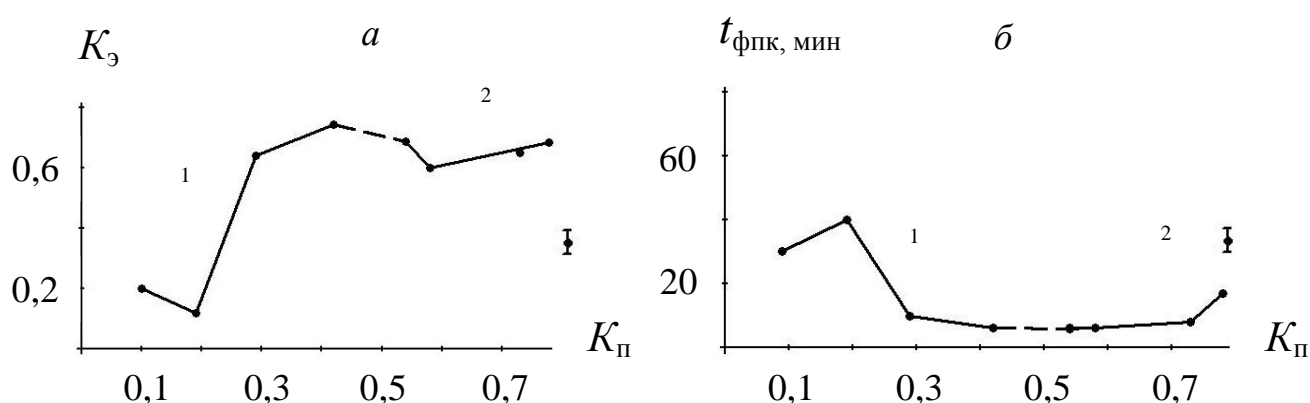


Рисунок 3.27 – Зависимости коэффициента электропроводности фрикционного контакта  $K_3$  (а) и времени его формирования  $t_{\text{фпк}}$  (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МС-20

Таким образом, при увеличении концентрации первичных продуктов окисления коэффициент электропроводности увеличивается за счет неудовлетворительных смазывающих свойств масла и поэтому время формирования фрикционного контакта уменьшается. Во второй области за счёт повышения кислотности масла коэффициент  $K_3$  приобретает значение от 0,6 до 0,7 ед, а время формирования фрикционного контакта не превышает 20 мин.

### 3.3 Результаты испытания минерального трансмиссионного масла МТ-8п

Трансмиссионные масла работают в режимах высших скоростей скольжения, давлений и широком диапазоне температур. Их пусковые свойства и длительная работоспособность должны обеспечиваться в интервале температур от  $-60$  до

+ 150 °С и контактных напряжениях выше 3 000 МПа [134]. Важнейшими свойствами трансмиссионных масел являются: смазывающая способность, вязкостно-температурная характеристика, термоокислительная стабильность, антикоррозионные и защитные свойства, а также стойкость к пенообразованию. Однако при эксплуатации трансмиссий масла подвергаются механической, термоокислительной и температурной деструкции. Эти процессы, в основном, протекают на поверхностях трения и определяют ресурс трансмиссионного масла и долговечность трибосопряжений. Поэтому исследование механизма изменения основных свойств масла в процессе эксплуатации трансмиссий является актуальной задачей.

Масло МТ-8п (ТУ 38.101277–85) [124] является моторно-трансмиссионным, селективной очистки, производится из восточных сернистых нефтей, содержит композицию противоизносных, антикоррозионных, антиокислительных и моющих присадок, депрессатор температуры застывания и антипенную добавку. Применяют масло как трансмиссионное в планетарных передачах гусеничных машин и в системах гидроуправления специальных машин. Кинематическая вязкость масла при 100 °С 8–9 мм<sup>2</sup>/с, индекс вязкости 90, температура вспышки в открытом тигле не ниже 180 °С, температура застывания, не выше –30 °С.

Методика испытания трансмиссионного масла описана в главе 2. По данной методике испытания проводились в два этапа, с целью определения термоокислительной стабильности, а затем противоизносных свойств окисленных проб масла на трехшариковой машине трения при значениях коэффициента поглощения светового потока равного приблизительно 0,1; 0,2...0,8 ед., что позволяло оценить влияние продуктов окисления на триботехнические параметры: диаметр пятна износа, коэффициент электропроводности фрикционного контакта и время его формирования.

На рисунке 3.28 представлены результаты испытания трансмиссионного масла МТ-8п на термоокислительную стабильность. Установлено, что масло выдержало 56 ч испытаний при температуре 150 °С. Причём коэффициент поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  составил – 0,86 ед., вязкость увеличилась на 39 %, испаряемость составила –12,3 г, а коэффициент термоокислительной стабильности –1,0 ед.

Зависимость коэффициента  $K_{\Pi} = f(t)$  (рисунок 3.28, *а*) имеет изгиб после 40 ч испытания, что вызвано образованием двух видов продуктов окисления различной оптической плотности. Начало образования второго вида продуктов окисления определяется продлением участка зависимости после точки изгиба до пересечения с осью абсцисс. Вязкость масла (рисунок 3.28, *б*) при окислении оценивалась коэффициентом относительной вязкости  $K_{\mu}$ , определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного. Данный коэффициент возрастает по линейной зависимости и после 56 ч испытания увеличился в 1,39 раза, т. е. на 39 % до предельно допустимого значения. Испаряемость масла (рисунок 3.28, *в*) за 56 ч испытания составила 13,3 г, а продление зависимости  $G = f(t)$  до пересечения с осью ординат определяет концентрацию лёгких фракций и воды.

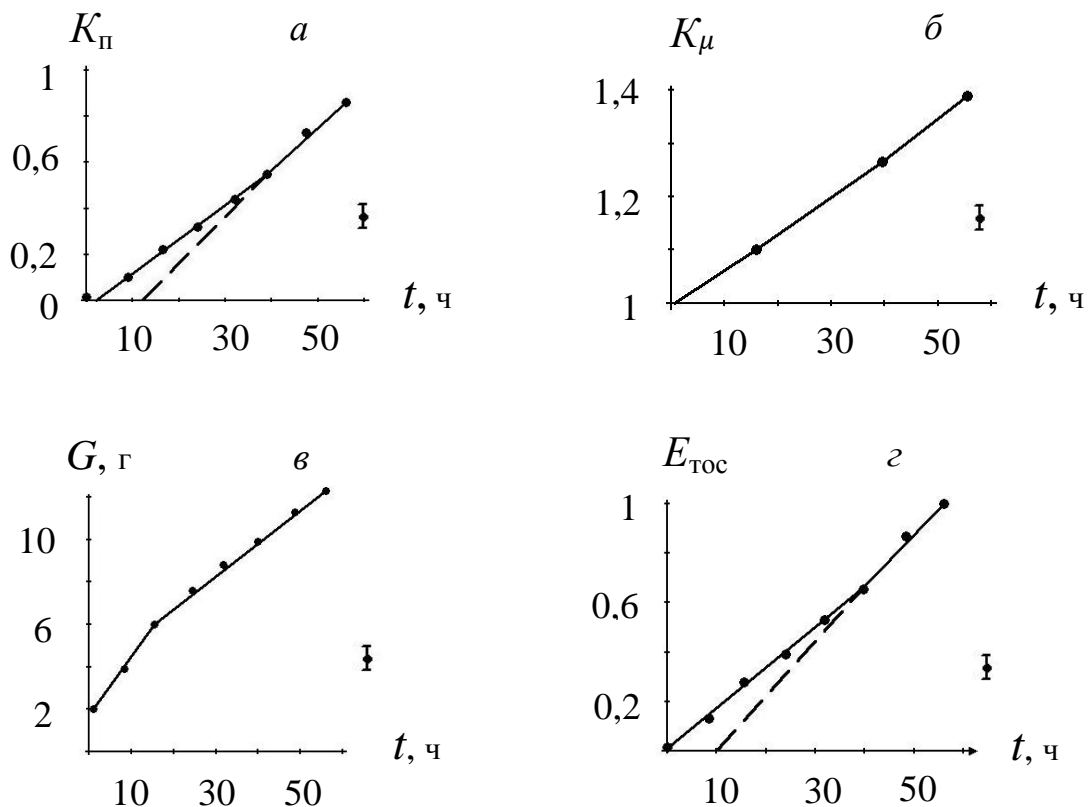


Рисунок 3.28 – Зависимости коэффициентов поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  (*а*), относительной вязкости  $K_{\mu}$  (*б*), испаряемости  $G$  (*в*) и коэффициента термоокислительной стабильности  $E_{\text{Тос}}$  (*г*) от времени окисления трансмиссионного масла МТ-8п

Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности  $E_{\text{ТОС}}$  (рисунок 3.28, з) имеет изгиб вследствие образования двух видов продуктов окисления и учитывает изменение как оптических свойств масла при окислении, так и его испаряемость, что позволяет сравнивать различные масла по этому показателю и выбирать наиболее стойкие к температурным воздействиям.

Динамику процессов окисления и испарения трансмиссионного масла предложено оценивать скоростями протекания этих процессов (рисунок 3.29). Установлено, что скорость окисления  $V_{K_{\Pi}}$  подвержена колебаниям, а скорость испарения в течение 32 ч уменьшается, затем стабилизируется на уровне 0,15 г/ч. Колебания скорости окисления объясняются перераспределением избыточной тепловой энергии за счёт процессов самоорганизации [57], протекающих в смазочном материале.

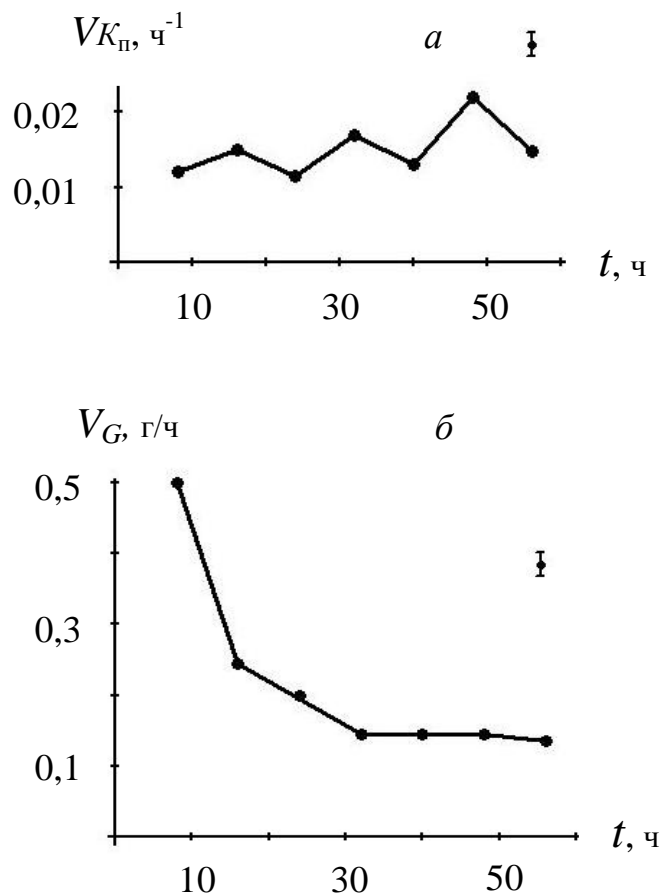


Рисунок 3.29 – Зависимости скоростей окисления  $V_{K_{\Pi}}$  (а) и испарения  $V_G$  (б) от времени испытания трансмиссионного масла МТ-8п при температуре 150 °С

Анализ зависимости  $K_{\Pi} = f(t)$  (рисунок 3.28, *a*) показывает, что до точки изгиба коэффициент  $K_{\Pi}$  увеличивается по линейной зависимости, однако после 12 ч испытания (штриховая линия) начинают образовываться продукты второго вида, требующие дополнительной тепловой энергии, поэтому в этот период скорость окисления замедляется, так как первичные продукты окисления переходят в другое более энергоёмкое состояние. Однако этот процесс протекает, если концентрация первичных продуктов окисления достигла определённого значения. Переход первичных продуктов в более энергоёмкое состояние вызывает понижение их концентрации, поэтому процесс образования энергоёмких продуктов замедляется, а скорость образования их увеличивается, что и вызывает колебания скорости окисления. На эти процессы оказывает влияние испарение масла за счёт поглощения части тепловой энергии. Интенсивность процессов самоорганизации предложено оценивать коэффициентом  $K_c$  (рисунок 3.30), определяемым отношением скорости окисления к скорости испарения. Показано, что коэффициент  $K_c$  со временем окисления также подвержен колебаниям с общей тенденцией увеличения, т. е. окислительные процессы преобладают над процессами испарения.

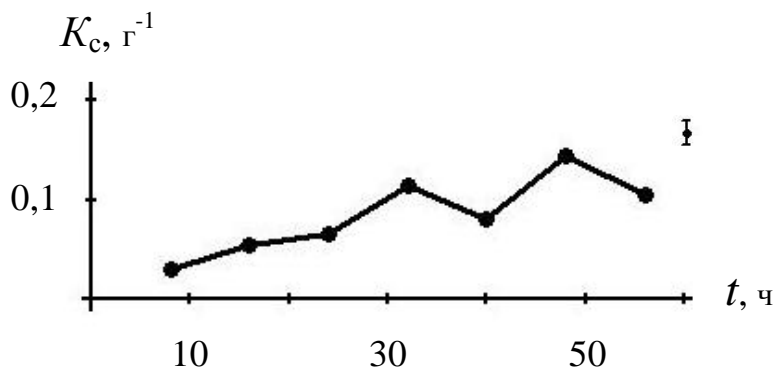


Рисунок 3.30 – Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации  $K_c$  от времени окисления трансмиссионного масла МТ-8п

При циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С масло МТ-8п выдержало три неполных цикла повышения температуры от 120 до 150 °С и два цикла понижения от 150 до 120 °С (рисунок 3.31, *a*).

Показано, (рисунок 3.31, б), что увеличение коэффициента поглощения светового потока происходит при температурах 140 и 150 °С. Необходимо отметить, что в циклах понижения температуры испытания процессы окисления продолжают.

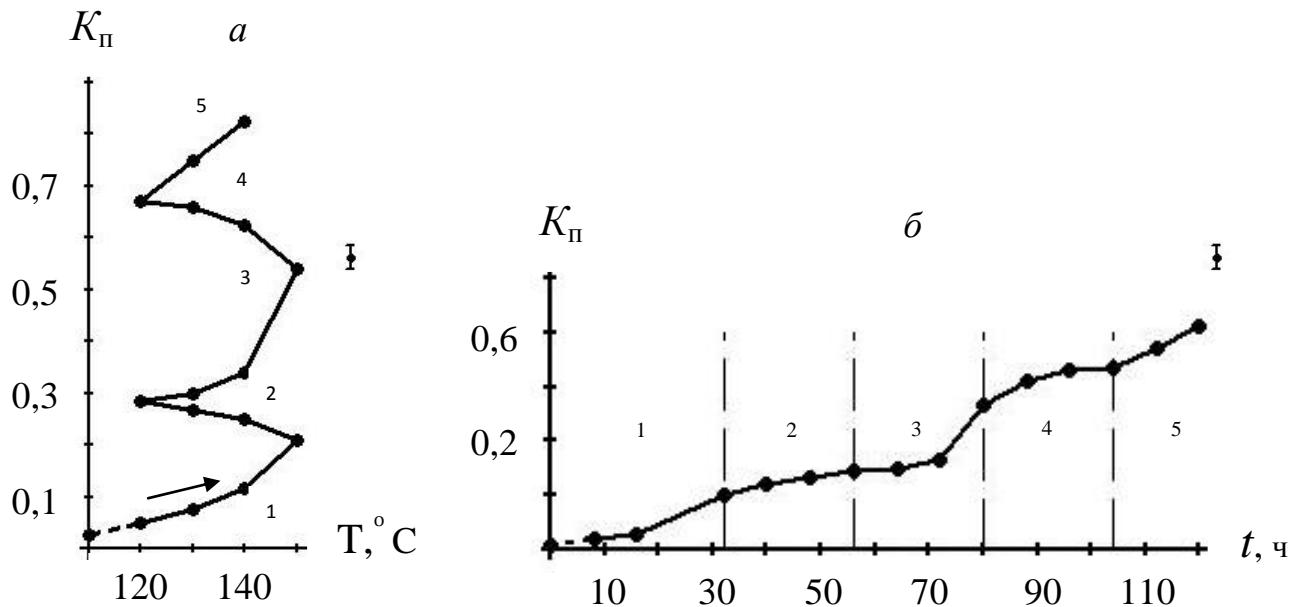


Рисунок 3.31 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{П}}$  от температуры (а) и времени испытания трансмиссионного масла МТ-8п: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры от 120 до 150 °С; 2, 4 – циклы понижения температуры от 150 до 120 °С

Испаряемость масла (рисунок 3.32) в основном, увеличивается в циклах повышения температуры и за 120 ч испытания составила 12,3 г, причём в первом цикле повышения температуры от 120 до 150 °С она составила 6,8 г (за 32 ч), т. е. половину того, что испарилось за остальных 88 ч испытания. Это объясняется наличием в масле лёгких фракций и воды. Для определения температур начала окислительных процессов и испарения построены зависимости скоростей окисления и испарения.

На рисунке 3.33, а и б представлены зависимости скорости окисления и испарения от времени окисления при циклическом изменении температуры термостатирования масла МТ-8п. Показано, что скорость окисления в циклах повышения



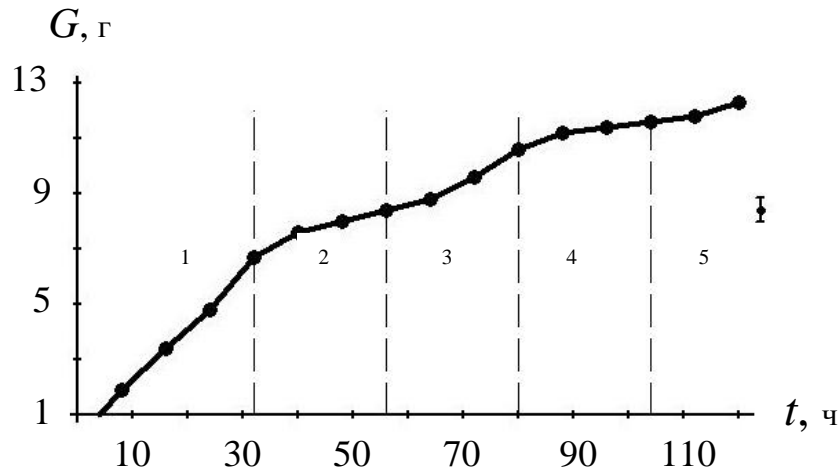


Рисунок 3.32 – Зависимость испарения масла МТ-8п от времени окисления при циклическом изменении температуры: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры; 2, 4 – циклы понижения температуры окисления

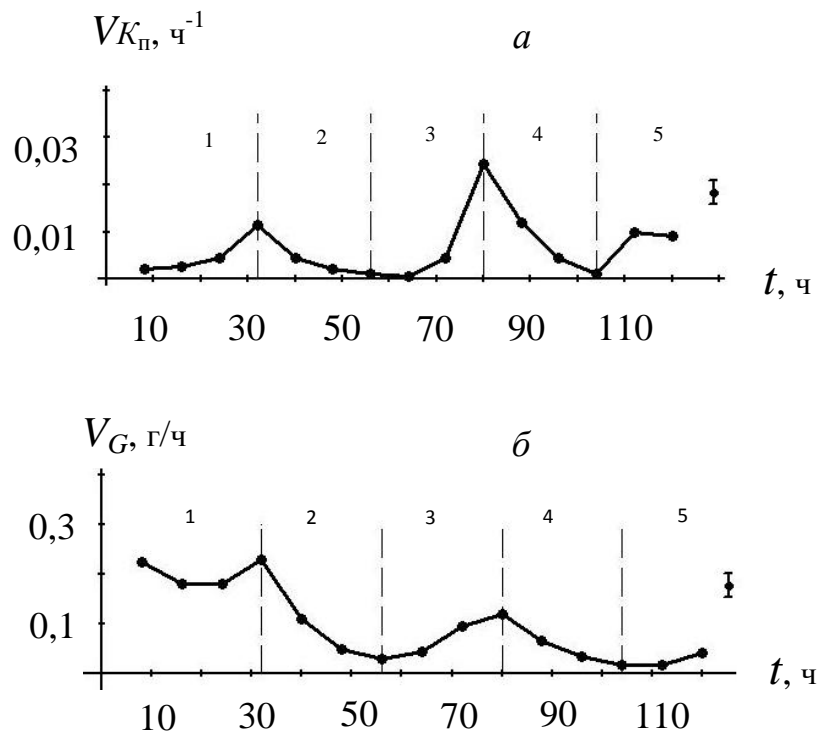


Рисунок 3.33 – Зависимости скоростей окисления (а) и испаряемости (б) от времени окисления трансмиссионного масла МТ-8п при циклическом изменении температуры: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры; 2, 4 – циклы понижения температуры окисления

температуры (1, 3 и 5) значительно увеличивается при температуре 150 °С, причём в 3-м цикле повышения температуры скорость окислительных процессов

превышает скорость окисления в 1-м цикле за счёт образования более энергоёмких продуктов с бóльшей оптической плотностью. Исходя из полученных данных, максимальный ресурс работоспособности испытуемого масла будет получен при температуре начала окисления от 120 до 130 °С.

Скорость испарения трансмиссионного масла также зависит от температуры термостатирования и приобретает минимальные значения при температуре 120 °С. Так как процессы окисления и испарения протекают на поверхностях трения, то оптимальной температурой работоспособности данного масла является температура 120 °С, обеспечивающая максимальный ресурс.

Различия в скорости испарения масла (рисунок 3.33, б) в первом цикле повышения температуры термостатирования от 120 до 150 °С вызваны наличием в нём лёгких фракций и воды, поэтому скорость испарения при 120 °С выше, чем скорость испарения в 3-м цикле повышения температуры.

Коэффициент интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в масле МТ-8п (рисунок 3.34) при циклическом изменении температуры, превышает значения коэффициента в 1,3 – 2,66 раза в отличие от статической температуры испытания 150 °С (см.рисунок 3.30) в циклах 3 и 5 повышения температуры.

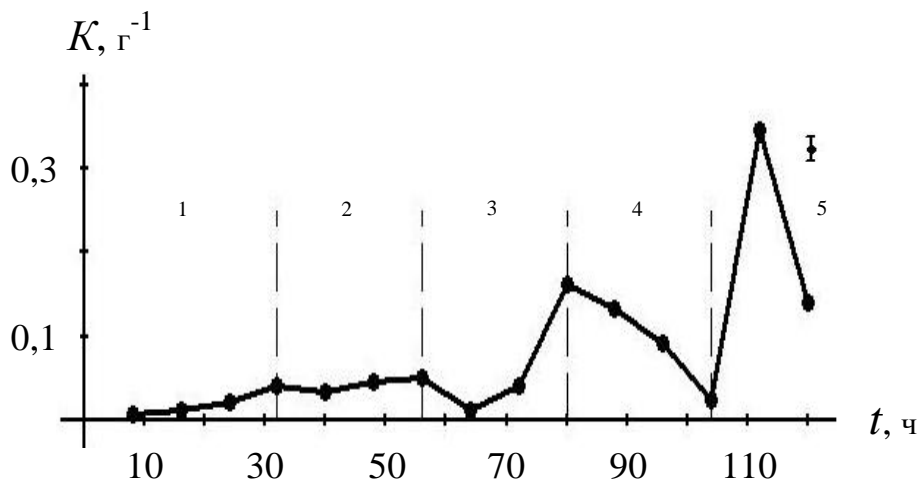


Рисунок 3.34 – Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в трансмиссионном масле МТ-8п от времени окисления при циклическом изменении температуры от 120 до 150 °С: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры; 2, 4 – циклы понижения температуры окисления

Это может объясняться автоокислением, т. е. в циклах 1 и 2 происходит активация молекул, которая в последующих циклах ускоряет окислительные процессы и замедляет испаряемость (см. рисунок 3.33, б).

В качестве второго критерия термоокислительной стабильности предложен коэффициент сопротивляемости окислению, рассчитываемый по формуле (3.6) и учитывающий оптические свойства и испаряемость масла при окислении. Зависимости коэффициента сопротивления окислению  $R_o$  от времени испытания и коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  представлены на рисунке 3.35. Данные зависимости описываются линейными уравнениями, а регрессионные уравнения имеют вид для:

времени испытания:

$$R_o = -0,002t + 0,984. \quad (3.22)$$

коэффициента поглощения светового потока:

$$R_o = -0,1326K_{\Pi} + 0,984. \quad (3.23)$$

Коэффициент корреляции составил  $-0,9924$ .

Свободные члены уравнений указывают на величину сопротивляемости товарного масла температурным воздействиям, которое хранилось 12 лет.

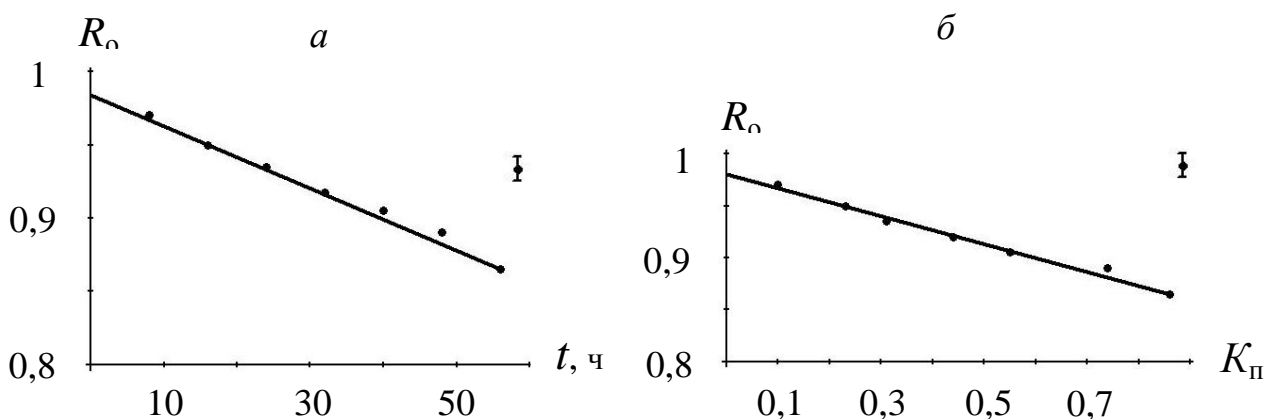


Рисунок 3.35 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МТ-8п от времени (а) и коэффициента поглощения светового потока (б)

Зависимости коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры испарения в диапазоне от 120 до 150 °С представлены на рисунке 3.36. Согласно представленным данным сопротивляемость масла значительно понижается при температуре 150 °С (рисунок 3.36, *a*), т. е. эта температура для данного масла является высокой.

