

На правах рукописи

**Янович Валерий Станиславович**

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

Специальность:

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск—2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

**Научный руководитель:**

**Безбородов Юрий Николаевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Мурыгин Александр Владимирович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Красноярск, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем

**Чухланцева Марина Михайловна**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФБУ Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний «Томский ЦСМ», директор

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Защита состоится «3» ноября 2015 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « 15 » \_\_\_\_\_ сентября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.269.09

Васендина Е.А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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. 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.

Система контроля состояния трансмиссионных масел в период эксплуатации техники не предусматривает применение диагностических средств контроля и поэтому, наряду со своей простотой, не позволяет обеспечить своевременный анализ состояния масел, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат.

Кроме того, на неэффективность эксплуатационной системы влияют заводы-изготовители, устанавливающие ресурс трансмиссионных масел в километрах пробега. Особенно явно это выражается при эксплуатации бронетехники, которая используется периодически. При хранении такой техники процессы старения протекают с минимальной скоростью и не могут оцениваться пробегом.

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 использован комплекс средств контроля, включающий: фотометрическое устройство для прямого фотометрирования проб масел; прибор для термостатирования масел при статической температуре  $150^{\circ}\text{C}$  и циклически изменяющейся в диапазоне температур от  $120^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$ ; 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 и установить качественные различия

масел, используемых в агрегатах трансмиссий бронетехники.

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 процессы, протекающие 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 другие. 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 которой в настоящей работе предложен эмпирический критерий противоизносных свойств трансмиссионных масел, **что** его зависимость 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 их исследований предложен электрометрический метод оценки интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте путем 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 предоставляют возможность получить дополнительную информацию о качестве товарных трансмиссионных масел, что обеспечить их обоснованный выбор для эксплуатационных испытаний, и правильную организацию текущего контроля работающих масел в период эксплуатации трансмиссий. Кроме того, применение фотометрического метода контроля

процессов окисления и старения трансмиссионных масел позволяет снизить трудоемкость контроля и расширить информацию о их качестве, а триботехнические испытания — обосновать предельное состояние по параметрам износа и процессам, протекающим на фрикционном контакте.

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

**Предметом исследования** является 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, характеризующие 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; рекомендации по выбору трансмиссионных масел для трансмиссий; рекомендации по классификации трансмиссионных масел и периодичности контроля состояния работающих.

**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 горючесмазочные 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.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация содержит 205 страниц машинописного текста, 85 рисунков, 13 таблиц. Работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка литературы из 158 наименований и приложений.

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, степень научной проработанности темы, поставлены цель и задачи исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проведён анализ: современных методов контроля эксплуатационных свойств, основных требований и классификации трансмиссионных масел; трансмиссий, применяемых в бронетехнике; научно-технической и патентной литературы по теме диссертационной работы.

**Вторая глава** содержит основы разработки универсальной методики контроля трансмиссионных масел, применяемых в бронетехнике, и масел различной базовой основы, обоснование средств контроля с кратким описанием, технологии проведения исследований и обработки экспериментальных данных.

В современной бронетехнике применяется три марки минеральных трансмиссионных масел: ТСзп-8; МС-20; МТ-8п. Для проверки универсальности разработанной методики контроля она апробирована на трансмиссионных маслах различ-

ной базовой основы: минеральном BIZOL 80W-90 GL4; частично синтетическом BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5 и синтетическом BIZOL HYPOID 75W-90 GL5.

Контроль качества товарных и работающих трансмиссионных масел осуществлялся по параметрам термоокислительной стабильности и триботехническим характеристикам. В качестве средств контроля использовались: фотометрическое устройство; малообъемный вискозиметр; оптический микроскоп «Альтами Мет1М» и электронные весы, а средства испытания включали прибор для термостатирования масел при статической температуре 150 °С и циклически изменяющейся в диапазоне температур от 120 до 150 °С, трехшариковая машина трения со схемой «шар – цилиндр» и центрифуга с частотой вращения ротора 8 000 об/мин.

Методика контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел при термостатировании предусматривала прямое фотометрирование окисленных масел и определение изменения коэффициента поглощения светового потока, кинематической вязкости, измеренной при 100 °С, потенциальному ресурсу и испаряемости. Работавшие масла дополнительно оценивались по концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения, легких фракций и воды. Эти данные использовались для обоснования критерия термоокислительной стабильности.

Триботехнические характеристики товарных и работающих трансмиссионных масел определялись при постоянных параметрах трения: нагрузка 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; время испытания – 2 часа. Оценка производилась по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах и площади пятна износа.

Применение электрометрического метода контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте, путем пропускания постоянного тока через зону трения от внешнего стабилизированного источника напряжения 3В величиной 100 мкА позволило дополнительно оценивать изменение триботехнических характеристик окисленных товарных и работающих масел по продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформаций, электропроводности граничного слоя, разделяющего поверхности трения, и обосновать критерий противоизносных свойств.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывались методами математической статистики и регрессионного анализа с использованием программ ЭВМ «Advanced Grapher» и «Eregre».