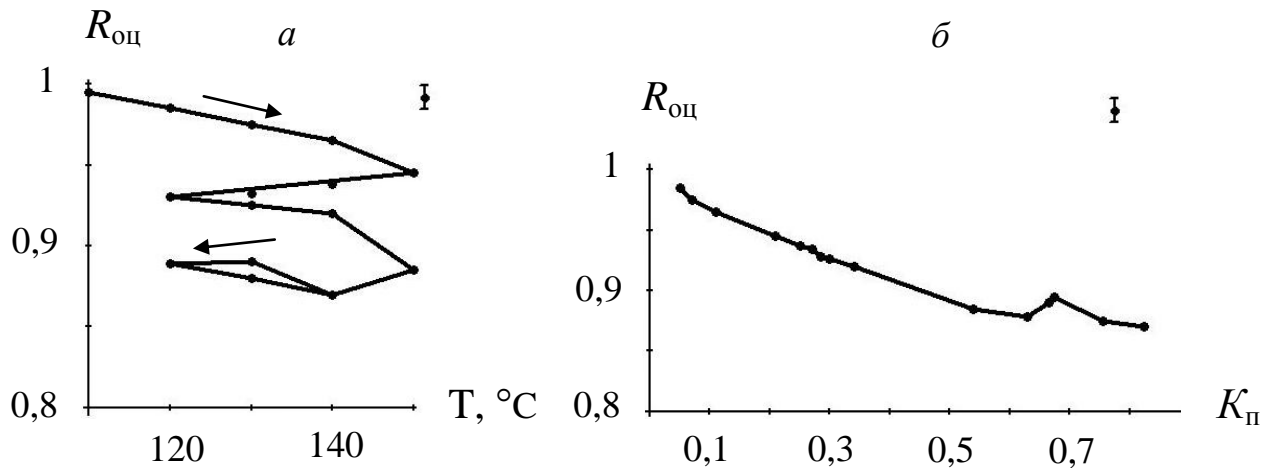


Рисунок 3.36 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МТ-8п от циклически изменяющейся температуры (*a*) и коэффициента поглощения светового потока (*б*)

Регрессионное уравнение зависимости  $R_{\text{оц}}$  от коэффициента поглощения светового потока при циклическом изменении температуры испытания имеет вид

$$R_{\text{оц}} = 0,2095 K_{\text{л}}^2 - 0,3172 K_{\text{л}} + 0,984, \quad (3.24)$$

где значения коэффициентов характеризуют: 0,3172 – скорость понижения коэффициента сопротивления окислению; 0,2095 – ускорение понижения коэффициента  $R_{\text{оц}}$ ; 0,984 – сопротивление исходного масла.

Коэффициент корреляции составил – 0,9885.

Противоизносные свойства трансмиссионного масла МТ-8п представлены зависимостью диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 3.37, *a*). Показано, что противоизносные свойства в начале окисления понижаются по отношению к товарному маслу (штриховая линия), а затем

повышаются и при  $K_{\Pi} = 0,3$  ед. становятся одинаковыми с товарным маслом. Дальнейшее окисление масла вызывает повышение противоизносных свойств. Противоизносные свойства окисленного масла предложено оценивать критерием  $\Pi$  (рис.3.37, б) по формуле:

$$\Pi = K_{\Pi}/U, \quad (3.25)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $U$  – параметр износа (среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трёх шарах),  $\text{мм}^{-1}$ .

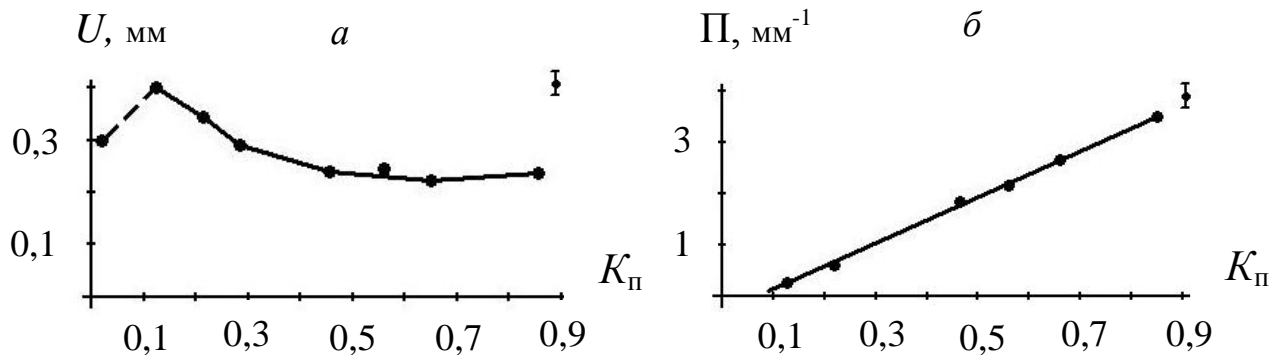


Рисунок 3.37 – Зависимости диаметра пятна износа (а) и критерия противоизносных свойств (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МТ-8п

Как видно из представленных данных, критерий противоизносных свойств увеличивается с ростом концентрации продуктов окисления.

Регрессионное уравнение зависимости  $\Pi = f(K_{\Pi})$  имеет вид

$$\Pi = 4,487(K_{\Pi} - 0,07), \quad (3.26)$$

где значение коэффициента 4,487 характеризует скорость увеличения критерия  $\Pi$  при возрастании концентрации продуктов окисления; значение коэффициента 0,07, характеризует начальные оптические свойства испытуемого смазочного масла.

Необходимо отметить, что противоположные свойства окисленного масла тем выше, чем больше значение критерия  $\Pi$  при одинаковом значении коэффициента поглощения светового потока.

Зависимости среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта на трех шарах и критерия противоположных свойств  $\Pi_s$ , вычисленного с применением площади контакта, от коэффициента поглощения светового потока представлены на рисунке 3.38, *а*.

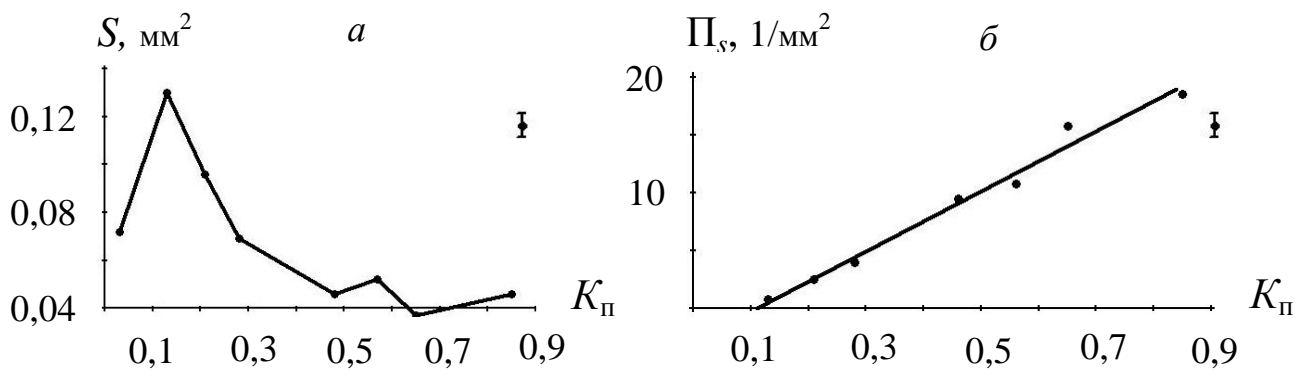


Рисунок 3.38 – Зависимости суммарного среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта (*а*) и критерия противоположных свойств (*б*) от коэффициента поглощения светового потока при окислении минерального трансмиссионного масла МТ-8п

При увеличении концентрации продуктов окисления трансмиссионного масла МТ-8п в начале процесса при  $K_{\Pi} < 0,13$  ед. площадь контакта увеличивается по отношению к товарному маслу. Это вызвано тем, что на поверхностях трения не образуется защитная граничная пленка, способная их разделить. При увеличении концентрации продуктов окисления ( $K_{\Pi} > 0,13$  ед.) номинальная площадь фрикционного контакта уменьшается, т. е. увеличивается несущая способность граничного слоя окисленного масла.

Зависимость критерия противоположных свойств, выраженного через площадь фрикционного контакта  $\Pi_s$ , от коэффициента поглощения светового потока

представлена на рисунке 3.38, б. Данная зависимость описывается линейным уравнением, а регрессионное уравнение имеет вид

$$P_s = 26,09(K_{\text{п}} - 0,11), \quad (3.27)$$

где значение коэффициента 26,09 характеризует скорость увеличения критерия  $P_s$  ( $1/\text{мм}^2$ ) при увеличении концентрации продуктов окисления; значение коэффициента 0,11 показывает начальные оптические свойства испытуемого масла.

Сравнив данные критериев противоизносных свойств по среднеарифметическим значениям диаметра пятна износа и номинальной площади фрикционного контакта, видим, что их можно использовать для оценки противоизносных свойств масел, подверженных окислению.

Противоизносные свойства трансмиссионного масла зависят не только от смазывающих свойств, но и износостойкости материалов пар трения, поэтому свойства материалов пар трения выбраны постоянными. Однако применение схемы трения «шар – цилиндр» позволяет определить продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций. Для этого через одну из пар трения пропускался постоянный ток, записываемый в виде диаграммы [141]. При пластической деформации величина тока равна заданному (100 МкА), так как происходит металлический контакт микронеровностей (см. рисунок 3.10). При увеличении площади контакта давление уменьшается и пластические деформации переходят в упругопластические. При этом ток уменьшается до определённой стабилизированной величины. Время уменьшения тока до этой величины определяет время формирования защитных граничных слоёв. Этот параметр характеризует склонность смазочного материала формировать на поверхностях трения защитные граничные слои и чем оно меньше, тем ниже противоизносные свойства исследуемого масла.

Упругие деформации характеризуются колебанием тока возле определённой величины, а их интенсивность определяется скоростью формирования и разрушения защитных граничных слоёв рисунок (3.39).

Установлено, что данная зависимость имеет два характерных участка получаемых при увеличении коэффициента  $K_{\Pi}$ , т. е. время формирования защитных граничных слоёв зависит от степени окисления масла и поэтому может характеризовать свойства этих слоёв. Начальный участок зависимости (до штриховой линии) определяет формирование адсорбционных слоёв, а второй – хемосорбционных. Хемосорбционные слои образуются при определённой концентрации кислых продуктов окисления (при  $K_{\Pi} = 0,4...0,45$  ед.). Показано (рисунок 3.39), что при переходе от адсорбционных слоёв к хемосорбционным резко уменьшается время формирования защитных граничных слоёв.

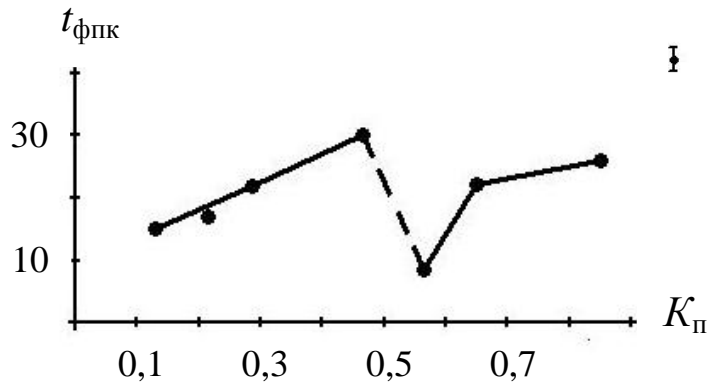


Рисунок 3.39 – Зависимость времени формирования защитных граничных слоёв на поверхностях трения от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МТ-8п

Противоположная картина наблюдается при изменении коэффициента электропроводности фрикционного контакта  $K_{\Sigma}$  (рисунок 3.40) от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$ .

В областях формирования адсорбционных (участок 1) и хемосорбционных (участок 2) слоёв коэффициент  $K_{\Sigma}$  уменьшается, однако при переходе из одной области в другую наблюдается его резкое увеличение. Уменьшение коэффициента  $K_{\Sigma}$  в области адсорбционных слоёв связано с уменьшением давления в контакте за счёт увеличения площади, а уменьшение коэффициента  $K_{\Sigma}$  в области хемосорбционных слоёв связано с плотностью покрытия площади контакта сорб-



ционной плёнкой, увеличивающей сопротивление фрикционного контакта, при увеличении кислотности масла и образования продуктов окисления второго вида, вызывающих изгиб зависимости  $K_{\Pi} = f(t)$  (см. рисунок 3.28, а).

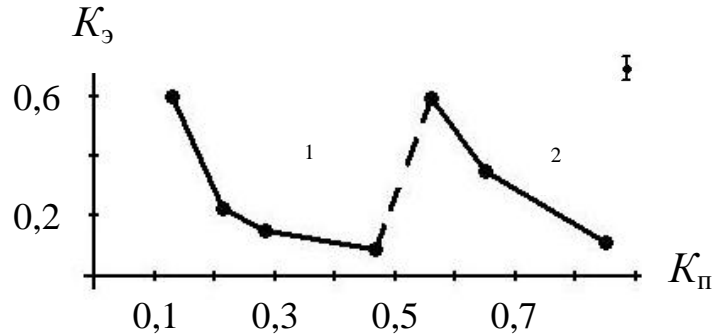


Рисунок 3.40 – Зависимость коэффициента электропроводности фрикционного контакта  $K_{э}$  от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  при окислении трансмиссионного масла МТ-8п: 1 – область формирования адсорбционных слоёв; 2 – область формирования хемосорбционных слоёв

### 3.4 Анализ результатов контроля минеральных трансмиссионных масел

Целью настоящих исследований является обоснование выбора дополнительных показателей термоокислительной стабильности и противоизносных свойств трансмиссионных масел, позволяющих еще на стадии проектирования технологического оборудования осуществлять их выбор необходимый для температурных условий эксплуатации, а на стадии эксплуатации осуществлять контроль за их состоянием. В таблице 3.1 приведены основные показатели, использование которых позволяет сравнивать различные масла и определять их температурную область работоспособности. Представленные данные получены при температуре испытания 150 °С, а противоизносные свойства – при постоянных параметрах трения: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; время испытания – 2 ч.

Аналізу результатов испытаний подвергались трансмиссионные минеральные масла ТСзп-8, МС-20 и МТ-8п.

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные испытания минеральных трансмиссионных масел

Показатель масла	Марка масла		
	ТСзп-8	МС-20	МТ-8п
Потенциальный ресурс при температуре 150 °С и коэффициенте $K_{\Pi} = 0,8$ ед., ч	45,0	144,0	53,0
Потенциальный ресурс при циклическом изменении температуры окисления и коэффициенте $K_{\Pi} = 0,8$ ед., ч	128,0	316,0	117,0
Количество циклов изменения температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С	5	13	5
Коэффициент относительной кинематической вязкости в конце испытания, мм <sup>2</sup> /с	1,2	1,32	1,39
Испаряемость после 40 ч испытания, г	19,1	4,3	10,0
Критерий термоокислительной стабильности после 40 ч испытания	0,909	0,212	0,664
Критерий противоизносных свойств $\Pi$ при коэффициенте $K_{\Pi} = 0,8$ ед.(диаметр пятна износа)	1,6	3,51	3,28
Критерий противоизносных свойств $\Pi_s$ при коэффициенте $K_{\Pi} = 0,8$ ед.(площадь контакта)	4,47	17,78	18,0
Коэффициент сопротивляемости окислению при статической температуре 150 °С после 40 ч испытания	0,825	0,965	0,907
Коэффициент сопротивляемости окислению при циклической температуре от 120 до 150 °С после 120 ч испытания	0,787	0,961	0,88

Анализ полученных результатов показал, что наибольший потенциальный ресурс при статической температуре испытания 150 °С, определяемый временем достижения коэффициента поглощения светового потока значения равного 0.8 (рисунок 3.41), установлен для масла МС-20 – 144 ч, а наименьший – 45 ч получен для масла ТСзп-8. Для увеличения потенциального ресурса масел ТСзп-8 и МТ-8п необходимо понижать температурную область их применения. Поэтому, согласно ГОСТ 17479.2–85, эти масла должны относиться к группе эксплуатационных свойств ТМ-2-9, применяющихся в температурном диапазоне масла в объеме до 130 °С. Трансмиссионное масло МС-20 относится к группе эксплуатационных свойств ТМ-5-18 и может применяться в температурном диапазоне до 150 °С.

Наибольший потенциальный ресурс при циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С определялся по времени достижения значения коэффициента поглощения светового потока равного 0.8 ед

(рисунок 3.42) и установлен для масла МС-20 – 316ч, а наименьший – для масла МТ-8п –117ч. Масло МТ-8п показало худшие результаты при циклическом изменении температуры испытания, чем при статической температуре 150 °С.

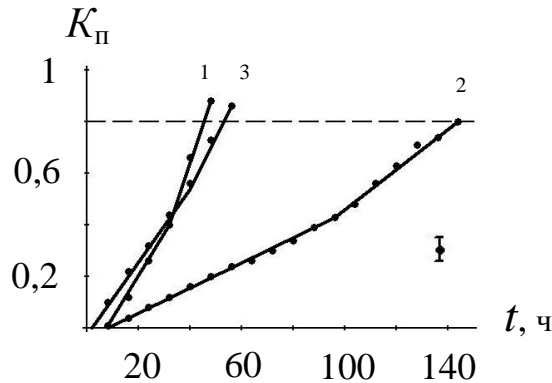


Рисунок 3.41 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п при статической температуре 150 °С

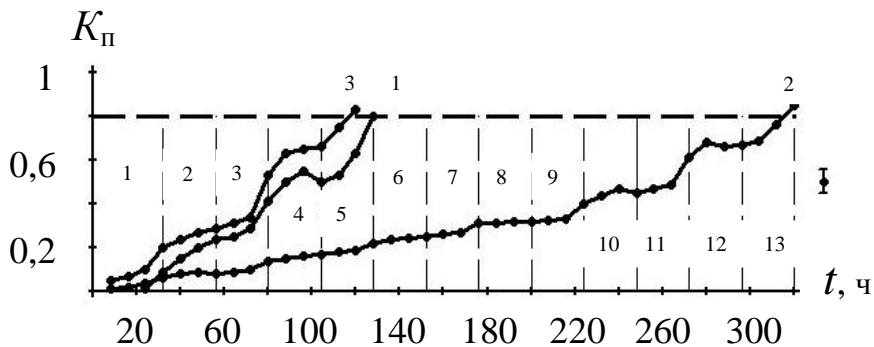


Рисунок 3.42 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления трансмиссионных масел при циклическом изменении температуры в диапазоне от 120 до 150 °С: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Одним из важных эксплуатационных показателей трансмиссионных масел является кинематическая вязкость, особенно ее изменение при окислении. Для оценки изменения вязкости в процессе окисления масла принят коэффициент относительной вязкости, определяемый отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного. На рисунке 3.43 представлены зависимости коэффициента относительной вязкости от времени окисления трансмиссионных масел. Согласно

данным, зависимости коэффициента относительной вязкости для масел ТСзп-8 и МТ-8п описываются линейными уравнениями (рисунок 3.43 кривые 1 и 3); для масла МС-20 в начале окисления вязкость падает, а после 24 часов испытания она увеличивается. Полученные данные позволяют проектировщикам техники давать обоснованные рекомендации по выбору масел с более стабильной вязкостью при окислении и информацию о ее изменении в процессе эксплуатации.

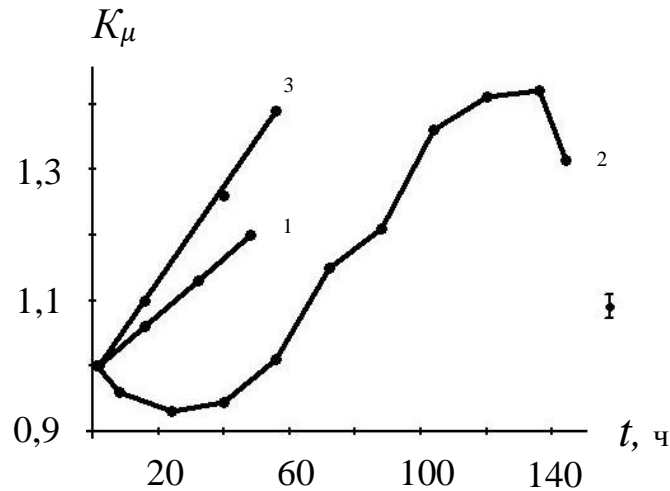


Рисунок 3.43 – Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Как эксплуатационный показатель испаряемость трансмиссионных масел имеет важное значение при граничном трении скольжения, так как может вызвать разрыв масляной пленки, разделяющей поверхности трения, и активизировать схватывание. Информация об испаряемости масел необходима для определения температурной области работоспособности трансмиссий и при назначении группы их эксплуатационных свойств.

Рассмотрим зависимости испаряемости исследованных трансмиссионных масел от времени окисления (рисунок 3.44). Установлено, что наименьшей испаряемостью характеризуется масло МС-20, а наибольшей – масло ТСзп-8 (кривая 1). В таблице 3.1 приведены данные об испаряемости масел после 40 ч испытаний. Кроме того, точки на ординате зависимостей  $G = f(t)$  показывают

концентрацию в маслах легких фракций и воды, которые составляют для масел ТСзп-8 и МТ-8п – 2 г, а для масла МС-20 – 1 г.

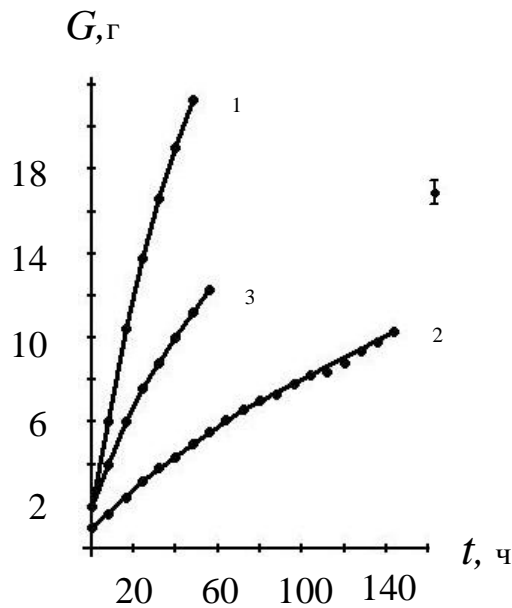


Рисунок 3.44 – Зависимости испаряемости трансмиссионных масел от времени окисления при температуре 150 °С: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Критерий термоокислительной стабильности характеризует сопротивляемость трансмиссионных масел окислению и испарению, поэтому эти данные позволяют не только определять температурную область их работоспособности, но и потенциальный ресурс и поведение масел в условиях эксплуатации. Из представленных данных на рисунке 3.45 видим, что наиболее термостойким является масло МС-20 (кривая 2), а наименее термостойким – масло ТСзп-8. Температура окисления 150 °С для масел ТСзп-8 и МТ-8п является высокой. Предельной температурой их работоспособности является температура 130 °С, а их классификация по группам эксплуатационных свойств по ГОСТ 17479.2–85 соответствует группе ТМ-2.

Используя зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления, можно установить потенциальный ресурс, определяемый временем достижения, например, значения коэффициента  $E_{\text{ТОС}}$  равного – 0,8 ед.

Это позволяет количественно определить потенциальный ресурс, который составил для масел: ТСзп-8 – 38 ч; МС-20 – 130 ч; МТ-8п – 47 ч.

В таблице 3.1 приведены данные по значению термоокислительной стабильности исследованных масел после 40 ч испытания, которые составили для масел: ТСзп-8 – 0,9 ед; МС-20 – 0,212 ед; МТ-8п – 0,664 ед.

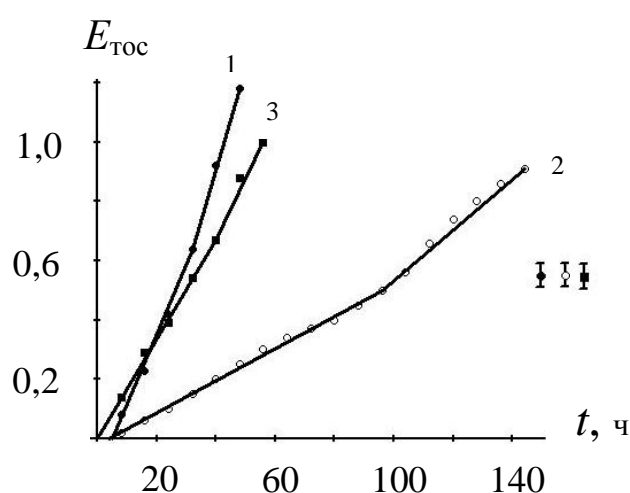


Рисунок 3.45 — Зависимости критерия термоокислительной стабильности от времени окисления трансмиссионных масел: 1 — ТСзп-8; 2 — МС-20; 3 — МТ-8п

Основным показателем, влияющим на долговечность трибосопряжений трансмиссий являются противоизносные свойства масел в процессе окисления. Противоизносные свойства окисленных трансмиссионных масел оценивались по критериям, определяемым отношениями коэффициента поглощения светового потока к среднеарифметическому значению диаметра пятна износа  $\Pi$  на трех шарах (рисунок 3.46) и среднеарифметическому значению номинальной площади фрикционного контакта  $\Pi_s$  (рисунок 3.47).

Согласно данным (рисунок 3.46), зависимости критерия противоизносных свойств описываются линейными уравнениями. Из числа исследованных масел наивысшими противоизносными свойствами характеризуются масла МС-20 (кривая 2) и МТ-8п (кривая 3). Аналогичная картина наблюдается при использовании вместо диаметра пятна износа площади фрикционного контакта (рисунок 3.47).

Из представленных данных видим, что для определения критерия противоизносных свойств можно пользоваться как среднеарифметическим значением диаметра пятна износа, так и площадью фрикционного контакта.

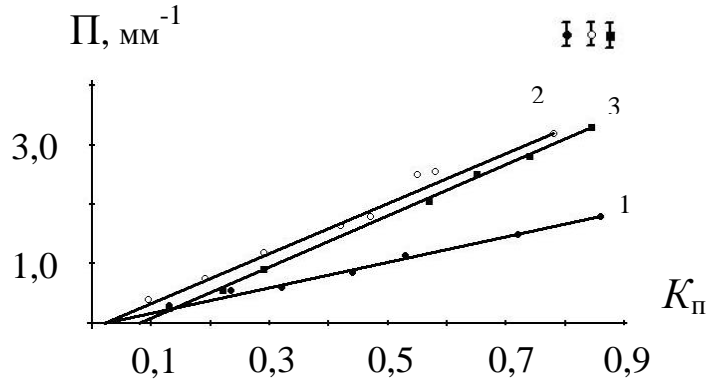


Рисунок 3.46 – Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – ТСЗп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п.

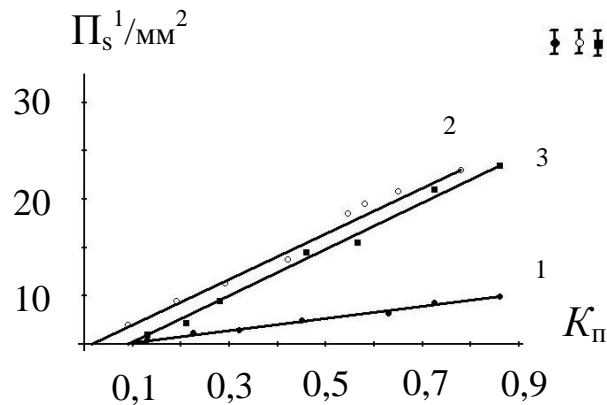


Рисунок 3.47 – Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел (по площади фрикционного контакта): 1 – ТСЗп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Применение в качестве второго критерия термоокислительной стабильности трансмиссионных масел коэффициента сопротивляемости окислению учитывающего изменение оптических свойств и испаряемости при статической (рисунок 3.48) и циклически изменяющихся температурах (рисунок 3.49), позволяет в динамике рассмотреть изменение сопротивляемости масел в процессе окисления.

Зависимости коэффициента сопротивляемости трансмиссионных масел от времени окисления при статической температуре  $150^{\circ}\text{C}$  представлены на рисунке 3.48. Установлено, что для всех исследованных масел данные зависимости описываются линейными уравнениями. Причем для масла ТСЗп-8 (кривая 1) зависимость начинается с ординаты 1,02 ед, масла МС-20 (кривая 2) – 0,995 ед. и масла МТ-8п (кривая 3) – 0,98 ед. Это связано с начальным состоянием смазочного масла, так масло ТСЗп-8 перед испытаниями имело значение коэффициента поглощения светового потока равное 0, масло МС-20 – 0,013 ед, а масло МТ-8п – 0,027 ед., т. е. последние два масла израсходовали часть потенциальной энергии на окисление, а масло ТСЗп-8 имело запас энергии, поэтому его сопротивляемость выше единицы. Согласно полученным данным наибольшим сопротивлением окислению характеризуется масло МС-20 (кривая 2), а наименьшим – масло ТСЗп-8.

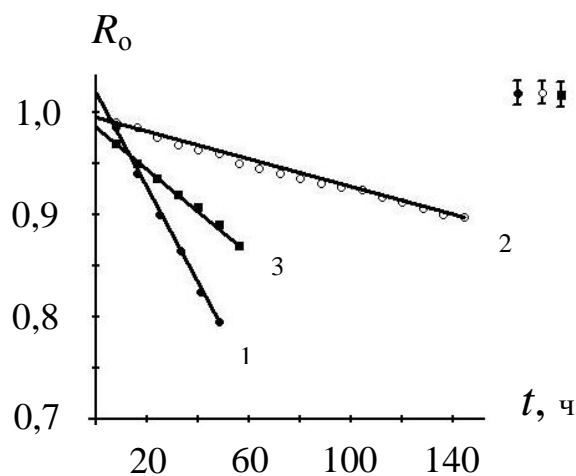


Рисунок 3.48 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению при статической температуре  $150^{\circ}\text{C}$  от времени испытания трансмиссионных масел: 1 – ТСЗп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

По скорости падения сопротивления окислению можно классифицировать масла по группам эксплуатационных свойств. Чем меньше скорость падения сопротивления окислению, тем выше группа эксплуатационных свойств и шире температурная область работоспособности масла.



Зависимости коэффициента сопротивления окислению от времени окисления при циклически изменяющейся температуре испытания (рисунок 3.49) показывают, как изменяется коэффициент сопротивления окислению в циклах повышения и понижения температуры. Например, для масла МС-20 (кривая 2) независимо от циклов изменения температуры сопротивляемость масла плавно понижается. Для масла ТСзп-8 (кривая 1) независимо от циклов изменения температуры наблюдается постоянное снижение коэффициента сопротивления окислению, а для масла МТ-8п (кривая 3) в циклах понижения температуры испытания скорость уменьшения коэффициента сопротивления окислению замедляется. Поэтому, масло, при испытании которого сопротивляемость окислению стабилизируется в циклах понижения температуры может, работать при более высоких температурах по сравнению с маслом ТСзп-8, где сопротивляемость независимо от циклов изменения температуры испытания уменьшается (кривая 1).

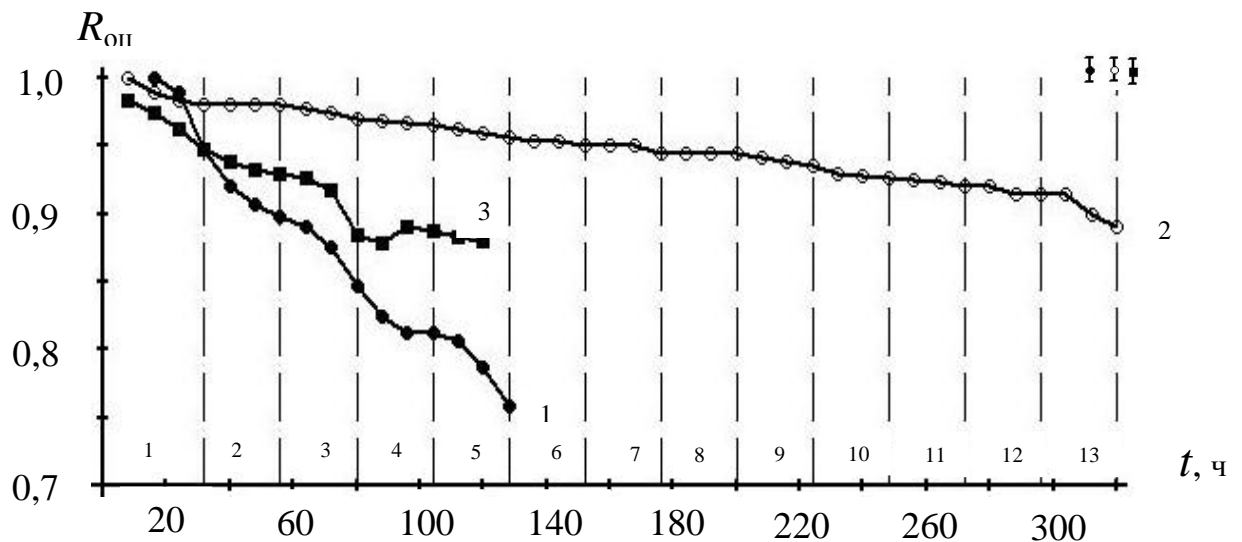


Рисунок 3.49 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры от времени окисления минеральных трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п; нечетные цифры – циклы повышения температуры от 120 до 150 °С; четные – циклы понижения температуры от 150 до 120 °С

Таким образом, предоставление дополнительных данных, приведенных в таблице 3.1, позволяет конструкторам и технологам обоснованно выбирать масла

в соответствии с температурными и нагрузочными характеристиками проектируемой техники и обеспечить максимальный ресурс трансмиссионных масел и долговечность трибосистем.

### **3.5 Результаты испытания трансмиссионных масел различной базовой основы**

Для оценки влияния базовой основы трансмиссионных масел на процессы окисления и противоизносные свойства выбраны масла одного производителя: минеральное BIZOL 80W-90 GL4; частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4;GL5 и синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5. Данные масла являются всесезонными. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе масла испытывались при температуре 150 °С с перемешиванием пробы мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. Проба масла составляла  $100 \pm 0,1$  г. После каждых 8 ч испытания проба термостатированного масла взвешивалась, определялась масса испарившегося масла, измерялась оптическая плотность по коэффициенту поглощения светового потока и кинетическая вязкость при 100 °С. После измерения параметров проба масла повторно взвешивалась, а испытания продолжались до достижения значения коэффициента поглощения светового потока 0,7...0,8 ед.

Второй этап испытания выполнялся по той же технологии, но при достижении значений коэффициента поглощения светового потока, равных приблизительно 0,1; 0,2...0,8 ед., дополнительно отбиралась проба термостатированного масла для испытания на трехшариковой машине трения, а проба масла доливалась до первоначального значения ( $100 \pm 0,1$  г).

Параметры трения составляли: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; время испытания 2 ч.

Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания трансмиссионных масел различной базовой основы приведены на рисунке 3.50: для минерального (кривая 1) и частично синтетического (кривая 2) трансмиссионных масел установлено два вида продуктов окисления с различной

оптической плотностью, вызывающих изгиб зависимостей  $K_{\Pi} = f(t)$ , причем время образования вторичных продуктов определяется продлением зависимости после точки изгиба до пересечения с осью абсцисс; для минерального масла оно составляет 18 ч, а частично синтетического – 9 ч. Кроме того, для минерального масла существует период времени (6 ч), при котором процессы окисления практически не происходят. Следовательно можно предположить, что исходным продуктом для образования вторичных продуктов являются первичные продукты окисления.

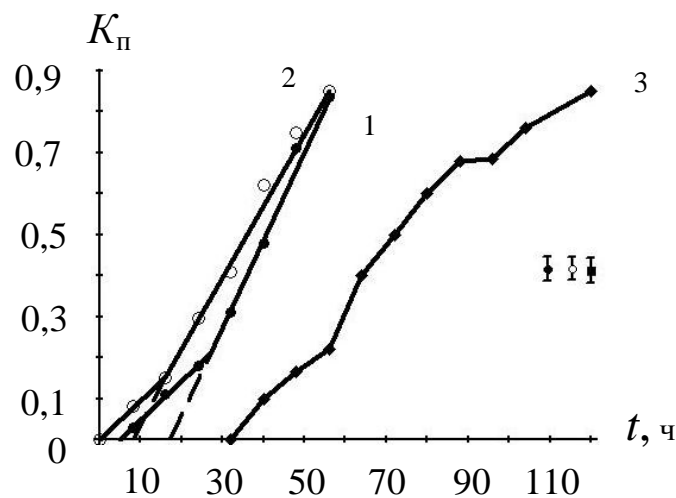


Рисунок 3.50 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Представленные зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления описываются кусочно-линейными уравнениями для обоих участков:

$$K_{\Pi} = a(t - t_{\text{H}}), \quad (3.28)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий скорость образования первичных или вторичных продуктов окисления;  $t$  – время окисления, ч;  $t_{\text{H}}$  – время начала образования вторичных продуктов окисления, ч.

Для синтетического масла BIZOL HYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3) зависимость  $K_{\text{п}} = f(t)$  описывается полиномом второго порядка, а процесс окисления начинается после 30 ч испытания, то есть данное масло имеет область сопротивляемости окислению.

Согласно данным (рисунок 3.50) наивысшая термоокислительная стабильность установлена для синтетического масла (кривая 3), а наименьшая – для частично синтетического масла (кривая 2), поэтому потенциальный ресурс для данных масел может быть определен временем достижения коэффициента поглощения светового потока значения 0,8 ед. Данные по ресурсу приведены в виде гисто-граммы на рисунке 3.51, согласно которым наибольший ресурс установлен для синтетического масла BIZOL HYPOID 75W-90 GL5 – 104 ч, а для минерального и частично синтетического масел он в два раза ниже. Кроме того, по данному показателю классификация трансмиссионных масел по группам эксплуатационных свойств не соответствует для частично синтетического масла (GL4, GL5).

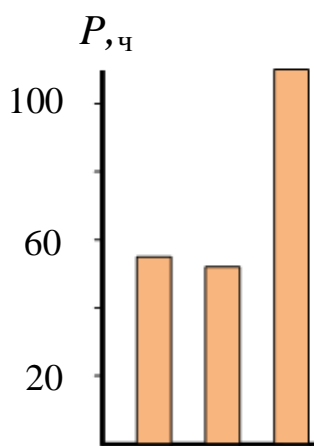


Рисунок 3.51 – Гистограмма изменения потенциального ресурса при окислении трансмиссионных масел различной базовой основы: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Испаряемость трансмиссионных масел (рисунок 3.52) наименьшая у минерального масла, а наибольшая – у частично синтетического. Причем испаря-

емость сильно различается за первые 8 ч испытания и составила для: минерального масла – 1,8 г; частично синтетического – 5,2 г и синтетического – 3,9 г. Большая испаряемость масел за первые 8 ч испытания может объясняться наличием легких фракций и воды.

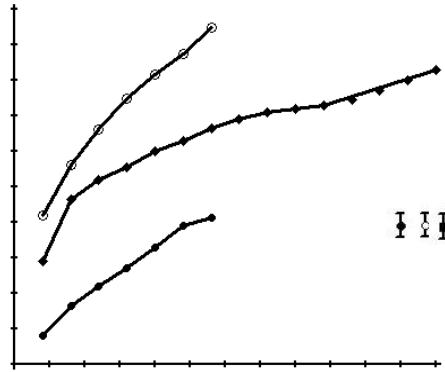


Рисунок 3.52 – Зависимости испаряемости от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Вязкость трансмиссионных масел оценивалась коэффициентом относительной вязкости  $K_\mu$ , определяемым отношением:

$$K_\mu = \mu_{\text{ок}} / \mu_{\text{т}}, \quad (3.29)$$

где  $\mu_{\text{ок}}$  и  $\mu_{\text{т}}$  – соответственно кинематическая вязкость окисленного и товарного масел, ( $\text{мм}^2/\text{с}$ ).

Наиболее стабильное изменение вязкости (рисунок 3.53) установлено для минерального масла (кривая 1), а наибольшее изменение – для частично синтетического (кривая 2). Так, при коэффициенте поглощения светового потока, равного 0,8 ед., вязкость увеличилась для масел: минерального на 10 %; частично синтетического на 35 % и синтетического на 22 %.

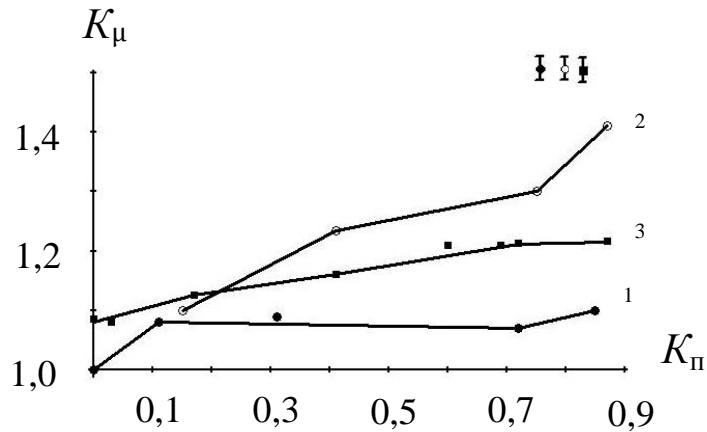


Рисунок 3.53 – Зависимости коэффициента относительной вязкости  $K_{\mu}$  от концентрации продуктов окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Влияние продуктов окисления на испаряемость трансмиссионных масел исследовалось по зависимости  $G = f(K_{ox})$  – рисунок 3.54.

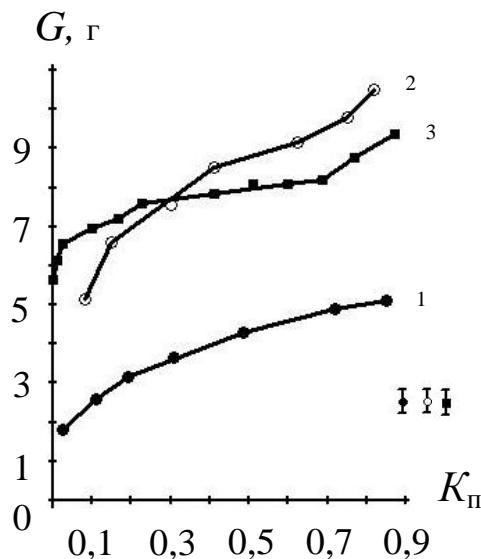


Рисунок 3.54 – Зависимости испаряемости от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Установлено, что продукты окисления большее влияние оказывают на оптические свойства масел, чем на вязкость и испаряемость, поэтому термо-

окислительную стабильность  $E_{\text{ТОС}}$  целесообразно оценивать суммой коэффициентов:

$$E_{\text{ТОС}} = K_{\text{П}} + K_G, \quad (3.30)$$

где  $K_{\text{П}}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $K_G$  – коэффициент испаряемости

$$K_G = m / M, \quad (3.31)$$

где  $m$  – масса испарившегося масла за установленное время и заданную температуру испытания, г;  $M$  – масса пробы после испытания за установленное время испытания при заданной температуре.

Так коэффициент  $E_{\text{ТОС}}$  характеризует количество тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения. Зависимости данного коэффициента от времени испытания (рисунок 3.55) для минерального и частично синтетического масел имеют изгиб, а для синтетического четыре изгиба, что указывает на образование продуктов окисления с различной оптической плотностью и испаряемостью. Поэтому при термостатировании масел возникают процессы перераспределения тепловой энергии между ними, вызывающие изменение скоростей окисления и испарения (рисунок 3.56).

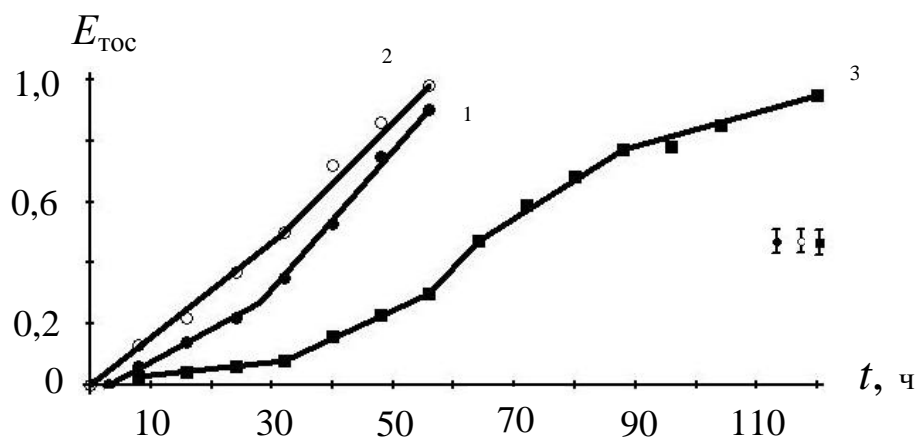


Рисунок 3.55 – Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Согласно данным (рисунок 3.56, *a*), приращение скорости окисления для всех исследованных масел подвержено колебаниям, что подтверждает наличие перераспределения тепловой энергии между продуктами окисления (первичными и вторичными) и испарения. Кроме того, для минерального и частично синтетического трансмиссионных масел процессы окисления протекают с бóльшей скоростью, чем для синтетического (кривая 3). Приращение скорости окисления для синтетического масла в первые 30 ч испытания характеризуется малыми значениями и в некоторые периоды времени стабилизируется, а при 96 ч испытания процессы окисления останавливаются. Максимальное приращение скорости окисления для масел составляет: минерального – 0,029 <sup>1</sup>/ч; частично синтетического – 0,027 <sup>1</sup>/ч и синтетического – 0,22 <sup>1</sup>/ч.

Приращение испаряемости трансмиссионных масел (рисунок 3.56, *б*) приобретает максимальное значение в первые часы испытания, а затем уменьшается. Максимальное значение приращения испаряемости для масел составило: минерального – 0,22 г/ч; частично синтетического – 0,65 г/ч и синтетического – 0,48 г/ч, а минимальное значение: для минерального – 0,025 г/ч; частично синтетического – 0,09 г/ч и синтетического – 0,01 г/ч. Сравнив зависимости приращений скоростей окисления и испаряемости видим, что в определенное время ход зависимостей находится либо в противофазе, либо в фазе. Это объясняется также явлением перераспределения тепловой энергии между процессами окисления и испарения.

Явление перераспределения тепловой энергии характеризует процессы самоорганизации, протекающие в смазочном материале, в результате которых сброс избыточной энергии происходит по двум каналам – изменению оптических свойств и испаряемости, т. е. избыточная энергия поглощается самими продуктами. Для оценки интенсивности процессов самоорганизации предложен коэффициент  $K_c$ , определяемый отношением:

$$K_c = dK_{\Pi}/dV_G, \quad (3.32)$$

где  $dK_{\Pi}$  и  $dV_G$  – приращение коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости соответственно.



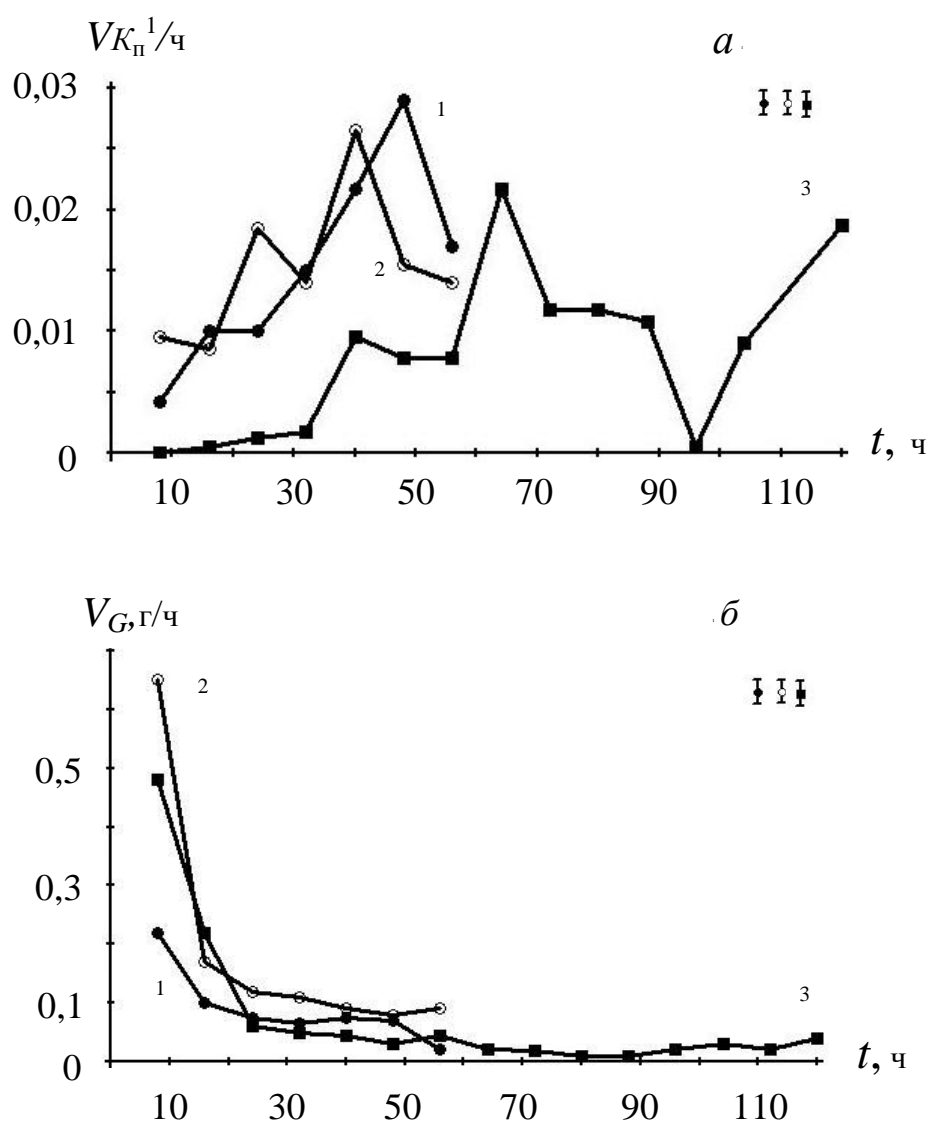


Рисунок 3.56 – Зависимости приращения скорости окисления (а) и испаряемости (б) от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минерального BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетического BIZOL HYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетического BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Согласно данным (рисунок 3.57), коэффициент интенсивности процессов самоорганизации для минерального трансмиссионного масла (кривая 1) сохраняет тенденцию увеличения за весь период испытания, т. е. процессы окисления преобладают над процессами испарения. Для частично синтетического масла (кривая 2) за периоды времени испытания от 24 до 32 ч и от 40 до 56 ч процессы испарения преобладают над процессами окисления. Для синтетического масла (кривая 3) за период времени испытания 40 ч процессы самоорганизации протекают менее интенсивно по сравнению с минеральным и частично синтетическим маслами.

Однако после 56 ч испытания наблюдается резкое увеличение коэффициента  $K_c$ , характеризующего резкое увеличение скорости окисления, а за период времени от 64 до 96 ч наблюдаются большие колебания коэффициента  $K_c$  за счет более интенсивного снижения скорости испарения.

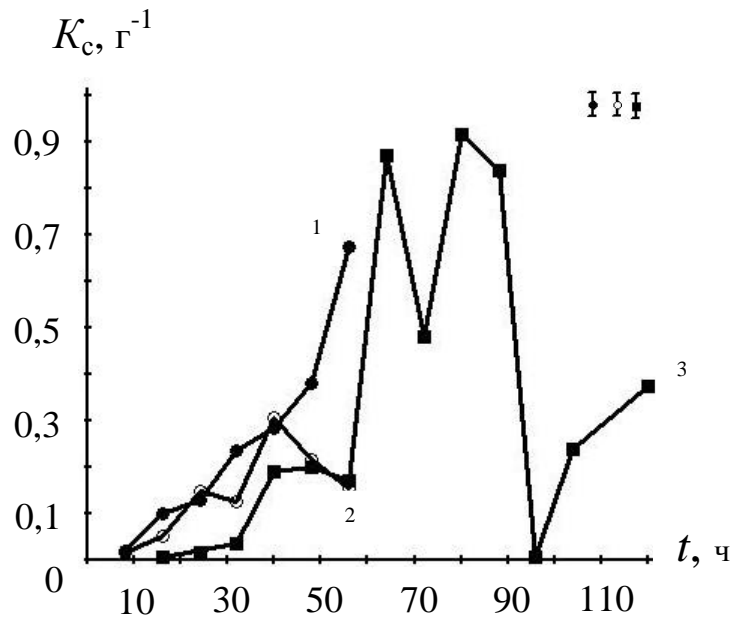


Рисунок 3.57 – Зависимости коэффициента интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в трансмиссионных маслах различной базовой основы при температуре окисления 150 °С: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Сопротивляемость масел температурным воздействиям предложено оценивать коэффициентом сопротивления окислению  $R_o$ , определяемым по формуле (3.6) и учитывающим процессы окисления и испарения. Показано (рисунок 3.58), что зависимость  $R_o = f(t)$  для минерального товарного масла (кривая 1) описывается линейным уравнением вида:

$$R_o = -at + 0,995, \quad (3.33)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий скорость понижения сопротивляемости масла окислению; 0,995 – коэффициент, характеризующий сопротивляемость товарного масла окислению.