**Третья глава** содержит результаты термоокислительной стабильности товарных и работающих трансмиссионных масел, применяемых в трансмиссиях бронетехники и масел различной базовой основы, оценку их противоизносных свойств и процессов, протекающих на фрикционном контакте, обоснование критериев термоокислительной стабильности и противоизносных свойств.

Влияние статической температуры (150 °С) на показатели термоокислительной стабильности минеральных трансмиссионных масел представлены на рисунке 1а, б, в зависимостями коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости и испаряемости от времени окисления.

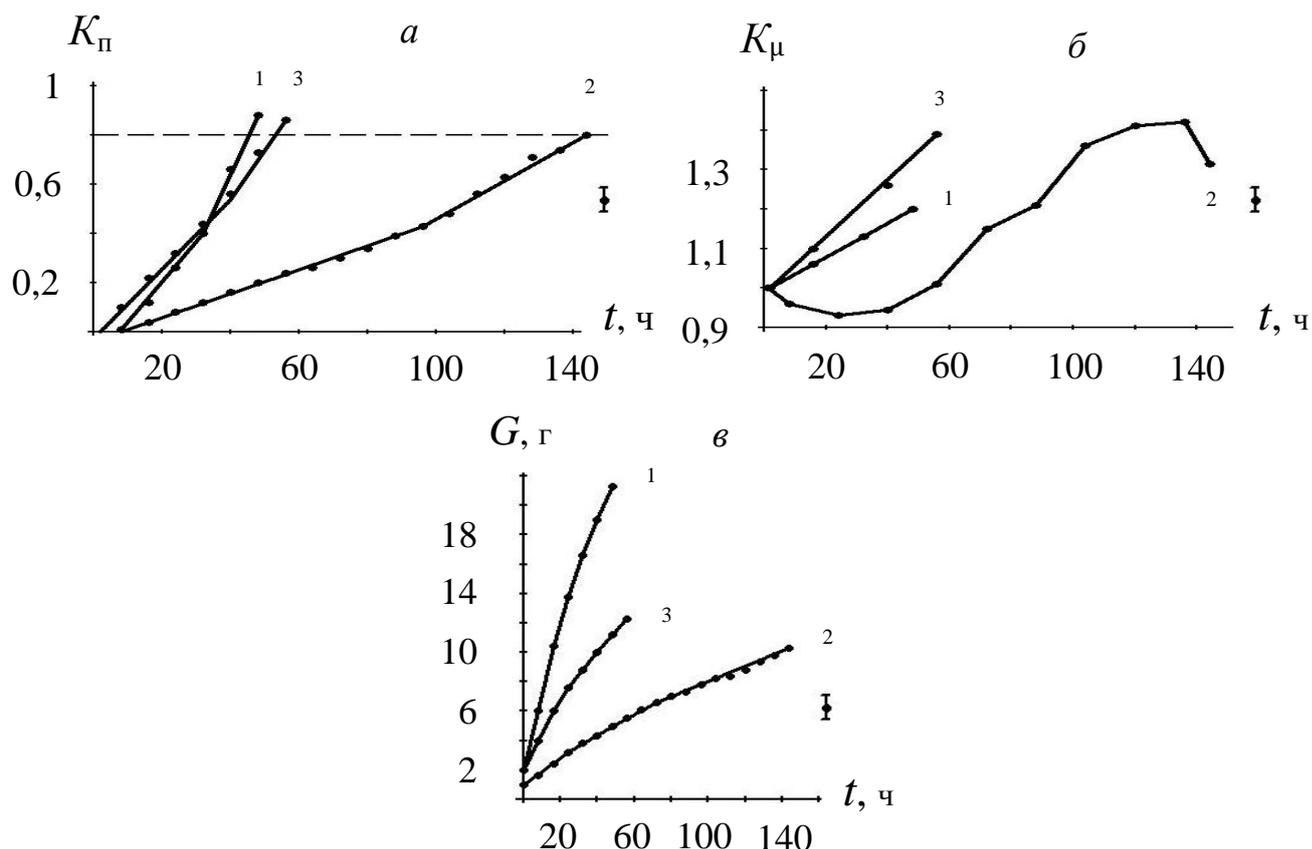


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока (а), относительной вязкости (б) и испаряемости (в) от времени окисления минеральных трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Особенностью данных зависимостей является наличие изгиба, что подтверждает образование в процессе окисления двух видов продуктов, отличающихся оптическими свойствами: первичных и вторичных. Время начала образования вторичных продуктов окисления определяется продлением зависимости  $K_{\text{п}} = f(t)$  после точки изгиба до пересечения с осью абсцисс. Данные зависимости описываются кусочно-линейным уравнением:

$$K_{\text{п}} = a(t - t_{\text{н}}) \quad (1)$$

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

По зависимостям  $K_{\text{п}} = f(t)$  предложено устанавливать потенциальный ресурс исследуемых масел, определяемый временем достижения коэффициента  $K_{\text{п}}$  выбранных значений (например, 0,8 ед). Показано, что наибольшим ресурсом (144 ч) характеризуется масло МС-20 (кривая 2 на рисунке 1).