Регрессионное уравнение сопротивляемости минерального масла окислению имеет вид:

$$R_o = -0,000875t + 0,995. \quad (3.34)$$

Коэффициент корреляции составил  $-0,993$ .

Для частично синтетического масла (кривая 2) зависимость описывается полиномом второго порядка, а регрессионное уравнение имеет вид:

$$R_o = -1,488 \cdot 10^{-5} t^2 - 0,0024t + 0,9855, \quad (3.35)$$

где  $0,0024$  – коэффициент, характеризующий скорость уменьшения сопротивляемости масла окислению;  $1,488 \cdot 10^{-5}$  – коэффициент, характеризующий замедление сопротивления окислению;  $0,9855$  – коэффициент, характеризующий сопротивляемость окислению товарного масла перед окислением.

Коэффициент корреляции составил  $-0,9989$ .

Для синтетического трансмиссионного масла BIZOL HYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3) понижение коэффициента сопротивления окислению начинается после 16 ч термостатирования. Зависимость  $R_o = f(t)$  описывается полиномом второго порядка

$$R_o = 9,3422 \cdot 10^{-5} (t - 16)^2 - 0,002 (t - 16) + 1,0265 \quad (3.36)$$

Коэффициент корреляции составил  $-0,993$ .

Сравнив значения скоростей уменьшения сопротивления окислению видим, что наибольшим сопротивлением окислению характеризуется минеральное масло, а наименьшим – частично синтетическое (кривая 2).

Зависимости коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока для трансмиссионных масел различной базовой основы представлены на рисунке 3.58, б. Регрессионные уравнения данных зависимостей имеют вид для масел:

минерального BIZOL 80W-90 GL4:

$$R_o = 0,0746 K_{\Pi}^2 - 0,1142 K_{\Pi} + 0,9939, \quad (3.37)$$

коэффициент корреляции составил  $-0,993$ ;

частично синтетического BIZOL HYPOID 75W-90 GL4;GL5:

$$R_o = 0,1348 K_{\Pi}^2 - 0,2176 K_{\Pi} + 0,9897, \quad (3.38)$$

коэффициент корреляции составил  $-0,9652$ ;

синтетического BIZOL HYPOID 75W-90 GL5:

$$R_o = 0,221 K_{\Pi}^2 - 0,2616 K_{\Pi} + 0,9932, \quad (3.39)$$

коэффициент корреляции составил  $-0,9585$ .

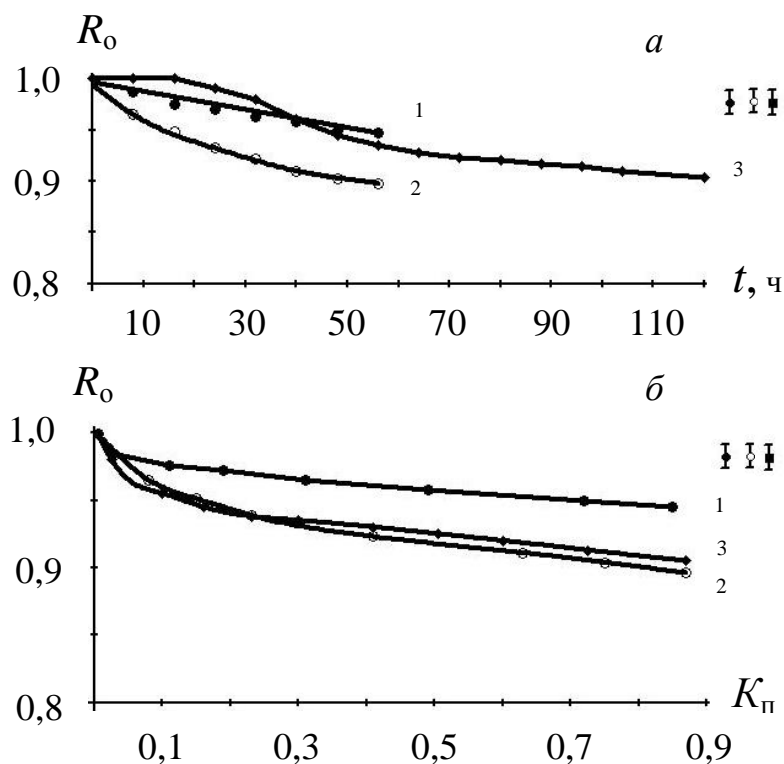


Рисунок 3.58 – Зависимости коэффициента сопротивления окислению от времени испытания (а) и коэффициента поглощения светового потока (б) при окислении трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Таким образом наибольшим сопротивлением окислению характеризуется минеральное масло (кривая 1), а наименьшим – частично синтетическое (кривая 2).

Влияние продуктов окисления на противоизносные свойства трансмиссионных масел оценивалось среднеарифметическими значениями диаметров пятен износа на трех шарах по результатам двух параллельно проводимых опытов (рисунок 3.59). Установлено, что для минерального масла (рисунок 3.59, *a* кривая 1) противоизносные свойства повышаются при увеличении коэффициента поглощения светового потока (концентрации продуктов окисления). Для частично синтетического масла (кривая 2) при значениях коэффициента  $K_{\Pi} < 0,2$  ед. противоизносные свойства стабильны, а при значениях  $K_{\Pi} > 0,2$  ед. они повышаются и превышают противоизносные свойства товарного масла (точка на ординате). Для синтетического масла (кривая 3) противоизносные свойства соответствуют товарному маслу (точка на ординате) при значениях  $K_{\Pi} < 0,2$  ед., при значениях  $K_{\Pi}$  от 0,2 до 0,3 ед. они понижаются, а в диапазоне изменения коэффициента  $K_{\Pi}$  от 0,3 до 0,4 ед. повышаются и при значениях  $K_{\Pi} > 0,4$  ед. они стабилизируются.

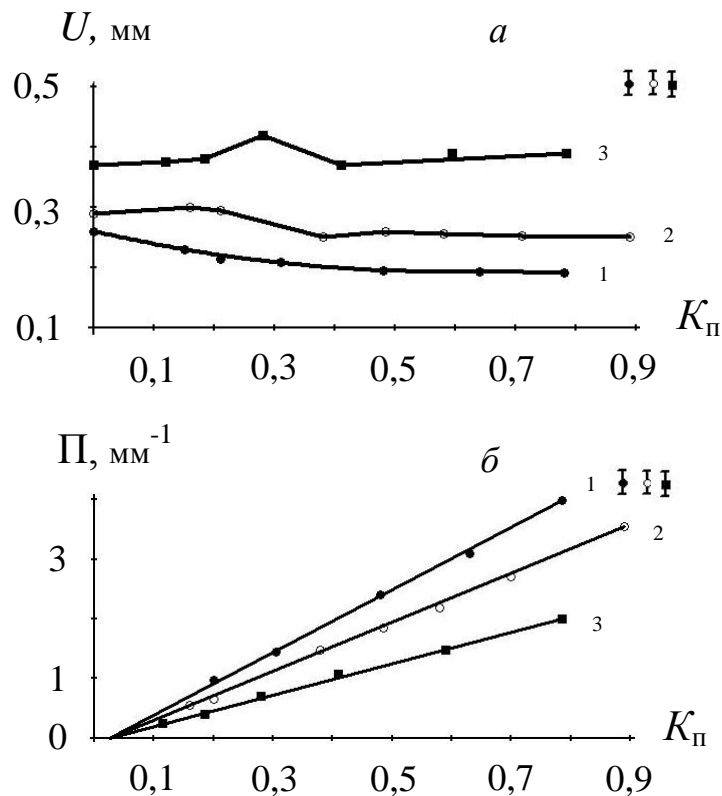


Рисунок 3.59 – Зависимости диаметра пятна износа (*a*) и критерия противоизносных свойств (*б*) от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  при окислении трансмиссионных масел

Повышение противоизносных свойств масел вызвано образованием при окислении смолистых веществ, которые адсорбируются во впадинах микронеровностей, образуя гидравлическую «подушку», разделяющую поверхности трения и тем самым уменьшая износ.

Этот механизм характерен для минерального и частично синтетического масел. Для синтетического масла смолистые вещества не обнаружены при их центрифугировании, поэтому при изменении коэффициента  $K_{\Pi}$  в пределах от 0,2 до 0,3 ед. износ повышается. Для минеральных и частично синтетических масел осадок при центрифугировании принимает гелеобразное состояние.

Из представленных данных (рисунок 3.59, а) видим, что наивысшими противоизносными свойствами характеризуется минеральное масло BIZOL 80W-90 GL4 (кривая 1), а значительно низшими – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3).

Для оценки противоизносных свойств трансмиссионных масел предложен критерий  $\Pi$  ( $\text{мм}^{-1}$ ), определяемый эмпирическим отношением (рисунок 3.59, б) [10]:

$$\Pi = K_{\Pi} / U, \quad (3.40)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $U$  – диаметр пятна износа, мм.

Данный критерий характеризует концентрацию продуктов окисления на площади фрикционного контакта, зависимость которого описывается линейным уравнением вида (рисунок 3.59, б):

$$\Pi = a (K_{\Pi} - b), \quad (3.41)$$

где  $a$  – скорость изменения критерия  $\Pi$ ;  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $b$  – оптические свойства товарного масла.

Регрессионные уравнения для исследуемых масел имеют следующий вид:

$$\text{минерального} \quad \Pi = 5,32(K_{\Pi} - 0,03); \quad (3.42)$$

$$\text{частично синтетического} \quad \Pi = 4,082(K_{\Pi} - 0,03); \quad (3.43)$$

$$\text{синтетического} \quad \Pi = 2,667(K_{\Pi} - 0,03). \quad (3.44)$$

Коэффициент корреляции равен  $-0,9694$ .

Коэффициенты  $5,32$ ;  $4,082$  и  $2,667$  характеризуют скорость изменения критерия противоизносных свойств и чем она больше, тем выше противоизносные свойства исследуемого масла. Коэффициент  $0,03$  характеризует значение коэффициента поглощения светового потока исходного масла.

Согласно уравнениям (3.42–44) наибольшая скорость изменения критерия противоизносных свойств  $\Pi$  установлена для минерального масла, а наименьшая – синтетического, т. е. концентрация продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта больше у первого масла, чем у второго за счет меньшей площади пятна износа. Поэтому чем больше скорость изменения критерия  $\Pi$ , тем выше противоизносные свойства исследуемого масла.

Применение в качестве показателя противоизносных свойств площади пятна износа  $S$  и критерия  $\Pi_s$  позволяет сравнить их с данными, полученными с применением диаметра пятна износа (см. рисунок 3.59). Данные, приведенные на рисунке 3.60 подтверждают, что более высокими противоизносными свойствами характеризуется минеральное масло BIZOL 80W-90 GL4 (кривая 1), а более низкими – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3). Например, площадь фрикционного контакта при коэффициенте поглощения светового потока  $K_{\Pi} = 0,7$  ед. для масел имеет следующие значения: минерального –  $0,03 \text{ мм}^2$ , частично синтетического –  $0,05 \text{ мм}^2$  и синтетического –  $0,12 \text{ мм}^2$ .

Сравнив данные рисунков 3.59, б и 3.60 видим, что для вычисления критерия противоизносных свойств можно пользоваться как диаметром пятна износа, так и площадью пятна износа. Оба метода вычисления критерия определяют лучшие масла по показателю противоизносных свойств.

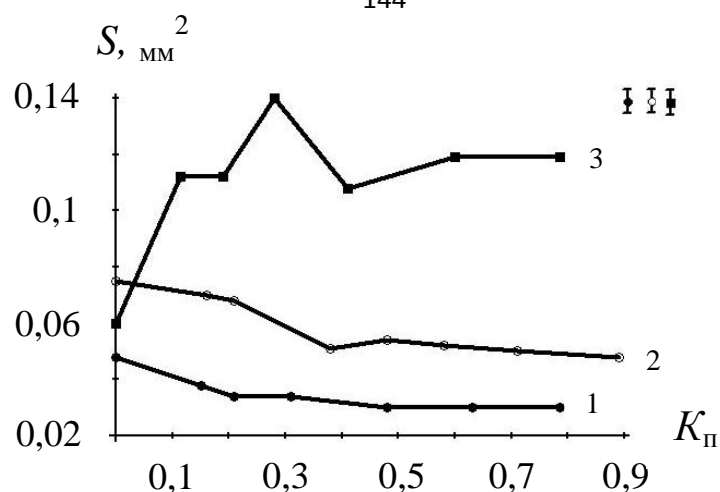


Рисунок 3.60 – Зависимости номинальной площади фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при испытании окисленных трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Зависимости критерия противоположных свойств  $\Pi_s$ , вычисленного через площадь фрикционного контакта (рисунок 3.61), описываются линейными регрессионными уравнениями для масел следующих марок:

минерального BIZOL 80W-90 GL4

$$\Pi_s = 34,85(K_{\text{П}} - 0,04); \quad (3.45)$$

частично синтетического BIZOL HYPOID 75W-90 GL4;GL5

$$\Pi_s = 21,88(K_{\text{П}} - 0,06); \quad (3.46)$$

синтетического BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

$$\Pi_s = 9,29(K_{\text{П}} - 0,05). \quad (3.47)$$

Коэффициент корреляции составил – 0,9865.

Согласно уравнениям (3.45–47) лучшие противоположные свойства показало минеральное трансмиссионное масло (кривая 1), а худшие – синтетическое трансмиссионное масло (кривая 3).



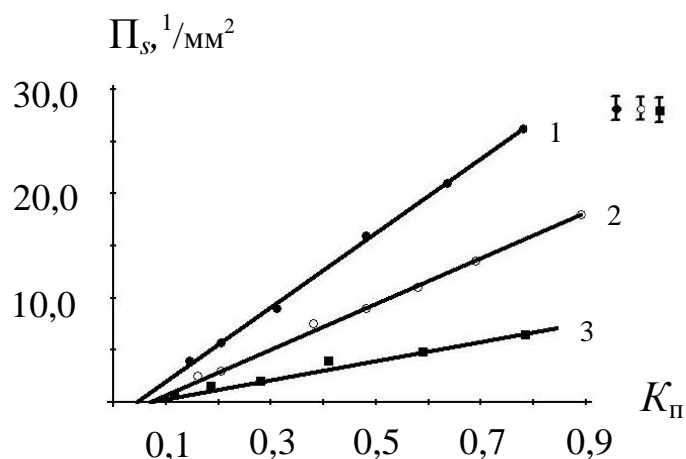


Рисунок 3.61 – Зависимости критерия противоизносных свойств, выраженного через номинальную площадь фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при испытании трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

В таблице 3.2 приведены экспериментальные данные испытания трансмиссионных масел различной базовой основы, которые приняты в качестве дополнительных показателей при оценке термоокислительной стабильности и влияния продуктов окисления на противоизносные свойства.

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные испытания трансмиссионных масел различной базовой основы

Показатель масла	Марка масла		
	Минеральное BIZOL 80W- 90 GL4	Частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5	Синтетическое BIZOL HYPOID 75W- 90 GL5
Потенциальный ресурс при температуре 150 °С и коэффициенте $K_{\pi} = 0,8$ ед.	55,0	50,0	114
Коэффициент относительной кинематической вязкости в конце испытания, $\text{мм}^2/\text{с}$	1,1	1,41	1,22

Окончание таблицы 3.2

Испаряемость после 40 ч испытания, г	4,3	9,2	7,0
Критерий термоокислительной стабильности после 40 ч испытания, ед.	0,532	0,728	0,178
Коэффициент сопротивления окислению при температуре 150 °С после 40 ч испытания, ед.	0,959	0,913	0,957
Критерий противоизносных свойств П при коэффициенте $K_{\text{п}} = 0,8$ ед.(диаметр пятна износа)	4,1	3,2	2,1
Критерий противоизносных свойств Ps при коэффициенте $K_{\text{п}} = 0,8$ ед.(площадь контакта)	26,75	16,0	6,7

Из представленных в таблице 3.2 данных лучшими показателями характеризуется минеральное масло BIZOL 80W-90 GL4. Оно уступает синтетическому маслу по потенциальному ресурсу и критерию термоокислительной стабильности, а по остальным показателям его превосходит, особенно по противоизносным свойствам. Если сравнивать исследованные масла по группам эксплуатационных свойств, то классификация минерального масла занижена, а синтетического завышена, особенно по противоизносным свойствам, уступающим минеральному маслу в 2 раза.

Таким образом рекомендуемые дополнительные показатели качества трансмиссионных масел позволяют объективно оценить их термоокислительную стабильность, ресурс, изменение кинематической вязкости, испаряемости, сопротивление температурным воздействиям и противоизносные свойства.

### 3.6. Результаты испытания трансмиссионного масла МТ-8п, находящегося в трансмиссиях при хранении бронетехники

Моторно-трансмиссионное масло МТ-8п (ТУ 38.101127–85) селективной очистки производится из восточных сернистых нефтей, содержит противоизносные, антикоррозионные, антиокислительные, моющие депрессорные и антипенные присадки. Применяется как трансмиссионное в планетарных передачах гусеничных машин, в системах гидроуправления специальных машин. Относится к классу вязкости 9, кинематическая вязкость 8,0–9,0 мм<sup>2</sup>/с при 100 °С, индекс вязкости не менее 90, температура вспышки в открытом тигле не ниже +180 °С, температура застывания, не выше –30 °С.

Пробы масла отбирались из бортовых редукторов и коробок передач 23 гусеничных машин массой 500 г и подвергались фотометрированию, с целью определения коэффициента поглощения светового потока путем прямого фотометрирования при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и концентрации общих продуктов старения в масле. Часть пробы массой 15 г подвергалась центрифугированию с повторным фотометрированием верхнего слоя для установления концентрации растворимых продуктов старения, а разность между концентрациями общих и растворимых продуктов старения позволила определить концентрацию в масле нерастворимых продуктов.

Распределение концентраций продуктов старения в масле представлено в виде гистограмм на рисунке 3.62 : показано, что из 23 проб в 17 концентрация общих продуктов старения (*а*), выраженная коэффициентом поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ , составляет – 0,2 ед., в 5 пробах – 0,3 ед. и в одной – 0,4 ед.; концентрация растворимых продуктов старения  $K_{\text{пр}}$  (*б*) в 15 пробах составила – 0,1 ед., в 5 пробах – 0,2 ед. и в 3 – 0,3 ед.

Концентрация нерастворимых продуктов старения  $K_{\text{пн}}$  (рисунок 3.68, *в*) колеблется от 0,02 до 0,1 ед. В большинстве проб (14 ед.) концентрация составила 0,04 ед., а наибольшая 0,1 ед. – в 2 пробах. Из представленных гистограмм видим, что в трансмиссионных маслах присутствуют в основном растворимые продукты

старения и их концентрация почти в 3 раза превышает концентрацию нерастворимых продуктов.

Таким образом, применение фотометра и центрифуги позволяет определить состав продуктов старения трансмиссионных масел при длительном хранении техники.

Важными показателями, влияющими на свойства масел при эксплуатации техники, являются вязкость и концентрация влаги. Вязкость масла определялась на малообъемном вискозиметре, техническая характеристика которого приведена в главе 2.

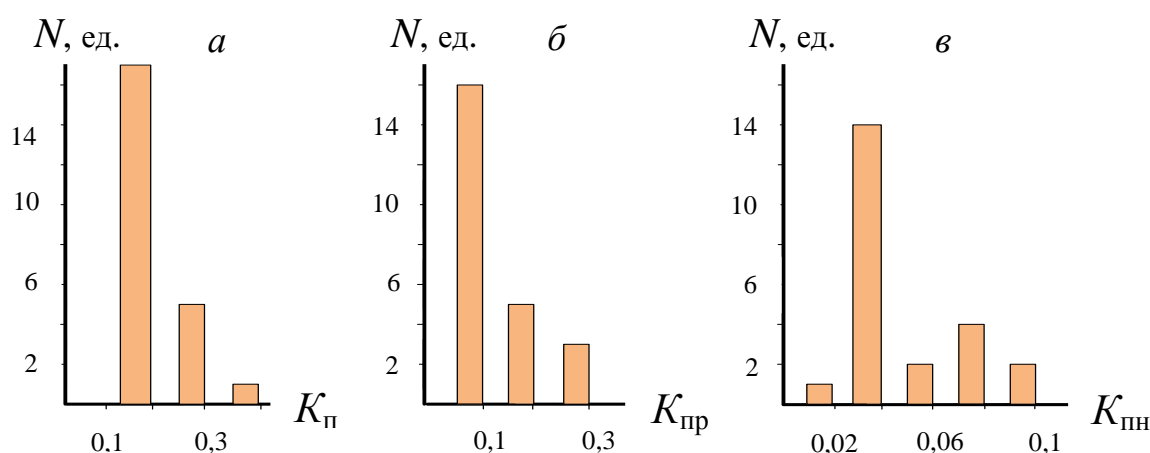


Рисунок 3.62 – Гистограммы распределения концентраций общих  $K_{\text{П}}$  (а), растворимых  $K_{\text{ПР}}$  (б) и нерастворимых  $K_{\text{ПН}}$  (в) продуктов старения трансмиссионных масел МТ-8п при хранении техники

Концентрация влаги в масле определялась на приборе для термостатирования, при этом в стеклянный стакан заливалась проба масла массой  $100 \pm 0,1$  г и термостатировалась при температуре  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения  $300 \pm 5$  об/мин. Продолжительность термостатирования составляла 20 мин. и обоснована экспериментально. После испытания проба термостатированного масла взвешивалась на электронных весах с точностью 0,1 г.

Результаты измерения вязкости и концентрации влаги представлены гистограммами на рисунке 3.63, где показано, что вязкость масел большинства проб (18 ед.) соответствует стандарту  $8 - 9 \text{ мм}^2/\text{с}$  и только в двух пробах она составляет  $7 \text{ мм}^2/\text{с}$  а в трех –  $10 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Концентрация влаги колеблется в пределах от 0,1 до 0,6 %: наибольшее количество проб (6 ед.) содержит влаги до 0,5 %, наименьшая концентрация 0,1 % установлена в 2 пробах, а в 4 пробах она составила 0,6 %. Концентрация влаги характеризует условия хранения техники и герметичность масляных систем.

Противоизносные свойства трансмиссионных масел, находящихся в технике на хранении оценивались на трёхшариковой машине трения [87], техническая характеристика которой и методика испытания представлены в главе 2.

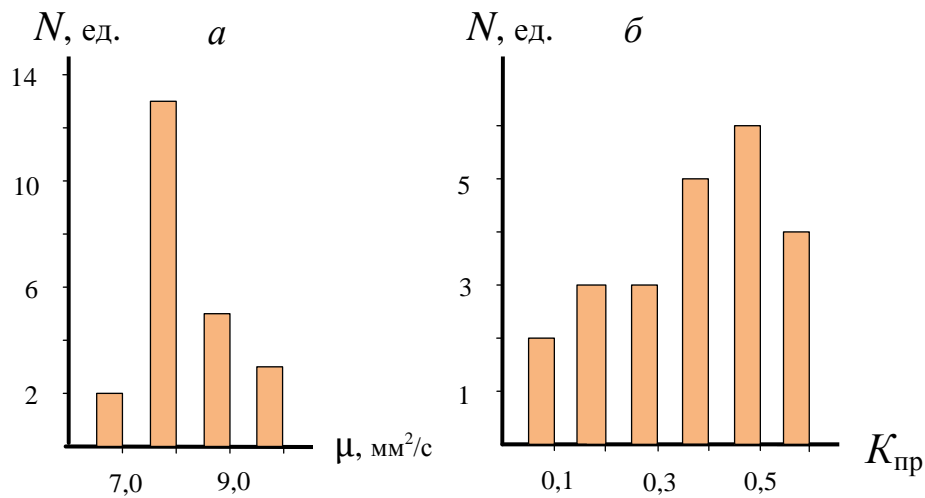


Рисунок 3.63 – Гистограммы распределения вязкости (а) и концентрации воды (б) в трансмиссионных маслах МТ-8п при хранении техники

Противоизносные свойства оценивались по диаметру пятна износа, а результаты исследования представлены на рисунке 3.64. Установлено, что параметр износа колеблется от 0,3 до 0,5 мм, причём для большинства проб (11 шт.) он находится в пределах от 0,3 до 0,4 мм.

Для оценки влияния сроков хранения масел на их сопротивляемость окислению пробы масел термостатировались при температуре 150 °С в течение 3 ч в приборе для термостатирования, при этом проба масла массой 100 г перемешивалась с частотой вращения мешалки  $300 \pm 5$  об/мин. После испытания проба взвешивалась для определения массы испарившегося масла и отбиралась проба для фотометрирования и определения изменения коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ .

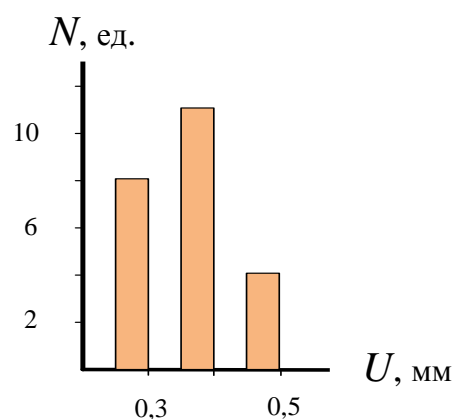


Рисунок 3.64 – Гистограмма распределения противоизносных свойств трансмиссионных масел МТ-8п при хранении техники

Результаты термостатирования представлены в виде гистограмм (рисунок 3.65) показывают, что по сравнению с исходными пробами масел коэффициент поглощения светового потока термостатированных масел сместился в сторону увеличения: перед термостатированием максимальное количество проб (17 ед.) имело коэффициент поглощения светового потока 0,2 ед., после термостатирования он составил 0,4 ед. для 14 проб, причём 5 проб достигли значения коэффициента 0,7 ед.

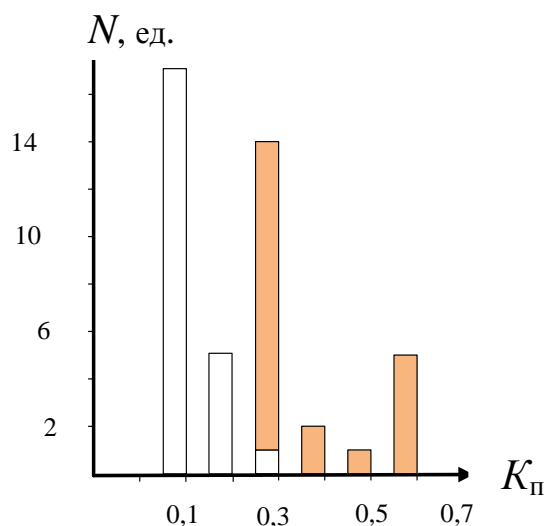


Рисунок 3.65 – Гистограмма распределения оптических свойств трансмиссионных масел МТ-8п при хранении техники:  –исходные пробы масел;  –после окисления при температуре 150 °С в течение 3 ч

Испаряемость масел при термостатировании (рисунок 3.66) составила от 2 до 5 г, причём для 8 проб она составила 2 г и 9 проб – 4 г. В 5 пробах установлена максимальная испаряемость – 5 г.

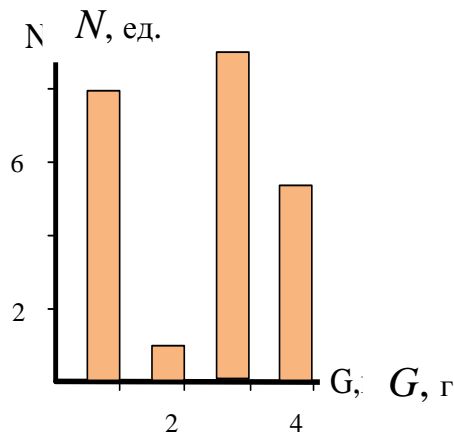


Рисунок 3.66 – Гистограммы распределения испаряемости трансмиссионных масел МТ-8п после окисления при температуре 150 °С

Зависимость параметра износа от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  (Рисунок 3.67) показывает, что при одном и том же значении коэффициента износ имеет различные значения. Это объясняется различиями в составе продуктов старения, их свойствах, условиях хранения техники и её техническом состоянии, содержании влаги и концентрации продуктов, попадающих извне (атмосферная пыль).

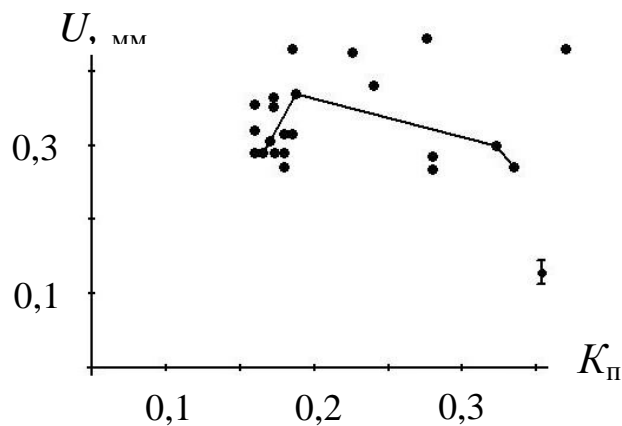


Рисунок 3.67 – Зависимость диаметра пятна износа от концентрации общих продуктов старения трансмиссионных масел МТ-8п при хранении бронетехники

Представленные данные показывают, что применение предлагаемого метода и средств контроля позволяют получить дополнительную информацию о состоянии трансмиссионных масел при длительном хранении техники и принять своевременные меры по устранению причин, вызывающих изменение вязкости, концентраций нерастворимых продуктов старения и влаги, противоизносных свойств. В этом случае необходимо провести исследования товарных масел, применяемых в трансмиссиях бронетехники, определить их сопротивляемость температурным воздействиям в температурном диапазоне от 120 до 150 °С, оценить влияние продуктов окисления на вязкость и противоизносные свойства, установить температурную область работоспособности и температуры начала окислительных процессов и испаряемости, а также определить интенсивность механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте, обосновать критерии термоокислительной стабильности и противоизносных свойств и определить лучшие масла среди исследованных.

Важное значение имеют исследования масел с различными сроками хранения для установления оптимальных сроков.

### **Выводы по третьей главе**

1. Термостатирование трансмиссионных масел при статической температуре 150 °С показало, что процесс окисления для минеральных и частично синтетических масел характеризуется образованием двух видов продуктов окисления, различающихся оптическими свойствами, что вызывает изгиб зависимостей коэффициента поглощения светового потока от времени окисления. Потенциальный ресурс масел изменяется от 45 до 144 ч. Процесс окисления синтетического масла характеризуется возрастающей кусочно-линейной функцией с тремя участками.

2. Термостатирование минеральных трансмиссионных масел при циклически изменяющейся температуре в диапазоне от 120 до 150 °С увеличивает потенциальный ресурс более чем в два раза и позволяет по скоростям изменения оптических свойств и испаряемости определять температуры начала процессов



окисления и испарения, а также сравнивать масла по количеству циклов повышения и понижения температуры испытания.

3. Установлено, что кинематическая вязкость при окислении трансмиссионных масел, независимо от базовой основы, выраженная коэффициентом относительной вязкости, определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного, увеличивается максимум на 40 %. Более стабильное изменение вязкости установлено для минеральных масел ТСзп-8 и BIZOL 80W-90 GL4, а также синтетического BIZOL HYPOID 75W-90 GL5.

4. Испаряемость трансмиссионных масел при термостатировании в течение 40 ч колеблется от 4,3 до 19,1 г и зависит от вязкости масел и концентрации легких фракций и воды. Наименьшая испаряемость установлена для минеральных масел BIZOL 80W-90 GL4 и MC-20 – 4,3 г, а наибольшая для минерального масла ТСзп-8 – 19,1г.

5. Предложен коэффициент интенсивности процессов самоорганизации при окислении трансмиссионных масел, определяемый отношением скорости окисления к скорости испарения, подтверждающий наличие явления перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения, причем в момент образования более энергоемких продуктов окисления коэффициент интенсивности увеличивается.

6. Обоснован критерий термоокислительной стабильности трансмиссионных масел, определяемый суммой коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости, зависимость которого от времени окисления описывается кусочно-линейными функциями, имеющими изгиб при увеличении в масле более энергоемких продуктов окисления, причем для синтетического масла BIZOL HYPOID 75W-90 GL5 зависимость критерия состоит из двух участков, первый из которых описывается квадратичным уравнением, а второй – линейным.

7. Предложена физическая модель процессов окисления трансмиссионных масел различной базовой основы, обосновывающая альтернативный критерий термоокислительной стабильности, учитывающий сопротивление масел температурным воздействиям и вычисляемая по формуле

$$R_o = 1 - \frac{K_{\Pi} \cdot K_G}{K_{\Pi} + K_G},$$

где  $R_o$  – коэффициент сопротивляемости масел окислению;  $K_{\Pi}$  и  $K_G$  – соответственно коэффициенты поглощения светового потока и испарения. Причем зависимости коэффициента сопротивления окислению от времени испытания для минеральных масел описываются линейными уравнениями, для частично синтетических и синтетических – полиномом второго порядка, а зависимости коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока независимо от базовой основы описываются полиномом второго порядка. Установлено, что наибольшим сопротивлением окислению характеризуются минеральные масла MC-20 и BIZOL 80W-90 GL4, а также синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5.

8. Предложен критерий противоизносных свойств трансмиссионных масел, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа, характеризующий концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта. Установлена линейная зависимость данного критерия от коэффициента поглощения светового потока, позволяющая по скорости изменения критерия противоизносных свойств сравнивать различные масла. Доказано, что для вычисления критерия противоизносных свойств можно использовать как среднеарифметическое значение параметров пятен износа, так и номинальную площадь фрикционного контакта. Наивысшими противоизносными свойствами характеризуются минеральные масла MC-20 и BIZOL 80W-90 GL4, а наименьшими минеральное масло ТСзп-8 и синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5.

9. Предложен электрометрический метод контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте, путем пропускания постоянного тока через зону трения величиной 100 мкА от внешнего стабилизированного источника напряжения, позволяющего определить продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформации и электропроводность фрикционного контакта. Уста-

новлено, что при повышении кислотности окисленных масел коэффициент электропроводности фрикционного контакта увеличивается.

10. Предложен коэффициент интенсивности механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте, определяемый произведением параметра износа на коэффициент электропроводности фрикционного контакта. Установлены две области изменения механохимических процессов различной интенсивности, характеризующие формирование адсорбционных и хемосорбционных граничных слоев, причем при переходе из одной области в другую установлено резкое изменение коэффициента. Данный коэффициент характеризует механическую и химическую составляющие изнашивания при граничном трении скольжения.

11. Апробация разработанной методики контроля состояния трансмиссионных масел производилась на парке машин из 23 ед., находящихся на длительном хранении. Технической службе представлены данные по оптическим свойствам масел, концентрации растворимых и нерастворимых продуктов старения, кинематической вязкости, концентрации воды, противоизносным свойствам, сопротивляемости окислению и испарению при температуре термостатирования 150 °С. Данная информация позволяет принять обоснованное решение по замене масел.

## 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ТОВАРНЫХ И РАБОТАЮЩИХ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

### 4.1 Технология контроля состояния трансмиссионных масел парка машин длительного и краткосрочного хранения

#### 4.1.1 Технология контроля состояния трансмиссионных масел по составу продуктов старения

Данная технология предусматривает получение объективной информации по состоянию трансмиссионных масел парка машин и реализуется в два этапа. На первом этапе производится контроль состояния масел на всех машинах, находящихся в воинской части. Затем, по показателям качества масел, техника разбивается на несколько групп согласно результатам анализа. Второй этап предусматривает проведение планового текущего контроля состояния масел с учетом частоты их эксплуатации или продолжительности хранения.

Для реализации технологии применяются следующие средства измерения: фотометрическое устройство, центрифуга, малообъемный вискозиметр. Пробы масел отбираются после небольшого пробега техники с помощью шприца через отверстие налива в объеме 250 г. Причем, пробы масла после измерения вязкости, сливаются в кювету центрифуги, что обеспечивает уменьшение их отбора. Фотометрирование пробы работающего масла производится при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм, а продолжительность центрифугирования – 1ч. После центрифугирования отбирается проба с верхнего слоя масла в кювету и фотометрируется повторно. Причем значение коэффициента поглощения светового потока при фотометрировании пробы после центрифугирования характеризует концентрацию растворимых продуктов старения (в основном продукты окисления и температурной деструкции). Концентрация нерастворимых продуктов старения  $K_{\text{пн}}$  определяется по формуле:

$$K_{\text{пн}} = K_{\text{п}} - K_{\text{пр}}, \quad (4.1)$$

где  $K_{\text{п}}$  – концентрация общих продуктов старения в масле ;  $K_{\text{пр}}$  – концентрация растворимых продуктов старения в масле.

Концентрация нерастворимых продуктов характеризует наличие в масле продуктов коррозии, износа и попадающих извне через уплотнения. Полученные экспериментальные данные по вязкости и концентрациям общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения заносятся в меню компьютера по каждой машине с указанием даты, пробега и строятся графические зависимости этих показателей от времени работы механизма и его пробега. Такая схема учета данных по изменению вязкости и концентрации состава продуктов старения позволяет увидеть динамику изменения состояния масел по парку машин и выявить машины, в которых необходима замена масел, а также планировать сроки проведения очередных анализов и подготавливать материальное обеспечение.

#### **4.1.2 Технология контроля концентрации легких фракций и воды в трансмиссионных маслах**

Данная технология применяется для контроля товарных и работающих масел. Легкие фракции и вода в товарных маслах образуются при их производстве, сливо-наливных операциях и хранении масел в резервуарах и тарах.

Присутствие воды в смазочных маслах оказывает влияние на их эксплуатационные свойства. Она может существовать в различных видах. Некоторое количество влаги может быть растворено в масле, причем растворимость меняется в зависимости от внешних условий. Остальная влага может находиться в масле в состоянии эмульсии, которая частично переходит в растворенную и обратно при изменении давления и температуры [148]. Часть эмульгированной влаги может оставаться и образовывать подтоварную воду. Кроме того, вода может быть в химически связанном состоянии и вступать в реакции гидратации с легирующими присадками масел с образованием кислот, щелочей и других веществ, способных ухудшать их свойства. В тяжелонагруженных узлах вода может испаряться и вызывать разрыв масляной пленки, разделяющей поверхности трения. При

добавлении в масла с присадкой до 3 масс % воды, их эксплуатационные свойства резко ухудшаются [149]. Наличие воды усиливает коррозионное воздействие масел на металлы, в них более активно протекают процессы окисления углеводородов. Кроме того, присутствие воды способствует микробиологическому заражению масел [64]. Поэтому контроль над содержанием влаги имеет важное значение как в товарных, так и работающих трансмиссионных маслах.

Легкие фракции масел образуются при их производстве и эксплуатации в результате механической и температурной деструкций. Легкие фракции оказывают влияние на кинематическую вязкость и несущую способность граничного слоя, разделяющего поверхности трения.

Реализация технологии контроля концентрации легких фракций и воды предусматривает использование прибора для термостатирования масел и электронных весов. Проба масла массой  $100 \pm 0.1$  г заливается в стеклянный стакан прибора для термостатирования и термостатируется при температуре  $120$  °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения  $300$  об/мин. в течение  $20$  мин.

Время испытания установлено экспериментально и обеспечивает испарение  $3$  г воды. После термостатирования проба масла взвешивается и определяется масса испарившегося масла. Концентрация  $C_B$  легких фракций определяется по формуле:

$$C_B = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно массы пробы масла до и после термостатирования, г.

Полученные экспериментальные данные заносятся в меню компьютера, по которым строятся зависимости суммарной концентрации легких фракций и воды от пробега и времени хранения трансмиссионного масла в технике. По результатам контроля принимаются решения по устранению причин, вызывающих увеличение концентрации легких фракций и воды в маслах.

### 4.1.3 Технология контроля концентрации продуктов износа в трансмиссионных маслах

Для реализации данной технологии можно использовать два метода контроля. Первый метод предполагает применение фотометрического устройства и магнитного сепаратора, а второй – прибора для термостатирования масел и постоянного цилиндрического магнита.

Конструкция магнитного сепаратора [150] представлена на рисунке 4.1 и включает направляющую 1, установленную на основании 2, выполненной с пазом для фиксации стакана 3. На направляющей 1 установлен кронштейн 4, на котором закреплен постоянный магнит 5 и полый патрубок 6 с фланцем и наливной емкостью 7.

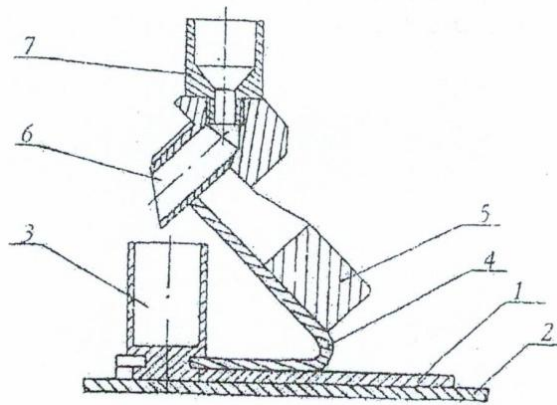


Рисунок 4.1 – Устройство ферромагнитного сепаратора: 1 – направляющая; 2 – основание; 3 – стакан; 4 – кронштейн; 5 – магнит; 6 – патрубок; 7 – емкость наливная

Работа сепаратора заключается в пропускании подогретого, трансмиссионного масла через патрубок, установленный в магнитном поле, в результате чего ферромагнитные частицы задерживаются. Концентрацию ферромагнитных частиц –  $C_M$  определяют фотометрированием масла до и после магнитной сепарации по формуле:

$$C_M = \frac{K_{II} - K_{II\text{МС}}}{K_{II}} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент поглощения светового потока масла до магнитной сепарации;  $K_{\text{пмс}}$  – коэффициент поглощения светового потока масла после магнитной сепарации.

Таблица 4.1 – Техническая характеристика магнитного сепаратора

Параметр	Значение параметра
Объем испытуемого масла, мл	$10 \pm 2$
Температура предварительного нагрева масла, °С	$70 \pm 5$
Продолжительность испытаний, мин.	$2 \pm 1$
Габариты устройства, мм	$110 \times 75 \times 65 \pm 2$
Масса, г	$350 \pm 10$

Второй метод контроля наличия в масле продуктов износа предусматривает помещение кольцевого магнита в стеклянный стакан прибора для термостатирования, который заправляется пробой работавшего масла массой 100 г, ее нагрев до температуры 70–80 °С и перемешивание с частотой вращения мешалки 60 об/мин. Продолжительность испытаний 20 мин. После испытания отсепарированная проба масла фотометрируется и по формуле (4.3) определяется содержание феррочастиц в масле. По результатам контроля принимается решение о замене масла в трансмиссии.

#### **4.1.4 Технология контроля потенциального ресурса товарных и остаточного ресурса работающих трансмиссионных масел**

Потенциальный ресурс как показатель применяется для сравнения различных товарных смазочных масел и выбора из их числа масел с наибольшим временем работоспособности. При этом условия испытания должны быть постоянными и максимально приближенными к режимам эксплуатации проектируемых агрегатов трансмиссий. Остаточный ресурс – показатель, определяющий возможное время работы трансмиссионного масла в агрегате, получаемый при



обосновании показателей предельного состояния, что позволяет сравнивать их текущее значение с предельным и прогнозировать остаточный ресурс.

Технология контроля потенциального и остаточного ресурса имеет некоторые различия и предусматривает применение следующих средств измерения и испытания: прибор для термостатирования масел; фотометрическое устройство; электронные весы и малообъемный вискозиметр.

Технология реализуется следующим образом. Проба товарного масла массой  $100 \pm 0,1$  г заливается в стеклянный стакан прибора для термостатирования при температуре  $150$  °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения  $300$  об/мин. Продолжительность испытаний составляет  $8$  ч, после чего проба окисленного масла взвешивается, определяется масса испарившегося масла и коэффициент испаряемости  $K_G$

$$K_G = m / M, \quad (4.4)$$

где  $m$ —масса испарившегося масла после  $8$  часов окисления, г;  $M$  – масса пробы масла после окисления, г.

Отбирается часть пробы окисленного масла для прямого фотометрирования, при толщине фотометрируемого слоя  $2$  мм. Другая часть пробы  $8$  г отбирается для измерения кинематической вязкости, после чего сливается в стеклянный стакан, который повторно взвешивается. По полученным данным определяется коэффициент термоокислительной стабильности масла  $E_{\text{ТОС}}$  после  $8$  ч испытания по формуле:

$$E_{\text{ТОС}} = K_{\text{п}} + K_G \quad (4.5)$$

Данный коэффициент учитывает склонность масел к окислению и испарению. Испытание масла продолжается до достижения коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$  значений  $0,75 - 0,8$  ед. По полученным экспериментальным данным строятся графические зависимости коэффициента термоокислительной стабильности и кинематической вязкости от времени испытания, по которым

определяют время достижения коэффициента термоокислительной стабильности значения равного, например 0,8 ед. Данное время определяет потенциальный ресурс работоспособности исследуемых масел. Кроме того, при определении времени достижения коэффициента термоокислительной стабильности значения 0,8 ед. учитываются значения кинематической вязкости. Если этот показатель после окисления больше 35 % или меньше 20 % кинематической вязкости товарного масла, то ресурс данного масла определяется временем достижения вязкости этих значений.

Полученные экспериментальные данные позволяют определить потенциальный ресурс исследуемых масел обеспечивая возможность их выбора с максимальным ресурсом.

На рисунках 4.2 и 4.3 представлены экспериментальные данные исследования трансмиссионных масел.

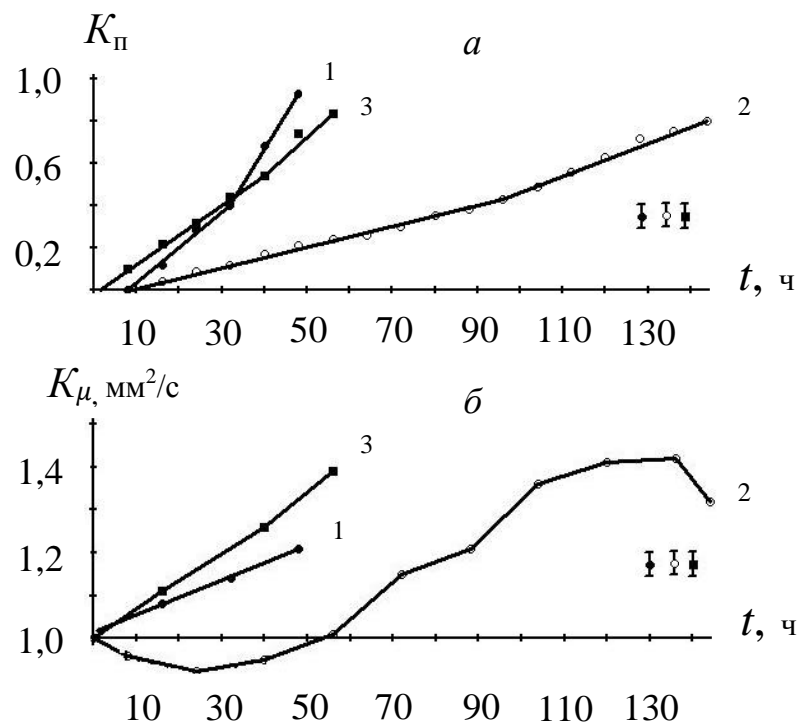


Рисунок 4.2 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока  $K_{\pi}$  (а) и коэффициента относительной вязкости  $K_{\mu}$  (б) от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Согласно данным (рисунок 4.2, а) максимальный потенциальный ресурс по скорости окисления установлен для масла МС-20 (кривая 2). Предельной кинема-

тической вязкости 35 % достигли масла ТСзп-8 (кривая 1) при 52 ч испытания и МТ-8п при 108 ч. Максимальная испаряемость установлена для масла ТСзп-8 (рисунок 4.3, *а* кривая 1), а минимальная для масла МС-20 (рисунок 4.3, *а* кривая 2). Самый высокий коэффициент термоокислительной стабильности установлен для масла МС-20 (рисунок 4.3, *б* кривая 2), а самый низкий – для масла ТСзп-8 (рисунок 4.3, *б* кривая 1). Из представленных данных видим, что применение масла МС-20 более эффективно.

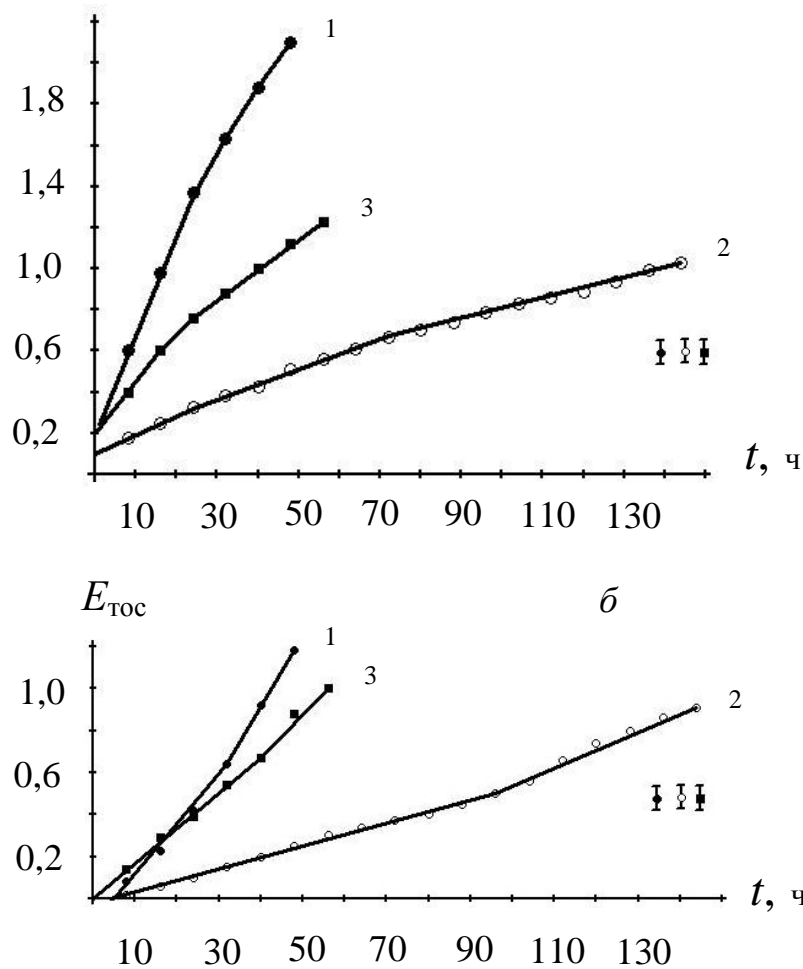


Рисунок 4.3 – Зависимости испаряемости  $G$  (*а*) и коэффициента термоокислительной стабильности  $E_{\text{ТОС}}$  (*б*) от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Второй метод контроля потенциального ресурса трансмиссионных масел (альтернативный) заключается в применении коэффициента сопротивления окис-

лению  $R_o$ , который определяется по формуле

$$R_o = 1 - \frac{K_{II} \times K_G}{K_{II} + K_G} \quad (4.6)$$

Данный коэффициент определяется при тех же параметрах и средствах контроля и испытания, что и коэффициент термоокислительной стабильности, только время испытания составляет 40 ч. Результаты испытания минеральных трансмиссионных масел представлены на рисунке 4.4, откуда видим, что наименьший коэффициент сопротивляемости масел окислению 0,96 ед., как альтернативный показатель качества, учитывающий процессы окисления и испарения, установлен для масла МС-20 за 40 ч испытания.