Важным эксплуатационным показателем трансмиссионных масел является кинематическая вязкость и ее изменение в процессе эксплуатации трансмиссий.

Для оценки изменения вязкости в процессе окисления масел принят коэффициент относительной вязкости, определяемый отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного масла (рисунок 1, б). Установлено, что относительная вязкость масел ТСзп-8 и МТ-8п (кривые 1, 3) изменяется по линейной зависимости, а масла МС-20 (кривая 2) в начале процесса окисления уменьшается, а после 40 ч испытаний увеличивается с появлением вторичных продуктов окисления (см. рисунок 1 а).

Испаряемость трансмиссионных масел (рисунок 1 в) имеет важное значение при граничном трении скольжения, так как может вызвать разрыв масляной пленки, разделяющей поверхности трения, и активизировать схватывание. Информация об испаряемости используется при назначении температурной области работоспособности масел и группы эксплуатационных свойств. Установлено, что наименьшей испаряемостью характеризуется масло МС-20 (кривая 2), а наибольшей – масла ТСзп-8 (кривая 1). Поэтому для уменьшения испаряемости и увеличения потенциального ресурса масел необходимо понижать температурную область их применения.

При циклическом изменении температуры испытания (рисунок 2) масла ТСзп-8 и МТ-8п выдержали 5 циклов изменения температуры в диапазоне от 120 до 150 °С, а масло МС-20 – 13 циклов. Потенциальный ресурс увеличился более чем в два раза, причем в циклах понижения температуры испытания от 150 до 120 °С скорости окисления и испарения, по которым определяются температуры начала этих процессов уменьшаются.

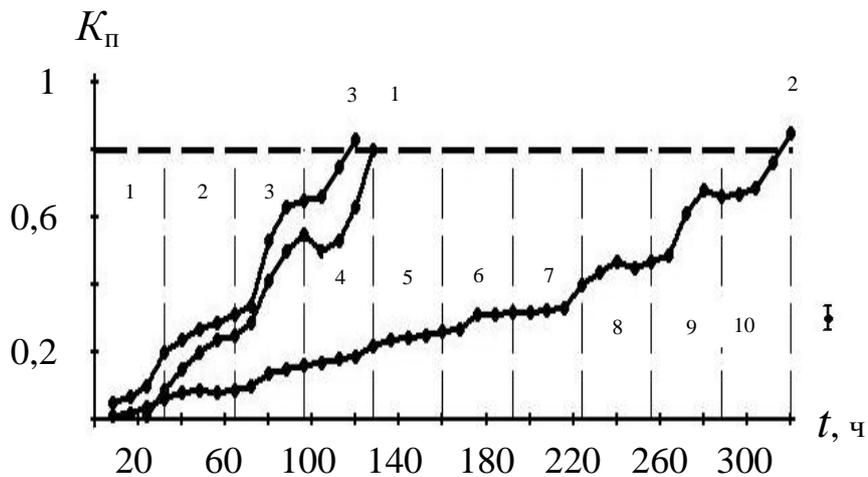


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления трансмиссионных масел при циклическом изменении температуры в диапазоне температур от 120 до 150 °С: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Установлено, что в процессе окисления минеральных трансмиссионных масел происходят процессы перераспределения тепловой энергии, вызванные наличием двух видов продуктов окисления, различной оптической плотности и испаряемости, интенсивность которых предложено оценивать отношением приращения скоростей окисления и испарения за определенное время окисления. Показано, что с увеличением скорости окисления скорость испарения уменьшается.

Кинематическая вязкость окисленных минеральных масел, в основном, зависит от концентрации продуктов окисления, поэтому в качестве критерия термоокислительной стабильности  $E_{\text{тос}}$  предложена сумма коэффициентов поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$  и испаряемости  $K_G$

$$E_{\text{тос}} = K_{\text{п}} + K_G, \quad (2)$$

$$K_G = m / M, \quad (3)$$

где  $m$  и  $M$  – соответственно массы испарившегося масла и оставшегося после окисления за данный промежуток времени, г.

Зависимости критерия термоокислительной стабильности от времени окисления минеральных трансмиссионных масел представлены на рисунке 3. Данный критерий характеризует количество тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения.

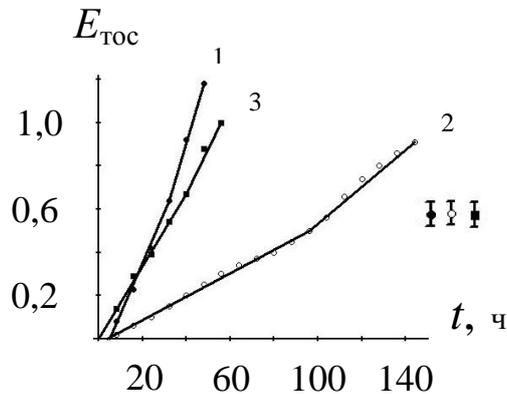


Рисунок 3 – Зависимости критерия термоокислительной стабильности от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Предложена физическая модель сопротивления трансмиссионных масел окислению (рисунок 4)

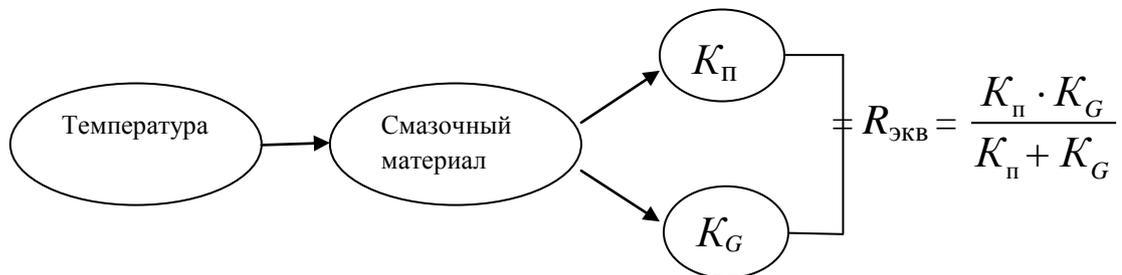


Рисунок 4 – Физическая модель сопротивления смазочного материала окислению

Согласно модели избыточная тепловая энергия поглощается одновременно и параллельно по двум каналам с образованием продуктов окисления и испарения. Скорость образования этих продуктов определяет сопротивляемость смазочного материала окислению, выраженную эквивалентным сопротивлением

$$R_{\text{экв}} = \frac{K_{\text{п}} \cdot K_G}{K_{\text{п}} + K_G}. \quad (4)$$

Если условно принять сопротивление любого смазочного масла за единицу, то его сопротивляемость при окислении  $R_0$  будет уменьшаться:

$$R_0 = 1 - \frac{K_{\text{п}} \cdot K_G}{K_{\text{п}} + K_G}. \quad (5)$$

Зависимости коэффициента сопротивления окислению при статической температуре  $150^\circ\text{C}$  и циклично изменяющейся в диапазоне от  $120$  до  $150^\circ\text{C}$  от времени окисления представлены на рисунке 5 а, б.