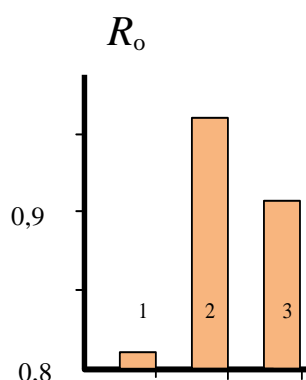


Рисунок 4.4 – Диаграммы коэффициента сопротивления окислению минеральных трансмиссионных масел после 40 ч испытания: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Технология определения остаточного ресурса для работающих масел определяется по той же технологии, что и товарных масел, но время испытания составляет 8 ч. Остаточный ресурс устанавливается по величине изменения коэффициента поглощения светового потока после термостатирования масла по отношению к коэффициенту  $K_{II}$  отобранной пробы и изменению кинематической вязкости масла после термостатирования к вязкости товарного масла и вязкости исходной пробы. Эти показатели сравниваются с предельными значениями, ранее

установленными для данного масла. Разность между предельным значением коэффициента поглощения светового потока и его значения для пробы масла, отобранного из агрегата трансмиссии, определяет остаточный ресурс исследуемого масла, а разность между предельным значением коэффициента поглощения светового потока и значением, полученным после термостатирования испытуемого масла, определяет сроки достижения предельного состояния. Так, если эта разность будет отрицательная, т. е. после термостатирования коэффициент поглощения светового потока будет больше предельного значения состояния масла, то необходимо планировать ближайшую замену масла. В том случае, когда после термостатирования масла коэффициент поглощения светового потока будет меньше предельного значения, то исследуемое масло допускается к дальнейшей эксплуатации.

Такой подход к контролю текущего значения состояния трансмиссионных масел позволяет совершенствовать систему планирования замены масел и повысить эффективность их использования.

#### **4.1.5 Технология контроля сопротивляемости окислению товарных трансмиссионных масел**

При выборе трансмиссионных масел для конкретных агрегатов конструкторам и технологам необходимо знать, как изменяется их сопротивляемость старению в процессе эксплуатации. Для получения такой информации применяются следующие средства контроля: – прибор для термостатирования масел, фотометрическое устройство и электронные весы.

Реализация технологии осуществляется следующим образом. Проба товарного масла заливается в стеклянный стакан массой  $100 \pm$  г и термостатируется при температуре  $150^{\circ}\text{C}$  с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. в течение 8 ч. После этого проба окисленного масла взвешивается, определяется масса испарившегося масла и вычисляется по формуле (4.4) коэффициент испаряемости. Затем отбирается часть пробы окисленного масла для

прямого фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока при толщине фотометрируемого слоя толщиной 2 мм и вычисляется значение коэффициента сопротивляемости окислению по формуле (4.6). Испытания продолжают до достижения коэффициента поглощения светового потока значений 0,75 – 0,8 ед. После этого строят графические зависимости коэффициента сопротивления окислению исследуемого масла от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 4.5), по которым осуществляется сравнение исследуемых масел и производится выбор масел с большим сопротивлением окислению, что обеспечивает максимальный ресурс масла при эксплуатации агрегатов трансмиссии и снижает эксплуатационные затраты.

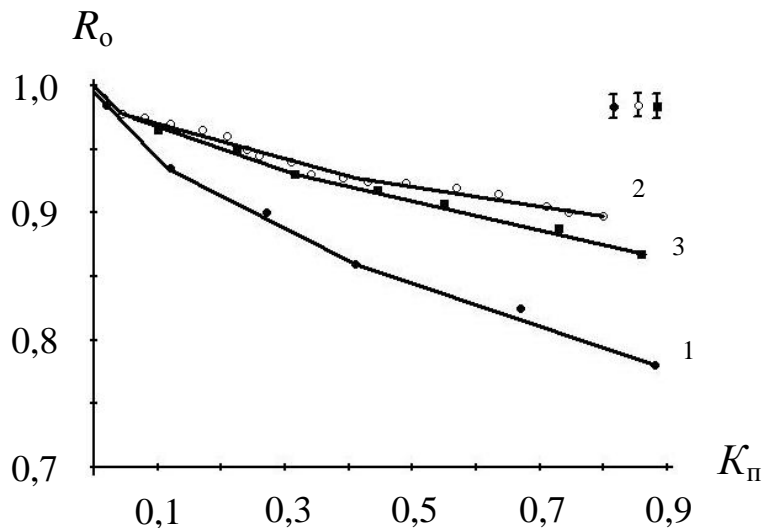


Рисунок 4.5 – Зависимости коэффициента сопротивляемости окислению от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – ТСЗп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Сравнение масел по коэффициенту сопротивляемости окислению осуществляется при любых значениях коэффициента поглощения светового потока. Например, при коэффициенте поглощения светового потока  $K_{\text{П}} = 0,7$  ед., сопротивляемость масла ТСЗп-8 равна 0,8 ед., а масла МС-20 – 0,9 ед., т. е. сопротивляемость масла МС-20 в 1,12 раза выше, чем масла ТСЗп-8.

#### **4.1.6 Технология контроля температуры начала процессов окисления и испарения трансмиссионных масел**

При выборе трансмиссионных масел для различных агрегатов трансмиссии, работающих при различных режимах и условиях эксплуатации, важно знать температуру начала процессов окисления и испарения. Для реализации технологии контроля за температурой применяются следующие средства: прибор для термостатирования масел, фотометрическое устройство, электронные весы. Термостатирование масел производится по технологии, описанной в подразделе 4.1.5, с той лишь разницей, что температура термостатирования изменяется каждые 8 ч в диапазоне повышения через 10 °С от 100 до 150 °С и понижения от 150 до 100 °С. Продолжительность термостатирования определяется временем достижения коэффициента поглощения светового потока значений 0,75 – 0,8 ед. По полученным данным коэффициента поглощения светового потока и испаряемости строят графические зависимости от времени и температуры термостатирования. По данным зависимостям определяются температуры, при которых коэффициент поглощения светового потока и испаряемость стабилизируются, что и будет соответствовать температурам начала окисления и испарения. В случаях если эти показатели стабилизируются при значениях двух или более температур, выбирается бóльшая из них.

#### **4.1.7 Технология контроля состояния работающих трансмиссионных масел парка машин**

Данная технология контроля применяется в условиях предприятий, эксплуатирующих или содержащих технику на длительном хранении. Для реализации данной технологии необходимо:

1. Определить количество техники, в которой используются агрегаты трансмиссии с одинаковым смазочным материалом.

2. Предварительно провести исследование по определению предельного состояния для каждого сорта масла.
3. Зашифровать каждый механизм для введения данных контроля в вычислительную технику.
4. Разработать программу введения экспериментальных данных контроля по каждому механизму и в целом по парку машин.

Технология контроля предусматривает применение следующих средств измерения и испытания: прибора для термостатирования масел, малообъемного вискозиметра, фотометрического устройства, центрифуги и электронных весов. Процесс контроля парка машин начинается отбором проб из агрегатов трансмиссий после небольшого пробега техники в объеме 200 мл. Показателями состояния работающих трансмиссионных масел приняты: коэффициент поглощения светового потока, характеризующий концентрацию в масле общих продуктов старения; кинематическая вязкость, не превышающая значение вязкости товарного масла на +35 %.: –20 %. После центрифугирования отработанных масел в течение 1 ч путем фотометрирования верхнего слоя отцентрифугированной пробы определяется коэффициент поглощения светового потока  $K_{пр}$ , характеризующий концентрацию в работающем масле растворимых продуктов старения. Разность между концентрациями общих и растворимых продуктов старения определяет концентрацию нерастворимых продуктов старения, которая оказывает основное влияние на снижение качества масла и его ресурс.

Термостатирование отработанных масел при температуре 120 °С с перемешиванием в течение 20 мин. (подраздел 4.1.2) позволяет определить концентрацию легких фракций и воды в масле и характеризует герметичность (износ уплотнений) агрегатов трансмиссий, а термостатирование пробы при температуре 150 °С в течение 8 ч позволяет вычислить коэффициент сопротивляемости работающих масел старению, по которому определяется остаточный ресурс и время очередного анализа.

Применение магнитного сепаратора предоставляет возможность контролировать концентрацию ферромагнитных частиц в работающем масле и



оценить интенсивность изнашивания элементов трансмиссии.

По полученным экспериментальным данным строят графические зависимости каждого из представленных показателей от времени эксплуатации с целью анализа их изменения в процессе эксплуатации техники и кривая распределения их от количества машин, что позволяет определить состояние масел в технике по парку машин, определить количество машин, в которых необходима замена масел, устранить причины разгерметизации трансмиссии, оценить темп износа элементов трансмиссии, планировать объем поставки трансмиссионных масел для осуществления замены. В целом организация текущего контроля состояния трансмиссионных масел с применением описанных в главе 2 средств контроля позволяет повысить эффективность использования трансмиссионных масел и надежность агрегатов трансмиссий, получить полную информацию о состоянии масел парка машин и принимать правильные и своевременные решения по устранению неисправностей.

#### **4.2 Технология контроля сопротивляемости старению работающих трансмиссионных масел**

Данная технология используется для обоснования предельного состояния трансмиссионных масел, применяемых на данном предприятии, что позволяет измерить остаточный ресурс и установить сроки замены масел. Обоснование предельного состояния производится по кинематической вязкости, измеренной при 100 °С, концентрации феррочастиц, концентрации воды и легких фракций в масле, сопротивляемости старению, противоизносным свойствам, концентрации общих продуктов старения и электропроводности фрикционного контакта в условиях упругих деформаций.

Для реализации предлагаемой технологии применяются следующие средства измерений и испытаний: прибор для термостатирования масел; фотометрическое устройство и электронные весы. Проба работавшего масла массой 100 г заливается в стеклянный стакан прибора для термостатирования и термостатируется при

температуре 150 °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. в течение 8 ч. После термостатирования проба взвешивается, определяется масса испарившегося масла и вычисляется коэффициент испаряемости по формуле (4.4). Отбирается часть пробы для прямого фотометрирования при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм и вычисляется коэффициент сопротивления старению по формуле (4.6). Значение данного коэффициента сравнивается с предельным значениям этого показателя и определяется остаточный ресурс по формуле

$$P_{\text{ост}} = \frac{R_{\text{сп}} - R_{\text{изм}}}{R_{\text{сп}}} \cdot 100\%, \quad (4.7)$$

где  $P_{\text{ост}}$  – остаточный ресурс, %;  $R_{\text{сп}}$  – предельное значение коэффициента сопротивления старению, ед.;  $R_{\text{изм}}$  – вычисленное значение коэффициента сопротивления старению после испытания масла, ед.

Зная отработанный маслом ресурс можно определить допустимое время работы испытуемого масла. Например, остаточный ресурс составляет 10 % т. е. масло отработало 90 % ресурса или 1 000 ч, тогда остаточный ресурс будет определяться пропорцией и составит 111 ч работы.

Данная технология позволяет совершенствовать систему планирования, текущего контроля и своевременно осуществлять замену отработанных масел.

### **4.3 Технология контроля противоизносных свойств товарных и работающих трансмиссионных масел**

В наше время проблема повышения износостойкости деталей машин не теряет своей актуальности. Несмотря на постоянное совершенствование конструкции машин и агрегатов, технологий их производства вопросы износостойкости деталей машин во многом еще не решены и находятся в центре

внимания конструкторов, технологов и эксплуатационников. Сложность решения этой проблемы заключается в том, что износостойкость материалов пар трения не постоянная величина для данного материала, а определяется его исходной структурой, составом текстурированного слоя, образующегося на поверхностях трения при изнашивании, а также свойствами граничных слоев. Поэтому при выборе материалов пар трения необходимо учитывать их совместимость и приспособляемость друг к другу в зависимости от изменения свойств смазочного материала [151, 155–161].

Смазочный материал в любой трибосистеме используется для снижения коэффициента трения, отвода тепла с поверхности трения и уноса частиц износа из зоны трения. В процессе работы механизмов масла подвергаются интенсивному перемешиванию, что способствует их контакту с кислородом воздуха, транспортированию его к поверхностям трения и окислению. Более интенсивно окислительные процессы протекают на поверхности трения, в тонких смазочных слоях вследствие повышенных температур.

Современные смазочные масла включают базовую основу, легированную комплектом присадок, улучшающих антиокислительные, моющие, диспергирующие, противоизносные, депрессорные и противозадирные свойства. Наличие такого количества свойств, выполняющих определенные функции и изменяющихся в процессе эксплуатации техники, а также отсутствие на предприятиях, эксплуатирующих технику и оборудование средств контроля, усложняют решение задач по оценке качества смазочных масел и их ресурса.

Смазочные свойства масел зависят от температурных условий, особенно их способность химически модифицировать поверхности трения. В этот период наблюдается стабилизация коэффициента трения и наступает равновесие скоростей образования и разрушения модифицированных (защитных) граничных слоев на поверхностях трения [152, 153].

На процесс загрязнения трансмиссионных масел оказывают влияние виды изнашивания. Так, наряду с частицами износа в масле накапливаются различные соединения металлов в результате коррозионно-механического изнашивания, при-

чем интенсивность загрязнения зависит от уровня поляризации зоны трения, что усиливает электрохимическую коррозию металлов [154].

Предлагаемая технология контроля предназначена для оценки противоизносных свойств как товарных, так и работающих масел и является общей. Оценка противоизносных свойств производится по методике, описанной в главе 2 и предусматривает определение следующих триботехнических характеристик масел: среднеарифметического значения диаметра пятна износа на трех шарах; среднеарифметической площади пятна износа; критерия противоизносных свойств; продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформаций; электропроводности фрикционного контакта и влияния продуктов окисления или старения на значения вышеперечисленных показателей, а также применяется при обосновании предельного состояния работающих трансмиссионных масел.

Технология предусматривает применение трехшариковой машины трения, оптического микроскопа «Альтами МЕТ1М» и устройства для переточки цилиндра. Техническая характеристика машины трения приведена в разделе 2.

Параметры трения при испытании товарных и работающих трансмиссионных масел приняты постоянными и составляли: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; время испытания – 2 ч.

Для определения электропроводности фрикционного контакта и его зависимости от концентрации продуктов окисления или старения через одну пару трения (шар – цилиндр) пропускался постоянный ток от внешнего источника стабилизированного напряжения 3 В. Влияние продуктов окисления или старения на противоизносные свойства масел оценивалось по отношению к товарному маслу.

Определение триботехнических характеристик товарных трансмиссионных масел заключается в следующем. Проба масла объемом 15 мл заливается в емкость для исследуемого масла, которая крепится к станине корпуса машины трения, при этом цилиндр погружается в масло. На шарнире поднимается и фиксируется термостат, в который погружается емкость с испытуемым маслом. Устанавливается температура испытания с помощью терморегулятора ТРМ-101. Опус-

каются три шара на поверхность цилиндра и задается величина тока (100 мкА), протекающего через фрикционный контакт, затем они поднимаются и с помощью рычагов фиксируются в верхнем положении. Включается нагрев масла и вращение цилиндра. После набора установленной температуры 80 °С запускается на компьютере программа записи величины тока, протекающего через фрикционный контакт, опускаются последовательно шары на цилиндр и прикладывается нагрузка величиной – 13 Н. Продолжительность испытаний составляет 2 ч, после чего шары с нагрузкой фиксируются в верхнем положении, выключается нагрев масла в термостате и останавливается запись диаграммы изменения тока, протекающего через контакт. Шары последовательно откручиваются совместно с оправкой, промываются в бензине, затем в спирте и с помощью оптического микроскопа измеряются наибольший и наименьший диаметр пятна износа, вычисляются средние значения диаметров пятен износа на каждом шаре, а затем среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах.

Триботехнические характеристики товарных трансмиссионных масел по параметру среднеарифметического значения диаметра пятна износа составили: для минеральных масел ТСзп-8 – 0,565 мм; МС-20 – 0,285 мм; МТ-8п – 0,298 мм; Bizol 85W-90GL4 – 0,26 мм; ТНК транс 85W-90GL5 – 0,527 мм; частично синтетических Bizol Hypoid 75W-GL4, GL5 – 0,308 мм; Agip Rotva Fe 75W-80 GL5 – 0,507 мм; и синтетического Bizol Hypoid 75W-90 GL5 – 0,375 мм.

По полученным данным осуществляется предварительный выбор трансмиссионных масел с учетом их сопротивляемости окислению.

Триботехнические характеристики окисленных трансмиссионных масел исследовались после их термостатирования при температуре 150 °С с перемешиванием. После каждых 8 ч испытания проба окисленного масла фотометрировалась для определения коэффициента поглощения светового потока, затем отбиралась проба окисленного масла объемом 15 мл для испытания на трехшариковой машине трения при достижении коэффициента поглощения светового потока значений 0,1; 0,2...0,8 ед. После отбора пробы окисленного масла в

прибор для термостатирования доливалось масло товарное до первоначальной массы  $100 \pm 0,1$  г. Триботехнические характеристики окисленных масел оценивались по среднеарифметическим значениям диаметра пятна износа на трех шарах, критерию противоизносных свойств, времени формирования номинальной площади фрикционного контакта и его электропроводности в области упругих деформаций.

Результаты изменения параметра износа минеральных трансмиссионных масел и критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока приведены на рисунке 4.6.

Анализ результатов контроля минеральных трансмиссионных масел по сопротивляемости окислению (рисунок 4.5) и критерию противоизносных свойств (рисунок 4.6, б) показал, что масло МС-20 характеризуется наибольшим сопротивлением окислению и лучшими противоизносными свойствами, масло ТСЗп-8 показало худшие результаты по термоокислительной стабильности и противоизносным свойствам (рисунок 4.6, б кривая 1). Поэтому, чтобы улучшить термоокислительную стабильность масла ТСЗп-8, его предельную температуру работоспособности необходимо снизить от 150 до 130 °С, тогда его триботехнические характеристики, термоокислительная стабильность и потенциальный ресурс будут превосходить все исследованные масла, а надежность агрегатов трансмиссии, в которых используется данное масло, будет максимальной.

Анализ результатов исследования масла МТ-8п, показал, что предельную температуру его работоспособности следует занижать до 140 °С, что обеспечит увеличение потенциального ресурса, а его противоизносные свойства обеспечат достаточную надежность агрегатов трансмиссий.

Предельной температурой работоспособности масла МС-20 является температура 150 °С, при которой обеспечиваются максимальный потенциальный ресурс, противоизносные свойства и надёжность трансмиссий.

Важными триботехническими характеристиками трансмиссионных масел являются не только параметры износа и величина критерия противоизносных свойств, но и время формирования номинальной площади фрикционного контакта

$t_{\text{фпк}}$ , и его электропроводность, характеризующая кислотность масла и его способность формировать на поверхностях трения защитные граничные слои, представляющие комплексные соединения металлов с органическими кислотами, повышающими нагрузку схватывания.

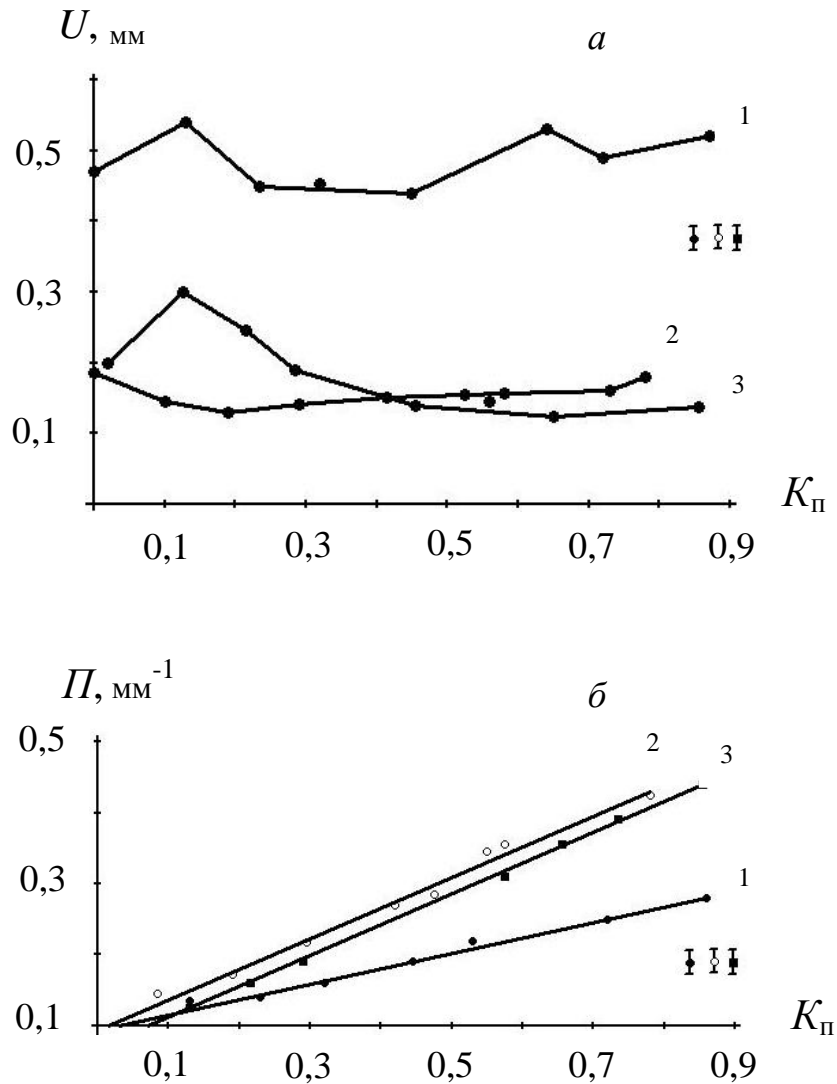


Рисунок 4.6 – Зависимости диаметра пятна износа  $U$  (а) и критерия противозносных свойств  $II$  (б) от коэффициента поглощения светового потока при триботехнических испытаниях минеральных трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Согласно данным на рисунке 4.7, при малых значениях коэффициента поглощения светового потока ( $K_{\text{П}} < 0,2$  ед.), коэффициент электропроводности

фрикционного контакта приобретает значения меньше 0,2 ед. (рисунок 4.7, *a*), а время его формирования (рисунок 4.7, *б*) увеличено, что характеризует образование адсорбционных граничных слоёв, разделяющих поверхности трения.

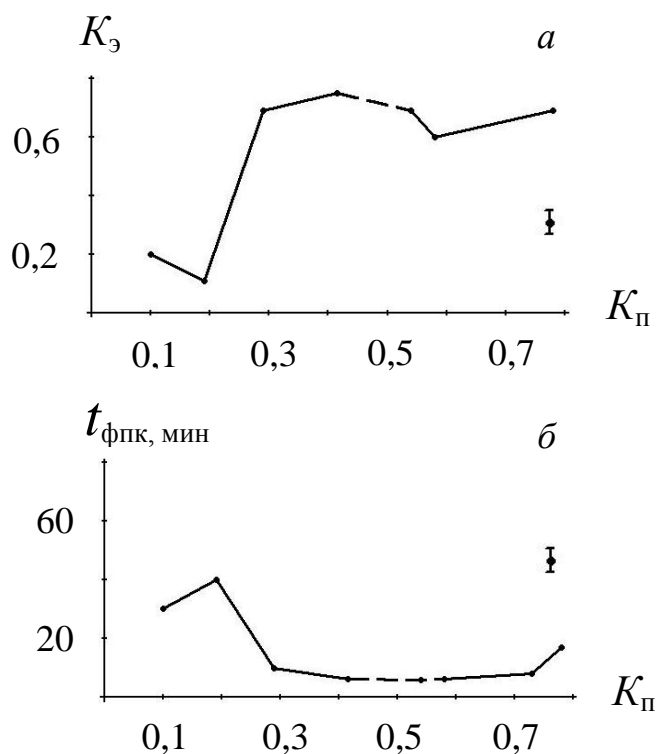


Рисунок 4.7 – Зависимости коэффициента электропроводности фрикционного контакта  $K_э$  (*a*) и времени его формирования  $t_{фпк}$  (*б*) от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МС-20

При увеличении коэффициента поглощения светового потока возрастает кислотность масла, поэтому электропроводность граничного слоя увеличивается, а время формирования фрикционного контакта уменьшается за счет образования на поверхностях трения хемосорбционных граничных слоёв, представляющих собой химические соединения металлической поверхности с органическими кислотами.

Эти данные позволяют обосновать причину высоких противоизносных свойств исследуемых масел, сравнивать их по этим показателям и оценить влияние продуктов окисления на триботехнические характеристики.



#### 4.4 Рекомендации по выбору трансмиссионных масел для трансмиссий

Для обоснованного выбора трансмиссионных масел рекомендуется использовать следующие средства испытания и измерения: прибор для термостатирования масел; фотометрическое устройство; электронные весы; малообъемный вискозиметр; трехшариковую машину трения со схемой «шар – цилиндр»; оптический микроскоп и установку для переточки цилиндров. При испытании масел параметры принимаются постоянными, что обеспечит их объективное сравнение и выбор. Масса пробы для испытания на всех устройствах должна быть постоянной в соответствии с техническими характеристиками средств испытания и контроля.

В качестве показателей для сравнения физико-химических и триботехнических характеристик испытуемых масел принимаются: коэффициент поглощения светового потока; коэффициент относительной вязкости; испаряемость; коэффициент термоокислительной стабильности; коэффициент сопротивления окислению, определяемый после 40 ч термостатирования; потенциальный ресурс; критерий противоизносных свойств после 40 ч термостатирования масел с перемешиванием; время формирования номинальной площади фрикционного контакта и его электропроводность.

По полученным экспериментальным данным строят графические зависимости коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости и испаряемости от времени термостатирования (технология термостатирования представлена в подразделе 4.1.4). По зависимости коэффициента относительной вязкости от времени термостатирования определяют время превышения предельного значения её увеличения (35–40 %) и уменьшения (20 %), которое учитывают при вычислении коэффициента термоокислительной стабильности. Строят графические зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени термостатирования, по которым определяют масла с наименьшей скоростью изменения этого показателя. Коэффициент термоокислительной стабильности учитывает склонность масел к окислению и испарению, поэтому является более объективным, чем коэффициент поглощения светового потока. По данным графичес-

ким зависимостям определяют потенциальный ресурс исследуемых масел, т. е. время достижения значения коэффициента термоокислительной стабильности, например, 0,8 ед.

Для снижения трудоемкости определения термоокислительной стабильности исследуемых масел можно использовать коэффициент сопротивляемости окислению, учитывающий как изменение оптических свойств, так и испаряемости масел за 40 ч испытания.