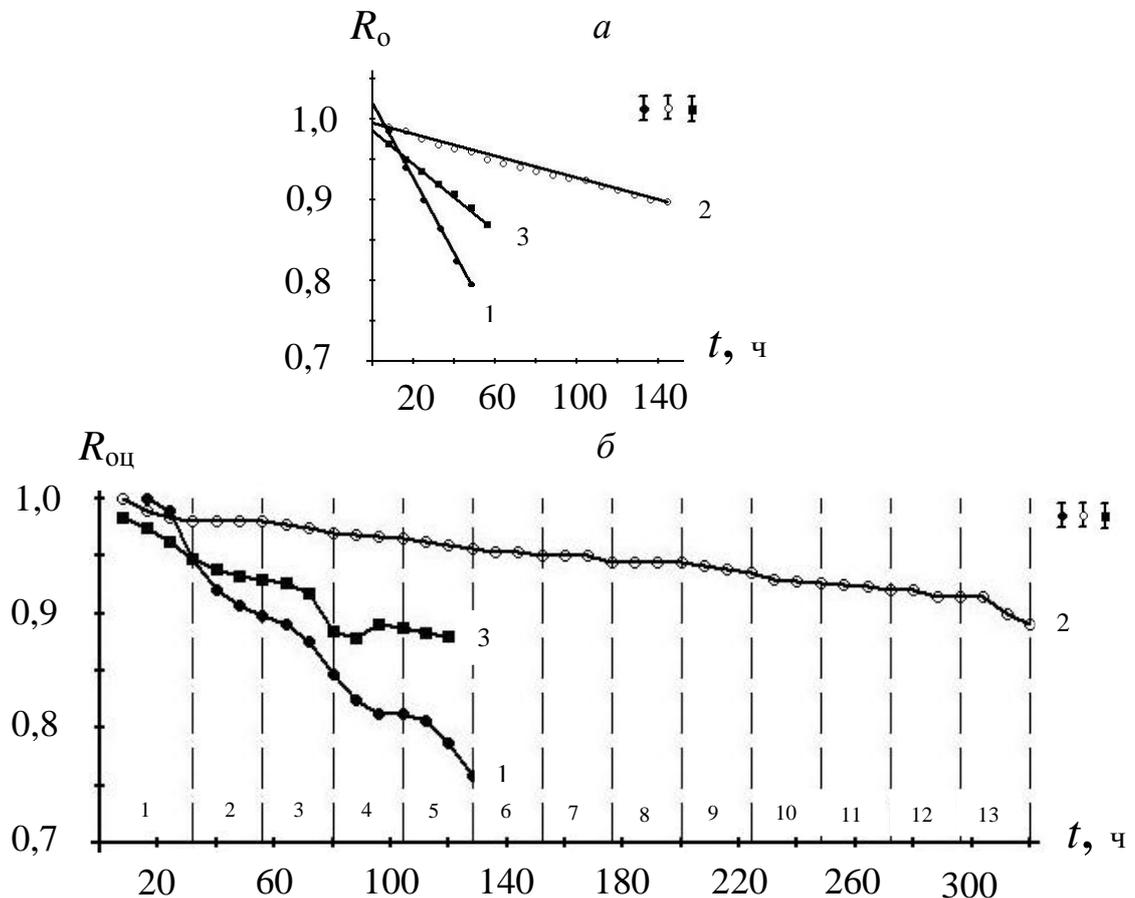


Рисунок 5 — Зависимости коэффициента сопротивления окислению при статической температуре  $150^\circ\text{C}$  (а) и циклично изменяющейся в диапазоне от  $120$  до  $150^\circ\text{C}$  (б) от времени окисления

Коэффициент сопротивления окислению  $R_0$  предложен в качестве альтернативного критерия термоокислительной стабильности, а зависимость его от времени окисления описывается линейным уравнением:

$$R_o = 1 - at, \quad (6)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий скорость уменьшения сопротивляемости окислению исследуемого масла.

По скорости изменения сопротивления окислению можно классифицировать масло по группам эксплуатационных свойств.

Противоизносные свойства окисленных трансмиссионных масел оценивались по критерию  $\Pi$ , определяемому отношением коэффициента поглощения светового потока к среднеарифметическому значению диаметра пятна износа или номинальной площади фрикционного контакта  $\Pi_s$ :

$$\Pi = K_{\Pi}/U, \text{ или } \Pi_s = K_{\Pi}/S, \quad (7)$$

Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента  $K_{\Pi}$  представлены на рисунке 6 *а*, *б* и описываются линейными уравнениями:

$$\Pi = a \cdot K_{\Pi}, \text{ или } \Pi_s = a \cdot K_{\Pi}, \quad (8)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия  $\Pi$  или  $\Pi_s$  ( $\text{мм}^{-1}$  и  $1/\text{мм}^2$  соответственно)

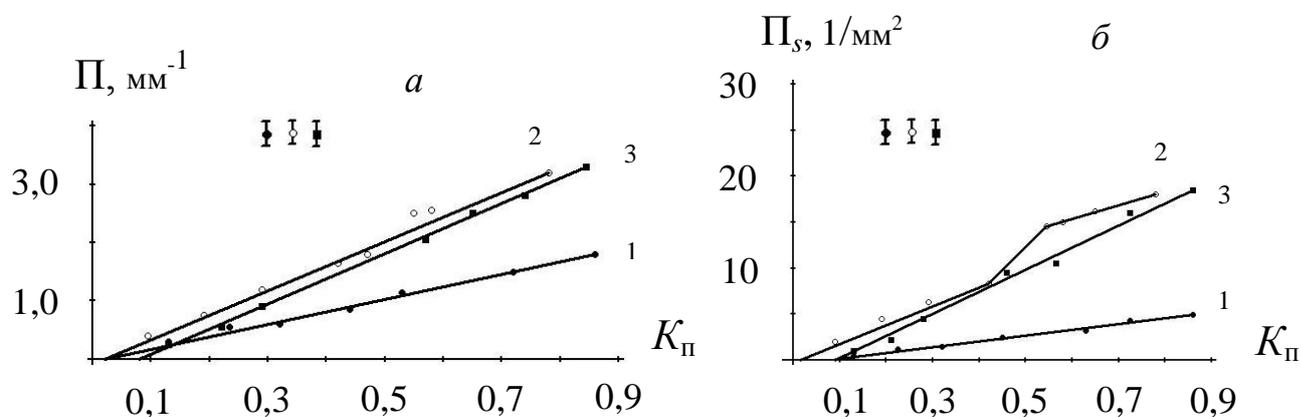


Рисунок 6 – Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при триботехнических испытаниях минеральных трансмиссионных масел: 1 – ТСЗп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п (при вычислении с учетом среднеарифметических значений диаметра пятна износа (*а*); площади пятна износа (*б*))

Чем больше скорость изменения критерия  $\Pi$ , тем выше противоизносные свойства испытываемого масла. Согласно данным (рисунок 6) самыми высокими противоизносными свойствами характеризуется масло МС-20 (кривая 2), а более низкими масло – ТСЗп-8 (кривая 1). Применение критерия противоизносных

свойств позволяет осуществлять обоснованный выбор трансмиссионных масел для трансмиссий, обеспечивающий максимальную их надежность.

Результаты испытания минеральных трансмиссионных масел приведены в таблице 1.

Таблица 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

Приведенные в таблице данные расширяют информацию о качестве трансмиссионных масел и позволяют конструкторам и технологам обоснованно выбирать масла с необходимым ресурсом, температурной областью работоспособности, противоизносными свойствами и сопротивляемостью окисления. Лучшим из числа исследуемых масел является масло МС-20. Для улучшения показателей масел ТСзп-8 и МТ-8п необходимо понизить температуру испытания соответственно до 130 и 140 °С.

Процессы, протекающие на фрикционном контакте при триботехнических испытаниях трансмиссионных масел, оценивались электрометрическим методом путем пропускания постоянного тока величиной 100 мкА от внешнего стабилизированного источника напряжения через зону трения и через преобразователь записывались на мониторе в виде диаграммы (рисунок 7).

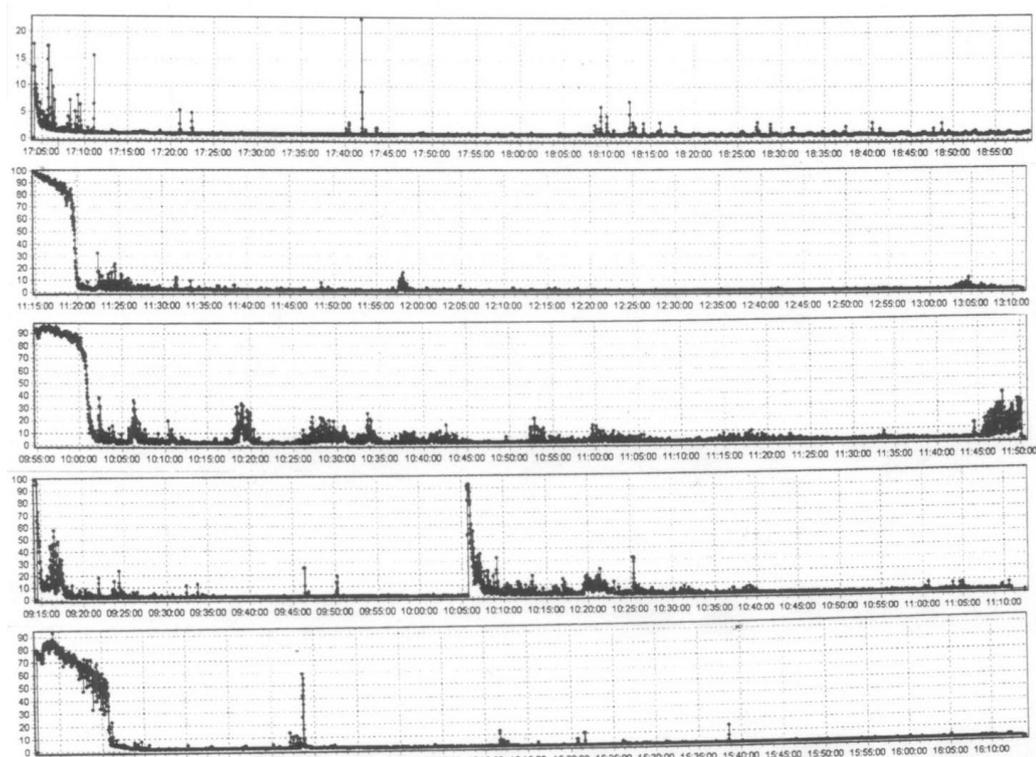


Рисунок 7 – Диаграммы изменения тока, протекающего через фрикционный контакт, при триботехнических испытаниях окисленного масла ТСЗп-8

По данным диаграммам определяли продолжительность пластической (ток равен заданному 100 мкА), упругопластической (ток уменьшается до стабилизации) и упругой деформаций (ток стабилизируется), электропроводность фрикционного контакта и время его формирования, а интенсивность процессов, протекающих на фрикционном контакте, оценивали коэффициентом  $K_{\text{МХП}}$  интенсивности механохимических процессов:

$$K_{\text{МХП}} = U \cdot K_3, \quad (9)$$

где  $U$  – параметр износа (мм);  $K_3$  – коэффициент электропроводности фрикционного контакта.

Параметр износа  $U$  характеризует механическую составляющую изнашивания, а коэффициент  $K_3$  – химическую составляющую в области упругих деформаций. Установлены две области различной интенсивности механохимических процессов с изменением концентрации продуктов окисления: первая область наблюдается при малых концентрациях, где коэффициент  $K_{\text{МХП}}$  увеличивается а вторая – при больших концентрациях, где коэффициент  $K_{\text{МХП}}$  замедляется и принимает устойчивое состояние. Поэтому можно утверждать, что при малых концентрациях продуктов окисления на поверхностях трения формируются адсорбционные слои, а при больших – хемосорбционные граничные слои.