Триботехнические характеристики трансмиссионных масел предложено контролировать по критерию противоизносных свойств, определяемому отношением коэффициента поглощения светового потока к среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах или площади пятна износа на трех шарах, характеризующим концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта. Причем чем выше значение критерия, тем выше противоизносные свойства исследуемого масла. Изменение критерия противоизносных свойств можно оценивать по его зависимости от коэффициента поглощения светового потока или определять после 40 ч термостатирования масла с последующими испытаниями на машине трения.

Такие триботехнические характеристики трансмиссионных масел, как время формирования номинальной площади фрикционного контакта и его электропроводность, определяют для оценки влияния продуктов окисления на эти показатели и склонности масел к образованию на поверхностях трения комплексных соединений металла с органическими кислотами и их прочности соединения с основой металла. Эти комплексные соединения увеличивают нагрузки схватывания.

В том случае, если масла термостатировались при температуре 150 °С, то для выбора их следует использовать лучшие показатели термоокислительной стабильности и противоизносных свойств, а если масла показали худшие результаты, их необходимо разделить на две группы в соответствии со значениями этих показателей и установить предельные температуры их работоспособности при 140, 130 и 120 °С, что повысит их термоокислительную стабильность, потенциальный ресурс и противоизносные свойства.

#### 4.5 Рекомендации по классификации трансмиссионных масел

Многообразие вырабатываемых промышленностью трансмиссионных масел, предназначенных для разнообразной техники, требует их классификации для обоснованного принятия решения вопроса выбора сорта масла для данной конструкции трансмиссии. В ГОСТ 17479.2 – 85, отражена отечественная классификация в котором предусматривается, в зависимости от уровня кинематической вязкости при 100 °С, разделение трансмиссионных масел на четыре класса, а в зависимости от эксплуатационных свойств и возможных областей применения на 5 групп: ТМ-1–ТМ-5, учитывающих уровень напряженности работы трансмиссии и температуру масла в объеме. Так, к группе ТМ-1 относятся передачи, работающие при контактных напряжениях от 900 до 1 600 МПа и температуре масла в объеме до 90 °С:

ТМ-2 – контактное напряжение до 2 100 МПа, температура до 130 °С;

ТМ-3 – контактное напряжение до 2 500 МПа, температура до 150 °С;

ТМ-4 – контактное напряжение до 3 000 МПа, температура до 150 °С;

ТМ-5 – контактное напряжение выше 3 000 МПа, температура до 150 °С.

Классификация трансмиссионных масел по ГОСТ 17479.2 – 85 соответствует классификации по API GL1- GL5.

Применение фотометрического метода контроля термоокислительной стабильности и установления эмпирической связи концентрации продуктов окисления с противоизносными свойствами трансмиссионных масел позволяет выдвинуть альтернативный метод их классификации, учитывающий температурные условия, определяемые коэффициентом сопротивления окислению  $R_o$ , и триботехнические характеристики окисленных масел по критерию противоизносных свойств.

На рисунке 4.8 представлены зависимости коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока при испытании трансмиссионных масел при температуре 150 °С. Классификация масел основана

на определении значения коэффициента сопротивления окислению при значении коэффициента поглощения светового потока равного, например, 0,7 ед.

При значениях коэффициента сопротивления окислению больше 0,9 ед. эти масла могут работать при температуре 150 °С и соответствуют группе эксплуатационных свойств ТМ-5 (GL5). К этой группе относятся масла: 2 – МС-20; 4 – Bizol 80W- 90GL4; 5 – Bizol Hypoid 75W- 90 GL4, GL5 и 6 – Bizol Hypoid 75W-90 GL5.

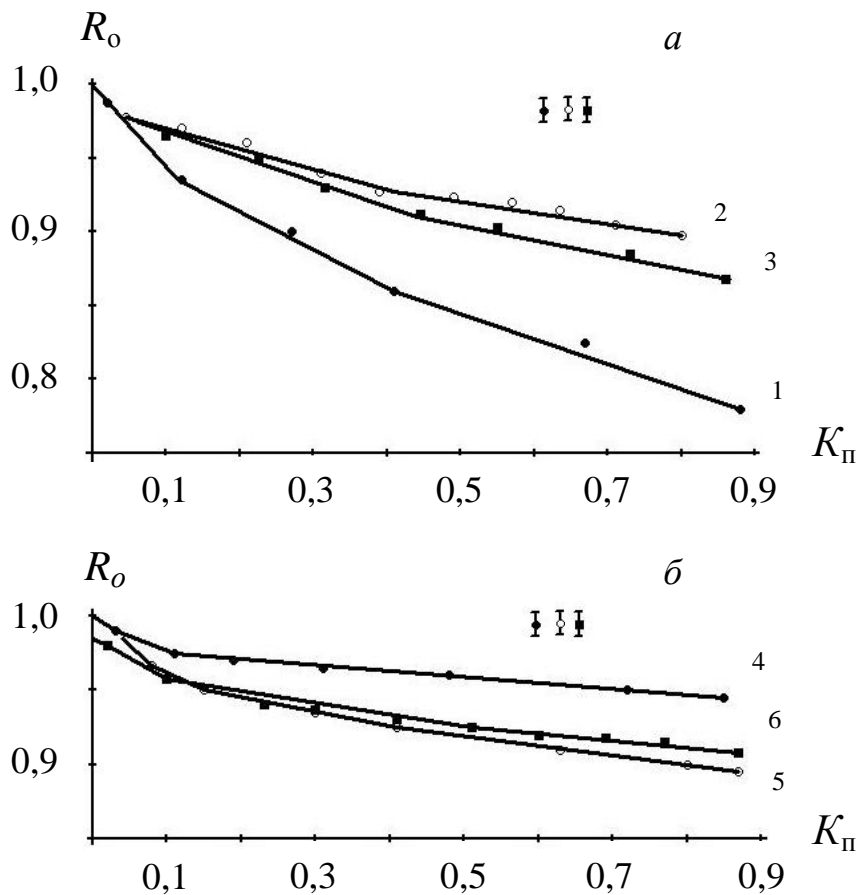


Рисунок 4.8 – Зависимости коэффициента сопротивлению окислению от коэффициента поглощения светового потока при испытании трансмиссионных масел при температуре 150 °С: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п; 4 – Bizol 80W-90 GL4; 5 – Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 6 – Bizol Hypoid 75W-90 GL5

В маслах, в которых коэффициент сопротивляемости окислению изменяется от 0,9 до 0,85 ед. (МТ-8п), должны относиться к группе ТМ-4 (GL4), в которой предельная температура их работоспособности не превышает 140 °С, что обеспечивает увеличение потенциального ресурса и замедление скорости окисления.

Масла, в которых коэффициент сопротивления окислению изменяется в пределах от 0,85 до 0,8 ед. (ТСзп-8), должны относиться к группе эксплуатационных свойств ТМ-3.

Классификацию масел по уровню напряженности работы трансмиссий и группам эксплуатационных свойств предложено производить используя значения критерия противоизносных свойств  $\Pi$ , определяемые при коэффициенте поглощения светового потока равном 0,7 ед. (рисунок 4.9).

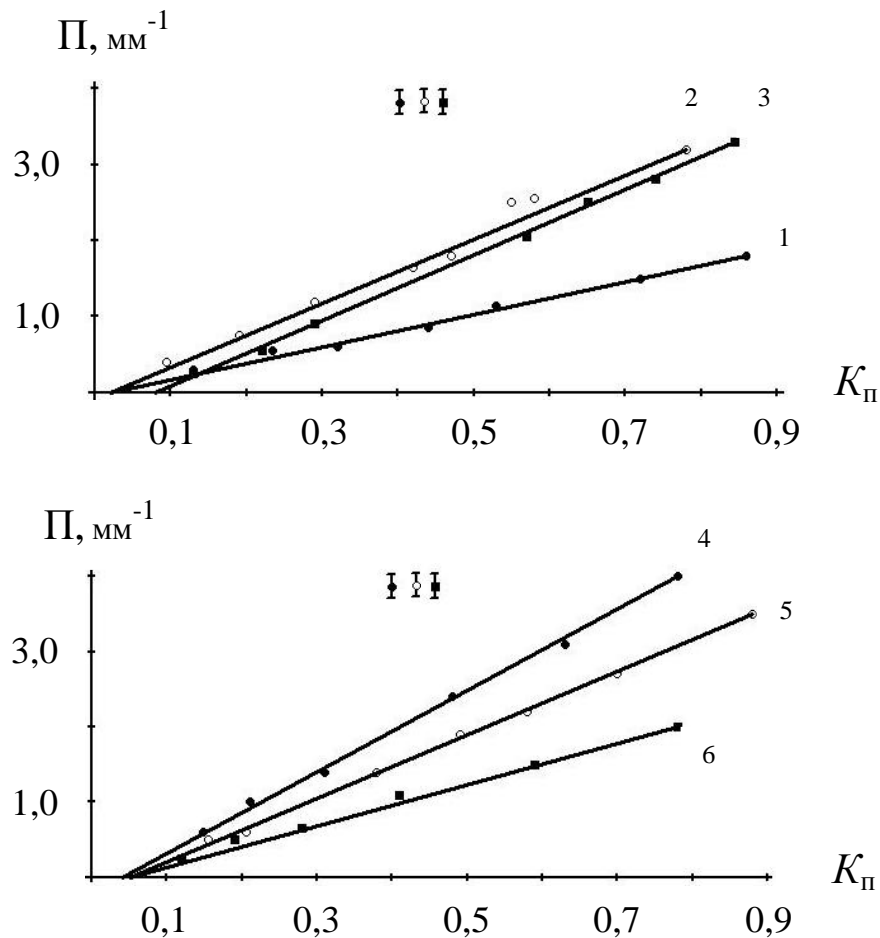


Рисунок 4.9 – Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п; 4 – Bizol 80W-90 GL4; 5 – Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 6 – Bizol Hypoid 75W-90 GL5

Так, если данный критерий равен или больше  $3 \text{ мм}^{-1}$ , данные масла относятся к группе ТМ-5 (GL5). К этой группе относятся масла МС-20 и Bizol 80W-90 (GL4)

(рисунок 4.9, кривые 2, 4). При значении критерия противоизносных свойств, изменяющихся в пределах от 2 до 3  $\text{мм}^{-1}$ , данные масла относятся к группе ТМ-4. К этой группе относятся масла МТ-8п и частично синтетическое Vizol Nupoid 75W-90 GL4, GL5 (рисунок 4.9, кривые 3, 5). При значениях критерия противоизносных свойств, изменяющихся в пределах от 1 до 2  $\text{мм}^{-1}$  масла относятся к группе ТМ-3. К данной группе относятся масла ТСзп-8 и синтетическое Vizol Nupoid 75W-90 GL5 (рисунок 4.9, кривые 1, 6).

Классификация трансмиссионных масел по группам эксплуатационных свойств является основной, так как определяет надежность трансмиссий, однако если коэффициент сопротивляемости окислению значительно низок, а критерий противоизносных свойств высокий, то данное масло классифицируется на одну группу ниже по отношению к критерию противоизносных свойств, что позволит повысить сопротивляемость данного масла окислению, но понизит предельную температуру работоспособности.

Для определения температурной области работоспособности трансмиссионных масел необходимо определить температуры начала процессов окисления и испарения, для этого испытания следует проводить при циклическом изменении температуры в диапазоне от 110 до 150 °С с повышением на 10 °С, а затем с понижением, определением приращения скоростей окисления и испарения. Температуры начала окисления и испарения определяются при нулевых значениях скоростей (см. раздел 3). Предельной температурой работоспособности исследуемого масла назначается температура на 20 °С выше температуры начала процессов окисления и испарения.

#### **4.6 Рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел.**

Данные рекомендации предусматривают применение следующих средств контроля: фотометрическое устройство; центрифуга; малообъемный вискозиметр; электронные весы и магнитный сепаратор и предназначены для проведения теку-

щего контроля состояния работающих трансмиссионных масел и планирования очередного контроля. Эффективность применения разработанных рекомендаций зависит от оснащения предприятий средствами контроля, наличия научно обоснованного предельного состояния масел, применяемых на данном предприятии, и установленных экспериментальных зависимостей критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока, характеризующих концентрацию продуктов старения в масле, что обеспечит прогнозирование сроков замены, определения противоизносных свойств и остаточного ресурса.

При внедрении рекомендаций необходима организация контроля наработки часов каждым механизмом для вычисления остаточного ресурса и службы диагностики с обучением специалистов работе на средствах контроля. Текущий контроль предусматривает экспрессивный анализ, по результатам которого планируются сроки проведения очередного анализа, а для масел, работающих на грани предельных показателей, проведение полного анализа с оценкой их противоизносных свойств, что в целом позволяет создать базу данных по изменению противоизносных свойств масел в летний и зимний периоды эксплуатации техники.

В качестве показателей качества масел при экспресс-анализе приняты: коэффициент поглощения светового потока, характеризующий концентрацию общих продуктов старения в масле; концентрация растворимых и нерастворимых продуктов старения; концентрация ферромагнитных частиц; кинематическая вязкость, измеряемая при 100 °С.

Отбор проб массой 30 г необходимо осуществлять с помощью шприца через заливное отверстие трансмиссии после пробега техники для обеспечения тщательного перемешивания масла в трансмиссии.

Оценка состояния работающих масел по коэффициенту поглощения светового потока позволяет определить противоизносные свойства по значениям эталонной зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока по формуле

$$U = K_{\Pi} / \Pi, \quad (4.8)$$

где  $U$  – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа, мм;  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока;  $\Pi$  – критерий противоизносных свойств,  $\text{мм}^{-1}$ , а также остаточный ресурс  $t_0$  исследуемого масла, вычислив скорость старения масла  $V_c$  за данный период эксплуатации  $t_3$ :

$$V_c = K_{\Pi} / t_3, \quad (4.9)$$

$$t_0 = \frac{(K_{\text{min}} - K_{\Pi})}{V_c}, \quad (4.10)$$

где  $K_{\text{min}}$  – предельное значение коэффициента поглощения светового потока, установленное на основе статистических данных старения масел данного сорта.

По результатам остаточного ресурса планируются сроки проведения очередного анализа, а по кинематической вязкости оценивается состояние работающих масел по сравнению с предельными ее значениями: увеличение не более чем на 35 – 40% или уменьшение на 20 %. При превышении этих значений работавшее масло необходимо заменить.

Основной причиной, снижающей надежность трансмиссий, является наличие в масле нерастворимых продуктов, концентрация которых определяется в процессе фотометрирования масел после их центрифугирования. Если после центрифугирования обнаружена концентрация нерастворимых продуктов старения, необходимо данное масло пропустить через магнитный сепаратор для определения концентрации ферромагнитных частиц: если они обнаружены, то масло вызывает повышенный износ узлов трансмиссии, значит, его необходимо слить и путем фильтрации устранить примеси. В том случае, если ферромагнитные частицы отсутствуют, причиной наличия концентрации нерастворимых продуктов могут быть атмосферные загрязнения, попадающие через уплотнения, или температурные условия эксплуатации превысили допустимые



значения, вызвавшие образование нерастворимых продуктов старения в виде органических смол. В любом случае текущий контроль должен проводиться не более 4 раз за весь период эксплуатации трансмиссионного масла.

Таким образом полученные данные текущего контроля состояния работающих трансмиссионных масел позволяют получить объективную информацию для принятия правильных решений по устранению причин, вызывающих ускоренное изменение физико-химических показателей качества масел, повысить эффективность их использования, совершенствовать систему планирования технического обслуживания и повысить надежность трансмиссий.

### **Выводы по четвертой главе**

1. Практические рекомендации по контролю состояния товарных и работающих трансмиссионных масел включают следующие технологии контроля: состава продуктов старения; концентрации легких фракций и воды в маслах; концентрации продуктов износа; остаточного ресурса; состояния масел парка машин; сопротивляемости масел окислению; противоизносных свойств, позволяющих получить объективную информацию о состоянии масел парка машин, повысить эффективность использования масел, надежность трансмиссий, совершенствовать систему планирования технического обслуживания.

2. Разработанные рекомендации по выбору трансмиссионных масел, их классификации и периодичности контроля состояния работающих масел направлены на получение объективной информации для эксплуатационников, технологов, конструкторов и химмотологов.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан универсальный метод контроля состояния трансмиссионных масел различной базовой основы, включающий: прямое фотометрирование, центрифугирование, определение показателей термоокислительной стабильности, противоизносных свойств и интенсивности процессов, протекающих при окислении и на поверхностях трения, позволяющий получить дополнительную информацию о состоянии товарных масел, обоснованного их выбора для трансмиссий и оценить текущее состояние рабочих.

2. Получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения процессов окисления товарных трансмиссионных масел различной базовой основы при статической и циклически изменяющейся температурах, на основании которых установлено, что процессы окисления протекают последовательно с образованием первичных продуктов окисления, переходящих во вторичные с бóльшей оптической плотностью, что вызывает явление перераспределения тепловой энергии между этими продуктами и испарением, оцениваемое коэффициентом интенсивности процессов самоорганизации. Циклическое изменение температуры испытания позволяет определить температуры начала процессов окисления и испарения, обосновать принадлежность масел к группам эксплуатационных свойств.

3. Предложен критерий термоокислительной стабильности, учитывающий оптические свойства и испаряемость масел при окислении, и альтернативный критерий, характеризующий сопротивляемость окислению и испарению, позволяющий определить температурную область работоспособности, и альтернативный критерий противоизносных свойств, учитывающий концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта и определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к площади контакта или среднеарифметическому значению диаметра пятна износа, позволяющий осуществлять обоснованный выбор масел в зависимости от степени нагруженности

трансмиссий и совершенствовать систему классификации по группам эксплуатационных свойств.

4. Применение электрометрического метода контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте, позволило обосновать целесообразность применения дополнительных показаний триботехнических характеристик масел, включающих: продолжительность пластических, упругопластических и упругих деформаций, электропроводность фрикционного контакта и время его формирования, коэффициент интенсивности механохимических процессов, позволяющих оценить влияние механической и химической составляющих на изнашивание.

6. Разработаны практические рекомендации, включающие технологию контроля: состояния трансмиссионных масел по составу продуктов окисления (старения); концентрации легких фракций и воды и продуктов износа; потенциального ресурса товарных и остаточного ресурса работающих масел; сопротивляемости окислению; температуры начала процессов окисления и испарения; состояния работающих масел парка машин; противоизносных свойств; рекомендации по выбору трансмиссионных масел; и их классификации; рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел парка машин. Технологии и рекомендации апробированы на базе хранения танков (пос. Козулька, Красноярский край).

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Павлов, М.В. Отечественные бронированные машины 1945 – 1965 / М.В. Павлов // Т и В. – 2008. № 5 – 9, 11, 12.
2. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справ. / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А. Бнатов и др; под ред. В.М. Школьников. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596 с.
3. Коулмен, В. Расчет конических и гипоидных зубчатых колес на заедание / В. Коулмен // Экспресс-информация. Сер. Детали машин – 1966. – № 37.
4. Рыбак, Б.М. Анализ нефтей и нефтепродуктов / Б.М. Рыбак – М. : Гостопиздат, 1962. – 880 с.
5. ГОСТ 25371–97. Нефтепродукты. Расчет индекса вязкости по кинетической вязкости.
6. Папок, К.К. Словарь по топливам, маслам, смазкам, присадкам и спецжидкостям / К.К. Папок, Н.А. Рогозин. – М. : Химия, 1975. – 392 с.
7. Климов, К.И. Трансмиссионные масла / К.И. Климов, Г.Н. Кичкин. – М. : Химия, 1970. – 250 с.
8. Трение, изнашивание и смазка : справ. : в 2 кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
9. Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г.И. Фукс. – М. : Машгиз, 1953. – 654 с.
10. Шрам, В.Г. Метод контроля влияния температуры и механической нагрузки на триботехнические свойства моторных масел : Автореф. дис...канд. техн. наук / В.Г. Шрам. – Томск, 2014. – 21 с.
11. Петров, О.Н. Метод контроля влияния продуктов деструкции смазочных масел и электрического потенциала на противоизносные свойства : Автореф. дис...канд. техн. наук / О.Н. Петров. – Томск, 2013. – 20 с.
12. Детали машин : справ.: в 2 кн. Кн.1 / под ред. Н.С. Ачеркана. – М. : Машгиз, 1953. – 654 с.

13. Часовщиков, Л.Д. Передачи зацепления / Л.Д. Часовщиков. – М. : Машиностроение, 1969. – 487 с.
14. Чичинадзе, А.В. Диаграмма переходов и экранирующее действие смазочного слоя / А.В. Чичинадзе, И.А. Буяновский, Б.Э. Гурский // Трение и износ. – 2002. – № 3 (23). – С. 334 – 340.
15. Семенов, А.П. О теории схватывания металлов / А.П. Семенов // Теория трения и изнашивания : сб. тр. – М.: Наука, 1965. – С.164 – 170.
16. Виноградов, Г.В. Условия и виды заедания при трении закаленной стали в углеродных смазочных средах / Г.В. Виноградов, Ю.Я. Подпольский, Н.В. Карелова // Машиностроение. –1965. – № 5. – С.109– 114.
17. Крагельский, И.В. О природе заедания при сухом и граничном трении / И.В. Крагельский, Н.М. Алексеев, Л.Е. Фисун // Трение и износ. – 1980. – № 2. – С.197 – 208.
18. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев : Техника, 1970.
19. Кащеев, В.Н. К вопросу об изнашивании стали в условиях интенсивного схватывания / В.Н. Кащеев // ФХММ. – 1969. – № 4. – С. 21 – 30.
20. Марков, Д.П. Адгезионно-инициируемые типы катастрофического изнашивания / Д.П. Марков, Д. Келли // Трение и износ. – 2002. – № 5. (23). – С. 483 – 493.
21. Владимиров, В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М. : Metallurgy, 1984.
22. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушения металлов / В.В. Рыбин. – М.: Metallurgy, 1986.
23. Гарбар, И.И. О структуре и строении поверхностных слоев сопряженных трущихся пар / И.И. Гарбар // Трение и износ. – 1990. – Т.11. (№ 4). – С. 581 – 593.
24. Жарин, А.Л. Определение характеристик усталостного разрушения материалов при трении скольжения. 4.1. Анализ методов / А.Л. Жарин, Н.А. Шипица, Д.И. Сорока // Трение и износ. – 2001. – № 4 (22). – С. 410 – 414.

25. Справочник по триботехнике : В 2т. Т.1 / под ред. М. Хебди, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение; Варшава : ВКЛ, 1989.
26. Методика расчетной оценки износостойких поверхностей трения деталей машин. – М. : Изд-во стандартов, 1979.
27. Журков, С.Н. Временная зависимость прочности твердого тела / С.Н. Журков // Журнал технической физики. – 1953. – Вып. 10 (23). – С. 1677 – 1689.
28. Кудши, Н.Н. Статическая модель контактной усталости шероховатых тел / Н.Н. Кудши // Трение и износ. – 1991. – № 2 (12). – С. 197 – 203.
29. Крагельский, И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добыгин, В.С. Камбалов. – М. : Машиностроение, 1977.
30. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск : Высш. шк., 1999.
31. Марченко, Е.А. Циклический характер накопления искажений II рода в поверхностном слое как физическое подтверждение усталостной природы износа / Е.А. Марченко, Е.Ф. Непомнящий, Г.М. Хараг // Доклады АН СССР. – 1968. – № 5 (181). – С. 1103 – 1104.
32. Марченко, Е.А. О закономерностях образования микротрещин в поверхностных слоях металлов в условиях трения при пластическом контакте / Е.А. Марченко, Г.М. Хараг // Доклады АН СССР. – 1976. – № 4 (231). – С. 835 – 837.
33. Марченко, Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении / Е.А. Марченко. – М. : Наука, 1979.
34. Алексеев, Н.М. Основные закономерности усталостного разрушения фрикционного контакта / Н.М. Алексеев, А.В. Блюмен, А.М. Шапиро // Механика. – 1986. – № 7 (5). – С. 45 – 51.
35. Ковальский, Б.И. Электрометрический метод контроля механохимических процессов при граничном трении скольжения / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, О.Н. Петров. Сб. научн. тр. 10-й межд. конф. «Трибология и надежность». – СПб, 2010.

36. Жарин, А.Л. Определение характеристик усталостного разрушения материалов при трении скольжения: В 2 ч. Ч. 2. Периодические изменения работы выхода электрона трущейся поверхности как параметр усталостного разрушения при трении / Л.А. Жарин, Н.А. Шипица, Д.Н. Сорока // Трение и износ. – 2001. – № 5 (22). – С. 535 – 539.
37. Гаркунов, Д.Н. О связи окислительно-восстановительных реакций в парах трения с контактной разностью потенциалов / Д.Н. Гаркунов, А.А. Марков, Г.А. Голиков // Теория смазочного действия и новые материалы. – М. : Наука, 1966. – С. 12 – 17.
38. Matveevsky R.M The effect of nature of friction surfaces and librikant on the absorption and temperature stability of lubricant layers / R.M. Matveevsky, A.B. Vipper, A.A. Markov // wear, 1977 (45). P.143 – 150.
39. Марков, А.А. Измерение работы выхода электрона при трении / А.А. Марков // Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. – М. : Наука, 1973. – С. 28 – 34.
40. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А.Л. Жарин. – Минск : Репринт, 1966. – 240с.
41. Жарин, А.Л. Метод непрерывного контроля процессов трения / А.Л. Жарин // Трение и износ. – 1993. – № 3 (14). – С. 570 – 582.
42. Жарин, А.Л. Влияние контактных напряжений на величину работы выхода электрона поверхностей / А.Л. Жарин, Е.И.Фишбейн, Н.А. Шипица // Трение и износ. – 1995. – № 3 (16). – С. 489 – 503.
43. Мельников, В.Г. Влияние параметров трения на энергию активации трибохимического разложения смазочных материалов в зоне трения качения / В.Г. Мельников // Трение и износ. –2001. – № 5 (22). – С. 567 – 573.
44. Климов, К.И. Антифрикционные пластичные смазки / К.И. Климов. – М. : Химия, 1980.
45. Сосулина, Л.Н. Исследование состава продуктов триботехнических превращений пластичных смазок в условиях трения качения / Л.Н. Сосулина, Т.Г. Скрябина // Трение и износ. – 1984. – № 5 (5). – С. 923 – 929.