Время формирования фрикционного контакта определяется по диаграммам изменения тока по суммарной продолжительности пластической и упруго-пластической деформаций. Установлено, что с увеличением концентрации продуктов окисления время формирования фрикционного контакта уменьшается.

В 3 главе исследованы альтернативные трансмиссионные масла различной базовой основы: минеральное масло BIZOL 80W-90 GL4; частично синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL4, GL5; синтетическое BIZOL HYPOID 75W-90 GL5

Результаты испытания данных масел см. в таблице 2.

Таблица 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, мм <sup>2</sup> /с	1,1	1,41	1,22
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 сопротивляемости окислению при температуре 150 °С после 40 ч испытания, ед.	0,959	0,913	0,957
Критерий противоизносных свойств $\Pi$ при коэффициенте $K_{\Pi} = 0,8$ ед. (диаметр пятна износа)	4,1	3,2	2,1
Критерий противоизносных свойств $\Pi_s$ при коэффициенте $K_{\Pi} = 0,8$ ед. (площадь контакта)	26,75	16,0	6,7

Согласно данным таблицы 2 лучшими показателями характеризуется минеральное масло BIZOL 80W-90 GL4, хотя оно уступает синтетическому маслу по потенциальному ресурсу и критерию термоокислительной стабильности, но превосходит его по противоизносным свойствам в два раза, что является основным показателем надежности трансмиссий.

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

Испытание работающих масел производилось на масле МТ-8п, пробы которых отбирались из трансмиссий бронетехники (23 ед.), находящейся на хранении. Контроль состояния производился: по концентрации общих, раство-

римых и нерастворимых продуктов старения (рисунок 8); концентрации легких фракций и воды (рисунок 9); противоположным свойствам и сопротивляемости окислению (рисунок 10)

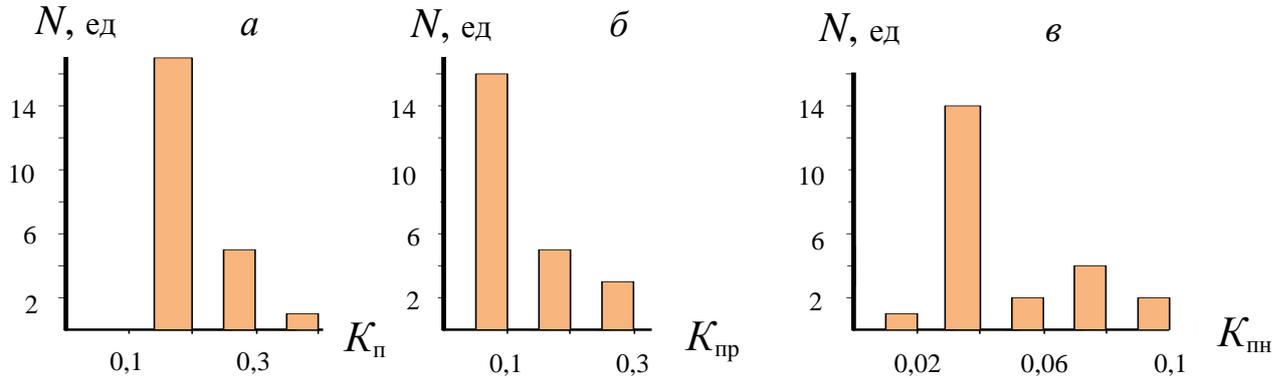


Рисунок 8 – Гистограммы распределения концентраций общих  $K_{п}$  (а), растворимых  $K_{пр}$  (б) и нерастворимых  $K_{пн}$  (в) продуктов старения работающих масел МТ-8п при хранении техники

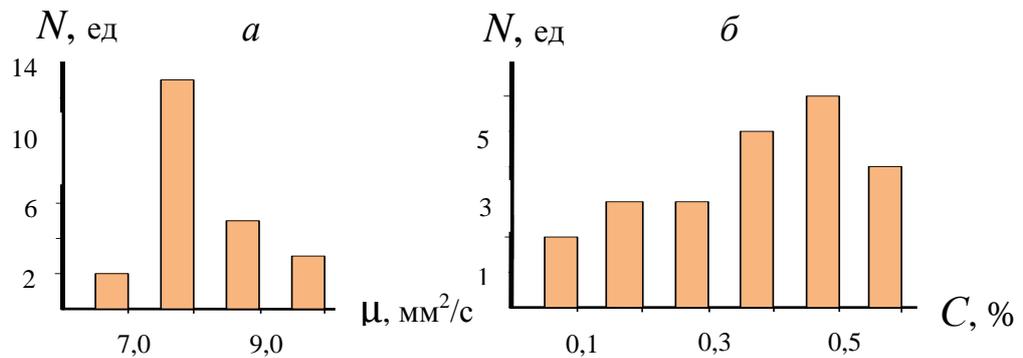


Рисунок 9 – Гистограммы распределения кинематической вязкости (а) и легких фракций и воды в работающих маслах (б)

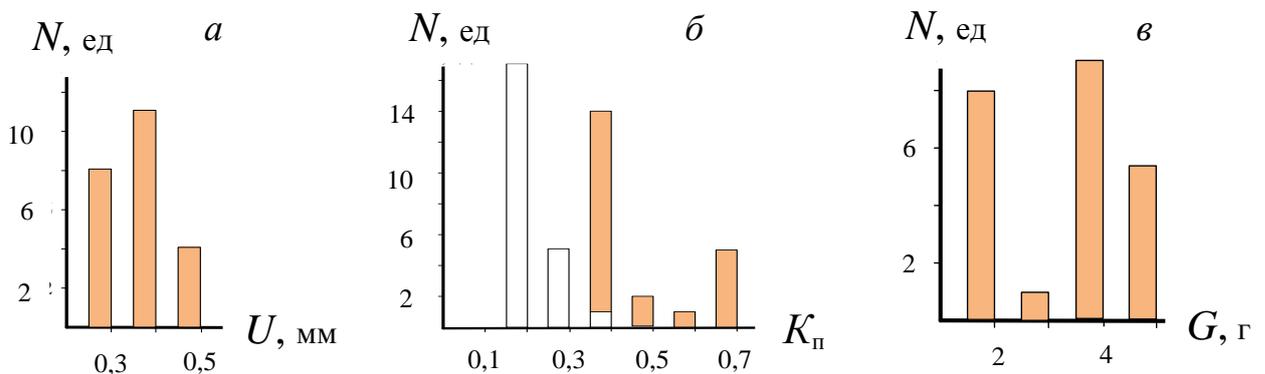


Рисунок 10 – Гистограммы распределения противоположных свойств (а); оптических свойств (б) после термостатирования при температуре 150 °С (□– исходные пробы масел; ■– после окисления в течение 3 ч) и испаряемости (в)

Представленные данные показывают, что применение предлагаемого метода и средств контроля позволяют получить дополнительную информацию о состо-

янии трансмиссионных масел парка машин длительного хранения и принять своевременные меры по устранению причин, вызывающих предельное изменение одного из показателей, и обеспечить эффективное использование масел, а также снизить эксплуатационные затраты за счет корректировки сроков замены масел и повысить надежность.

**Четвертая глава** посвящена разработке практических рекомендаций по контролю состояния трансмиссионных масел, включающих технологии 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; рекомендации по классификации трансмиссионных масел; рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел парка машин.

### **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, рекомендации 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 большей 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 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 триботехнических характеристик масел, включающих: продолжительность пластических, упругопластических и упругих деформаций, электропроводность фрикционного контакта и время его формирования, коэффициент интенсивности механохимических процессов, позволяющий оценить влияние механической и химической составляющих на изнашивание.

5. 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; рекомендации по классификации трансмиссионных масел; рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел парка машин. Технологии и рекомендации апробированы на базе хранения танков (пос. Козулька, Красноярский край).

**Основное содержание диссертационной работы отражено в публикациях:**

*а) Статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ*

1. 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. // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та – 2011. – № 6 (88). – С. 55 – 61.

2. Ковальский, Б.И. Влияние сроков хранения масел М16ИХП-3 на термоокислительную стабильность и противоизносные свойства / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, А.В. Юдин, В.С. Янович // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2012. – № 5. – С. 19 – 24.

3. 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.

4. 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. – 2012. – № 9, – С. 12 – 17.

5. 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. Вестник нефтяных компаний. – 2013. – № 12. – С. 8 – 10.

6. 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. Вестник нефтяных компаний. – 2014. – № 7. – С. 23 – 28.

7. 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.

8. Ковальский, Б.И. Метод контроля противоизносных свойств при окислении трансмиссионных масел / Ковальский Б.И., В.С. Янович, В.Г. Шрам // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 283 – 289.

*б) Патенты РФ*

9. 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.

10. 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.

*в) Другие издания*

11. Ковальский, Б.И. Результаты исследования моторного масла МТ-16п при хранении бронетехники / Б.И.Ковальский, А.А. Мосолов, М.М. Рунда, В.С. Янович // Сб. рефератов депонированных рукописей. – М. : ЦВНИ МО РФ. 2011. – № 95. – С. 36 – 40.

12. Ковальский, Б.И. Результаты испытания минеральных моторных масел на термоокислительную стабильность / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, В.С. Янович, А.В. Берко // Основные результаты диссертационных исследований докторантов, адъюнктов и соискателей академии: сб. науч. работ. 2011.– № 4 – С. 175 – 184. – (инв. № 101).

13. Ковальский, Б.И. Какие процессы протекают в смазочном масле при термостатировании и их влияние на противоизносные свойства // Б. Ковальский, В. Верещагин, М. Рунда, В. Янович // Армейский сборник. – 2012. – № 2. – С. 40 – 44.