46. Сосулина, Л.Н. Состояние рабочей и резервной смазки в шарикоподшипнике при повышенных рабочих температурах / Л.Н. Сосулина, Н.К. Волобуев, Т.Г. Скрябина // Трение и износ. – 1984. – № 6 (5). – С. 1130 – 1134.
47. Буяновский, И.А. К применению кинетического подхода для описания процесса граничной смазки / И.А. Буяновский // Трение и износ. – 2003. – № 3 (24). – С. 313 – 321.
48. Буяновский, И.А. Граничная смазка: Этапы развития трибологии / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина. М. : Нефть и газ, 2002.
49. Климов, К.И. Противозадирные свойства масел. Функция скорости их разложения в зоне трения / К.И. Климов // Доклады АН СССР. – 1966. – № 1 (167). – С. 45 – 48.
50. Буяновский, И.А. К оценке нижних температурных пределов действия химически активных присадок / И.А. Буяновский // Трение и износ. – 1981. – № 4 (2). – С. 702 – 706.
51. Кончиц, В.В. Смазочные свойства органических отложений на поверхностях трения при повышенной температуре / В.В. Кончиц, С.В. Короткевич, С.Д. Саутин // Трение и износ. – 2003. – № 8 (23). – С. 170 – 175.
52. Кончиц, В.В. Смазка скользящих электромеханических переключателей / В.В. Кончиц, Ю.Е. Кирпиченко, Г.А. Польщиков // Трение и износ. – 1992. – № 3 (13). – С. 451 – 459.
53. Shinshi A. Electric contact surface of Pd-plated metal in organic gas / air atmosphere / A. Shinshi, Y. Imada, F. Honda, K. Nasajima // Wear, 1999 (230). P. 78–85.
54. Кончиц, В.В. Особенности формирования и физические свойства смазочных слоев на стали при повышенных температурах / В.В. Кончиц и др. // Трение и износ. – 2000. – № 2 (21). – С. 513 – 526.
55. Гершман, И.С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И.С. Гершман, А.Н. Буше // Трение и износ. – 1995. – № 1 (16). – С. 61 – 69.



56. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, М.Г. Носовский, Л.И. Бершадский. – Киев : Техника, 1976.
57. Гершман, И.С. Самоорганизация вторичных структур при трении / И.С. Гершман, Н.А. Буше, А.Е. Миронов // Трение и износ. – 2003. – № 3 (24). – С. 329 – 334.
58. Кужаров, А.С. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Ч.5. Самоорганизация в условиях граничного трения / А.С. Кужаров, С.Б. Булгаревич, А.А. Кужаров, К. Кравчик // Трение и износ. – 2002. – № 6 (23). – С. 645 – 651.
59. Венцель, С.В. Смазка двигателей внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М. : Машгиз, 1963. – 180 с.
60. Венцель, С.В. Исследование противоизносных свойств масел серии ИГП с помощью пластинчатых насосов / С.В. Венцель, Г.В. Либада // Трение и износ. – 1982. – Т.3. – № 6. – С. 1031 – 1035.
61. Вилькин, В.Ф. Методические основы установления рациональных сроков смены трансмиссионных масел: автореф. дис...канд. техн. наук / В.Ф. Вилькин. – Москва, 1988.– 17 с.
62. Ковальский, Б.И. Термоокислительная стабильность смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Д.Г. Барков // Вестник КГТУ. Вып.20. Транспорт ; под ред. В.И. Пантелеева. – Красноярск : КГТУ, 2000. – С. 132 – 135.
63. Спаньковский, Л. Сложные эфиры как компоненты защищенных трансмиссионных масел : автореф. дис... кандидата техн. наук / Л. Спаньковский– М.: 1992. – 28 с.
64. Коваленко, В.П. Загрязнение и очистка нефтяных масел / В.П. Коваленко. – М. : Химия, 1978. – 302 с.
65. Крабец, И.А. Оценка процесса изнашивания деталей по электрической проводимости пары трения / И.А. Крабец, Н.Н. Кривенко // Проблемы трения и изнашивания : науч. техн. сб. Вып. 17 – Киев : Техника, 1980. – С. 28 – 31.

66. Крагельский, И.В. Экспериментальные исследования эффекта пленочного голодания / И.В. Крагельский, Н.М. Алексеев // Трение и износ. – Т.3. – № 3. С. 485 – 489.
67. Михеев, В.А. Стабильность масел в динамических условиях и эффект последствий / В.А. Михеев, Е.М. Никоноров // Улучшение качества смазочных материалов и присадок: тр. ВНИИ НП, – Вып. XIV – М. : Химия, 1976. – С. 186 – 192.
68. Гарзанов, Е.Г. Техническая диагностика поршневых газоперекачивающих агрегатов по анализу масел / Е.Г. Гарзанов, В.А. Ильин // Трение и износ. – 1982. – Т.3. – № 2. – С. 284 – 289.
69. Маркова, Л.В. Трибодиагностика машин / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин, – Минск : Бел. наука, 2005. – 251 с.
70. Barnes M. Water–The Forgotten Contaminant [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : www. noria.com](http://www.noria.com).
71. Lewand L. Understanding Water in Transformer systems // NETA World Spring. 2002. p.1– 4.
72. U.S.Pat № 5656767, MKN Go № 027/22 Automatic determination of moisture content and lubricant type. R.E.Garvey, A.A.Cavey. 12.08.97.
73. Vaisala. Measuring moisture in oil. P.1. Measuring moisture in oil [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : www vaisala.com](http://www.vaisala.com).
74. Barnes M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy // Practising oil Analysis. Magazine. March 2002.
75. Foster N.S. Detection of trace levels of water in oil by photo acoustic spectroscopy / N.S. Foster, Y.E.Amonette, T. Autrey, Y.Holl sensors and Actuators, 2001. Bd. 77. P.620 – 624.
76. Химическая энциклопедия : 85 т. Т. 4 / ред.кол. : И. Л.Кмунянец и др. [49р.]. – М. : Большая рос. энциклопедия., 1992.
77. ГОСТ 7822-75. Масла нефтяные. Метод определения содержания растворенной воды.

78. Измерения в промышленности : справ. В Зин. Кн. 3. Способы измерения и аппаратура / под ред. П. Профоса. – М. : Metallurgiya, 1990. – 344 с.
79. Johnson J.H. Monitoring of machine wear by used oil analysis // In proc. Inf. Conf // Tribology in the 80's, 1984, NASA Conf. Publication 2300, 1984, P.831 – 853.
80. Westcott V.C. Monitoring of wear in fundamentals of tribology. Cambridge MA. MIT Press, 1978, P.811 – 829.
81. Anderson D.P. Wear particle atlas (revised), Naval Air Eng. Center, Report. NAEC – 92 – 163, 1982 II Burlington : Foxboro Edition, 1982. – 192 P.
82. Bowen R. Tribology international // R. Bower, D. Scon, W. Seifert, V. Westcott. – 1976. vol 9. №3. P.109 – 115.
83. Kleis J. The physiat mechanism of the formation of metal microspheres in the wear process / J. Kleis, U. Muiste, U. Pilvre, H. Vuemois, H. Uetz // Wear. – 1979. vol.53. №1. P. 79 – 85.
84. Росcock, G The observation of spherical debris from a failed soft baking / G. Росcock // Wear. – 1976. vol.38. №1. P. 189 – 191.
85. Диагностика изнашивания смазанных подвижных соединений / Н.К. Мышкин, О.В. Холодилов, Л.В. Маркова, М.С. Семенюк // Трение и износ. – 1986. – Т.6. – № 6. – С. 1091 – 1101.
86. А.С. № 851111 СССР. МКИ G01 J1/04. Фотометрический анализатор / Б.И. Ковальский, Г.М. Сорокин : опубл. 30.07.81. Бюл. № 28.
87. Пат. № 2428677 РФ, МПК G01N 19/02. Устройство для испытания трущихся материалов и масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, О.Н. Петров, В.И. Тихонов : опубл. 10.09.2011. Бюл. № 25.
88. Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л.А. Кондаков. – М. : Транспорт, 1974 – 156 с.
89. Аксенов, А.Ф. Применение авиационных технических жидкостей / А.Ф. Аксенов, А.А. Литвинов. – М. : Транспорт, 1974 – 156 с.
90. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение: справ. / под ред. Б.В. Лосикова. – М. : Химия, 1966. – 776 с.

91. Шишков, И.Н. Авиационные горюче-смазочные материалы и специальные жидкости / И.Н. Шишков, В.Б. Белов. – М. : Транспорт, 1979. – 247 с.
92. ГОСТ 13300–67. Масла моторные. Метод определения коррозионных свойств и окисляемости на установке ПЗЗ.
93. ГОСТ 11063–77. Масла моторные с присадками. Метод определения стабильности по индукционному периоду осадкообразования.
94. Пат. № 2057326 РФ, МКИ G01N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Л.Н. Дервягина, И.А. Кириченко. – Оpubл. 20.03.1992, Бюл. № 9.
95. Пат. № 2199114 РФ, МКИ G01N 33/28. Прибор для оценки эксплуатационных свойств моторных масел / Б.И. Ковальский, Д.Г. Барков, Р.А. Ерашов, С.И. Васильев. – Оpubл. 20.02.2003, Бюл. № 5.
96. Пат. № 2219530 РФ, МКИ G01N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Е.Ю. Янаев. – Оpubл. 20.12.2003, Бюл. № 35.
97. Пат. № 2222012 РФ, МКИ G01N 33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Р.А. Ерашов, и др. – Оpubл. 20.01.2004, Бюл. № 2.
98. Пат. № 2247971 РФ, МКИ G01N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Ю.Н. Безбородов, А.А. Бадьина. – Оpubл. 10.03.2005, Бюл. № 7.
99. Пат. № 2274850 РФ, МКИ G01N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Ю.Н. Безбородов, В.В. Гаврилов.: – Оpubл. 20.04.2006, Бюл. № 11.
100. А.С. 744325 СССР, МКИ G01N 33/28. Прибор для оценки термоокислительной стабильности масел / Е.П. Федоров, Н.Т. Разгоняев, В.В. Горячев, О.А. Запорожская. – 1980. – Бюл. № 24.
101. ГОСТ 18136–72. Масла. Метод определения стабильности против окисления в универсальном приборе.

102. ГОСТ 981–75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления.
103. Пат. № 2318206 РФ, МПК G01N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, В.С. Даниленко, Н.Н. Малышева, Ю.Н. Безбородов.: – опубл. 27.02.2008. – Бюл. № 6.
104. Пат. № 2334976 РФ, МПК G01N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, А.А. Метелица, Ю.Н. Безбородов.: – опубл. 27.09.2008. – Бюл. № 27.
105. Пат. № 2371706 РФ, МПК G01N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Е.А. Вишневская, Ю.Н. Безбородов Н.Н. Малышева.: – опубл. 27.10.2009. – Бюл. № 30.
106. Пат. № 2453832 РФ, МПК G01N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Е.Г. Мальцева, Ю.Н. Безбородов В.С. Янович, А.А. Игнатъев. : – опубл. 20.06.2012. – Бюл. № 17.
107. Пат. № 2485486 РФ, МПК G01N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, А.В. Юдин, В.Г. Шрам, В.С. Янович, М.М. Рунда : – опубл. 20.06.2013. – Бюл. № 17.
108. Пат. № 2408886 РФ, МПК G01N 33/30. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, Н.Н. Игнатъев, Е.Г. Мальцева; – опубл. 10.01.2011. – Бюл. № 1.
109. Пат. № 2528083 РФ. МПК G01N 33/30, G01N 3/56. Способ определения качества смазочных масел / Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, Е.Г. Кравцова; – опубл. 10.09.2014. – Бюл. № 25.
110. Пат. № 2454654 РФ. МПК G01N 3/56, G01N 33/30. Способ определения качества смазочных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева, А.В. Кузьменко, М.М. Рунда, Е.Г. Мальцева; опубл. 27.06.2012. – Бюл. № 18.

111. Пат. № 2222012 РФ. МПК G01N 33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Р.А. Ерашов, Е.Ю. Янаев, А.А. Бадьина ; – опубл. 20.01.2004. – Бюл. № 2.
112. Пат. № 2451293 РФ. МПК G01N 33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, А.В. Юдин, М.М. Рунда; – опубл. 20.05.2012. – Бюл. № 14.
113. Кораблев, С.А. Термоокислительная стабильность частично синтетического трансмиссионного масла Consol транс люкс 75W-90 GL5/ С.А. Кораблев, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева. Вестник Крас ГАУ, вып.3, 2007. – С. 200 – 204.
114. Ананьин, Н.Н. Результаты испытаний на термоокислительную стабильность минерального трансмиссионного масла ТНК Транс ойл 85W-90GL5 / Н.Н. Ананьин, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Р.М. Галиахметов. Материалы межд. научно-техн. конф. «Двигатели 2008», Хабаровск. – 2008. – С. 324 – 330.
115. Ковальский, Б.И. Исследование влияния продуктов окисления на противоизносные свойства минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 / Б.И. Ковальский, В.С. Янович, М.М. Рунда и др.– Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та, № 6 (88). – 2011. – С. 55 – 61.
116. Ковальский Б.И. Влияние продуктов термоокислительной деструкции на противоизносные свойства трансмиссионного масла МТ–8п / Б.И. Ковальский, В.Г. Шрам, А.В. Юдин, М.М. Рунда // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний. – 2013. № 10. – С. 17 – 19.
117. Ковальский, Б.И. Результаты контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел различной базовой основы / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, В.С. Янович, и др. // Контроль. Диагностика, – 2014. – № 4 (190). – С. 74 – 76.
118. Сорокин, Г.М. Применение прямого фотометрирования для оценки работоспособности моторных масел / Г.М. Сорокин, Б.И. Ковальский // Трение и износ.–1984, № 6. – С. 978 – 982.

119. Ковальский, Б.И. Процессы самоорганизации в минеральных моторных маслах при их окислении / Б.И. Ковальский, А.В. Юдин, А.С. Ромашенко и др. // Технология транспорта и хранения нефтепродуктов. – 2011. С. 67 – 71.
120. Ковальский, Б.И. Процессы самоорганизации в частично синтетических моторных маслах при их окислении / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, М.М. Рунда, А.В. Юдин и др. // Технология транспорта и хранения нефтепродуктов. – 2011. С. 64 – 67.
121. Ковальский, Б.И. Влияние сроков хранения масел М16ИХП-3 на термоокислительную стабильность и противоизносные свойства / Б.И. Ковальский, А.В. Юдин, М.М. Рунда, В.С. Янович // Мир нефтепродуктов. – 2012. № 5. – С. 19 – 24.
122. Ковальский, Б.И. Работоспособность смазочных материалов : экспресс-метод и приборы для оценки степени их загрязнения / Б.И. Ковальский, А.С. Савинич, А.С. Мельников // Механизация строительства, 1987. – № 7. – С. 21 – 22.
123. Ковальский Б.И. Термоокислительная стабильность трансмиссионных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Л.А. Фельдман, Н.Н. Малышева. Монография Красноярск : Сиб. Федер. Ун-т, 2011. – 150 с.
124. Безбородов, Ю.Н. Методика исследования противоизносных свойств товарных моторных масел и механохимических процессов при граничном трении скольжения / Ю.Н. Безбородов, Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, Е.Г. Мальцева // Известия Томского политехнического ун-та. – 2010. – Т.316, № 2, С. 42 – 43.
125. Ковальский, Б.И. Влияние степени окисления моторных масел на их противоизносные свойства / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, О.Н. Петров. Научн. техн. конф. с участием иностр. Специалистов, посвященная 120-летию выдающегося триболога М.М. Хрущова. 7–10 декабря, 2010, г. Москва.
126. Рунда, М.М. Исследование влияния срока хранения минеральных моторных масел на термоокислительную стабильность и противоизносные свойства

- / М.М. Рунда, Б.И. Ковальский, В.С. Янович, Н.А. Лебедева // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. № 9, 2012. – С. 12 – 17.
127. Алексеев, Р.И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа / Р.И. Алексеев, Ю.И. Коробин. – М. : Атомиздат, 1972. – 72 с.
128. Пустыльник, Е.Н. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.Н. Пустыльник. – М.: Наука. – 1968. – 288 с.
129. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – М. : Наука, 1968. – 97 с.
130. А.С. № 610534 РФ, МКИ<sup>3</sup> G01N 1/04. Регрессионный анализ многофакторных элементарных исследований (Evegve) С.П. Ереско, 2004. Бюл. №25.
131. Верещагин В.И. Методика оценки ресурса моторных масел / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, А.С. Попов // Вестник Крас ГАУ. Вып. 6. Красноярск, 2007, С. 169 – 174.
132. Сорокин, Г.М. Термоокислительная стабильность трансмиссионного масла ТСгип / Г.А. Сорокин, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева // Вестник машиностроения, 2008. – № 6. – С. 30.
133. Ковальский Б.И. Процессы протекающие на фрикционном контакте при триботехнических испытаниях работающих масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, В.Г. Шрам, М.М. Рунда // Контроль. Диагностика №13, 2013. С. 172 – 177.
134. Маркова, Л.В. Современные требования к контролю работоспособности масла дизельного ДВС / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин, Х. Конг и др. // Трение и износ. – 2002. Т.23. № 4. – С. 425 – 435.
135. Ковальский, Б.И. Влияние климатических условий эксплуатации двигателей на процессы старения моторных масел. / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, М.М. Рунда, В.С. Янович, В.Г. Шрам // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний, №12, 2013, С. 8 – 10.
136. Ковальский Б.И. Результаты испытания частично синтетических моторных масел на термоокислительную стабильность / Б.И. Ковальский, О.Н.



Петров, В.Г. Шрам, В.С. Янович // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний. М. : 2014, № 7, С. 23 – 28.

137. Ковальский, Б.И. Оптический метод контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел / Б.И. Ковальский, В.С. Янович, О.Н. Петров // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. II. Тула: изд-во ТулГУ, 2013. – С. 302 – 311.

138. Пат. № 2406087 РФ МПК G01N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева и др. ; – опубл. 10.12.2010. – Бюл. № 34.

139. Ковальский, Б.И. Методика исследования противоизносных свойств и механохимических процессов при граничном трении скольжения / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, С.Б. Ковальский и др. // Изв. Томского политехнического университета. Т. 316, № 2, 2010. С. 42 – 46.

140. Ковальский, Б.И. Исследование связи процессов окисления смазочных материалов с их противоизносными свойствами / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.А. Метелица и др. Тр. 4 междун. Симпоз. По транспортной триботехнике, «Транстрибо» / под ред. С.Г. Чулкина и П.М. Лысенкова – СПб : Изд-во «Ломоинфраспек» 2010. С. 86 – 91.

141. Верещагин, В.И. Влияние процесса старения моторного масла Ravenol VSI 5W–40SM/CF на его противоизносные свойства / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда и др. // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та. № 5, (99), 2013. С. 91 – 97.

142. Даниленко, В.С. Метод определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / В.С. Даниленко, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов и др. // Вестник КрасГАУ. Вып. 1 (22) ч.2. 2009. С. 93 – 96.

143. Попов, А.С. Процесс окисления минеральных масел с учетом доливодов / А.С. Попов, Б.И. Ковальский, С.И. Васильев // Химия и технология топлив и масел № 4, 2009. – С. 94 – 95.

144. Ковальский, Б.И. Исследование синтетических моторных масел на термоокислительную стабильность при циклическом изменении температуры / Б.И.

Ковальский, В.Г. Шрам, Н.Н. Малышева // Известия Тульского гос. техн. ун-та 2012. – Вып.10. С. 254 – 259.

145. Даниленко, В.С. Метод исследования термоокислительной стабильности моторных масел при циклическом изменении температуры испытания / В.С. Даниленко, Б.И. Ковальский, Е.А. Вишневская и др. // Вестник СибГАУ. Вып. 1 (22) часть 2.2009. – С. 97 – 99.

146. Ковальский, Б.И. Методы и средства повышения эффективности использования смазочных материалов / Б.И. Ковальский. – Новосибирск : Наука, 2005. – 341 с.

147. Давыдов, П.Н. Исследование старения масла в двигателях / П.Н. Давыдов, И.И. Сабарова. – М. : ЦНИИ ТЭНефтехим, 1968. – С. 28 – 42.

148. Безбородов, Ю.Н. Методы и средства повышения эффективности использования трансмиссионных масел: монография / Ю.Н. Безбородов. – Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т; политехнический ин-т, 2007. – 154 с.

149. Буше, Н.А. Совместимость трущихся поверхностей / Н.А. Буше, В.В. Копытько. – М. : Наука, 1981. – 128 с.

150. Лашхи, В.Л. Исследование эффективности действия антифрикционных присадок к моторным маслам / В.Л. Лашхи, А.Б. Виппер, И.А. Буяновский и др. // Трение и износ. – Т.3. 1982. – С. 988 – 993.

151. Матвеевский, Р.М. Оценка энергии активации процесса химического модифицирования поверхности трения в условиях граничной смазки / Р.М. Матвеевский, И.А. Буяновский и др. // Химия и технология топлив и ма-сел – 1976. – № 3. – С. 50 – 52.

152. Пинчук, Л.С. О некоторых возможностях поляризации пар трения / Л.С. Пинчук, А.С. Неверов, В.А. Гольгаде // Трение и износ. Т/. 1980. № 6. С. 1089 – 1092.

153. Ковальский, Б.И. Кинетика приспособляемости пар трения / Б.И. Ковальский В. кн.; Совершенствование навесного оборудования строительных машин и технологии земляных и свайных работ. Красноярск, 1984. – С. 68 – 77.

154. Сорокин, Г.М. Оценка совместимости материалов пар трения электрическим методом / Г.М. Сорокин, Б.И. Ковальский // Трение и износ Т.7, № 2, 1986. – С. 234 – 239.
155. Сорокин, Г.М. О связи механизма изнашивания с механохимическими процессами на фрикционном контакте в условиях граничной смазки / Г.М. Сорокин, Б.И. Ковальский // Трение и износ, Т.8, № 4, 1987, С. 720 – 723.
156. Ковальский, Б.И. Ускоренный метод оценки эксплуатационных свойств трансмиссионных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, С.И. Васильев и др. // Механизация строительства, № 10, 2004. С. 18 – 20.
157. А.С. 1270642 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N 3/56 Способ оценки вида изнашивания поверхностей трения / Б.И. Ковальский, Г.М. Сорокин. Оpubл. 15.11.86. Бюл. № 42.
158. А.С. 1670521 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N 3/56 Способ определения смазывающей способности масел / Б.И. Ковальский, Н.К. Мышкин, Н.Н. Титовский. Оpubл. 15.08.91. Бюл. № 30.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

«УТВЕРЖДАЮ»  
ВРИО КОМАНДИРА ВОЙСКОВОЙ ЧАСТИ 54630  
(ПОСЕЛОК КОЗУЛЬКА, КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ)  
ВЕНИЧЕНКО А.И.

«14» апреля 2015г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и  
технологических работ**

Настоящим актом подтверждается, что в в/ч 54630 результаты диссертационной работы  
МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В БРОНЕТЕХНИКЕ ПРИ ИХ ОКИСЛЕНИИ И ТРИБО-  
ТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ  
(наименование темы)

выполненной ЯНОВИЧ ВАЛЕРИЕМ СТАНИСЛАВОВИЧЕМ  
(ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

внедрены в/ч 54630 КОЗУЛЬКА

Вид внедренных результатов ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МА-  
СЕЛ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ХРАНЕНИИ БРОНЕТЕХНИКИ  
эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (изделия, работы, технологии) и др.

1. Характеристика масштаба внедрения СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИ-  
ЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЕНЫ ТРАНСМИССИ-  
ОННЫХ МАСЕЛ ПРИ ХРАНЕНИИ БРОНЕТЕХНИКИ
2. Форма внедрения ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ  
методика (метод)
3. Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ  
(пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)
4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ
5. Внедрены: в промышленное производство ПАРКИ ХРАНЕНИЯ МАШИН ВОИН-  
СКИХ ЧАСТЕЙ
6. Годовой экономический эффект  
Ожидаемый —  
Фактический —
7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —
8. Объем внедрения —  
что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета  
гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР
9. Социальный и научно-технический эффект УСОВЕРШЕНСТВОВАНА ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНТРОЛЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ  
(охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

**От исполнителя**

Автор разработанного метода комплексного  
контроля

Янович В.С.

Заместитель директора по научной работе  
Института нефти и газа  
Сибирского федерального университета

Безбородов Ю.Н.



«УТВЕРЖДАЮ»  
 КОМАНДИР ВОЙСКОВОЙ ЧАСТИ 21431  
 (ГОРОД НИЖНЕУДИНСК, ИРКУТСКОЙ  
 ОБЛАСТИ)

МИРГАЛЕЕВ И.И.  
 2015г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и  
 технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что в в/ч 21431 результаты диссертационной работы  
МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ,  
 ПРИМЕНЯЕМЫХ В БРОНЕТЕХНИКЕ ПРИ ИХ ОКИСЛЕНИИ И ТРИБО-  
 ТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ  
 (наименование темы)

выполненной ЯНОВИЧ ВАЛЕРИЕМ СТАНИСЛАВОВИЧЕМ  
 (ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
 ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО  
 УНИВЕРСИТЕТА

внедрены в/ч 21431 НИЖНЕУДИНСК

Вид внедренных результатов ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ  
 МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ХРАНЕНИИ БРОНЕТЕХНИКИ  
 эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (изделия, работы технологии) и др.

1. Характеристика масштаба внедрения СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИ-  
 ЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЕНЫ ТРАНСМИССИ-  
 ОННЫХ МАСЕЛ ПРИ ХРАНЕНИИ БРОНЕТЕХНИКИ
2. Форма внедрения ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ  
 методика (метод)
3. Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ  
 (пионерские, принципиально новые, качественно новые, молификация, модернизация старых разработок)
4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ  
 ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ
5. Внедрены: в промышленное производство ПАРКИ ХРАНЕНИЯ МАШИН-  
 ВОИНСКИХ ЧАСТЕЙ
6. Годовой экономический эффект  
 Ожидаемый \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_  
 Фактический \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_
7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_
8. Объем внедрения \_\_\_\_\_  
 что составляет \_\_\_\_\_ от объема внедрения, положенного в основу расчета-  
 гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР
9. Социальный и научно-технический эффект УСОВЕРШЕНСТВОВАНА ТЕХНОЛОГИЯ  
 КОНТРОЛЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ  
 (охрана окружающей среды, недр: улучшение и оздоровление условий труда: специального назначения и т.п.)

От исполнителя  
 Автор разработанного метода комплексного  
 контроля  
 Янович В.С.

Заместитель директора по научной работе  
 Института нефти и газа  
 Сибирского федерального университета  
 Безбородов Ю.Н.

