

Рунда Михаил Михайлович



**Метод контроля состояния
моторных масел при длительном хранении техники**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ковальский Болеслав Иванович

Официальные оппоненты: **Глухов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», заведующий кафедрой метрологии и приборостроения

Лукьяненко Михаил Васильевич, кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВПО "Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева", заведующий кафедрой систем автоматического управления

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

Защита состоится «10» июня 2014г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215, e-mail: tvn@tpu.ru.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Беллинского, 55 и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Васендина Е. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Улучшение надежности двигателей внутреннего сгорания решается по трем направлениям: совершенствование конструкции двигателей, применение износостойких материалов и улучшение эксплуатационных свойств моторных масел. Моторные масла являются важным элементом конструкции двигателя, влияющим на его ресурс, и могут надежно выполнять свои функции только при соответствии их свойств термическим, химическим и механическим воздействиям, которым оно подвергается на поверхностях смазываемых деталей.

Важное внимание при подборе смазочных материалов для двигателей уделяется противоизносным, противозадирным и антикоррозийным свойствам, определяющим долговечность узлов трения. Смазочные свойства масел зависят от содержания полярно активных и химически активных веществ, способных образовывать на поверхностях трения устойчивые защитные слои, которые снижают износ деталей и уменьшают коэффициент трения. Однако процессы, протекающие на фрикционном контакте, изучены недостаточно, отсутствуют критерии оценки их влияния на параметры износа. Кроме того, вследствие окисления масла образуются низкомолекулярные кислоты, способные улучшить смазывающие свойства моторных масел.

В этой связи разработка новых методов контроля состояния моторных масел в процессе длительного их хранения в резервуарах парка или в технике является актуальной задачей. Решение данной проблемы должно быть комплексным, учитывающим основные физико-химические показатели и противоизносные свойства моторных масел, поэтому практическое и научное значение представляют исследования: механизма старения моторных масел; влияния сроков хранения масел на их термоокислительную стабильность, противоизносные свойства, состав продуктов старения, концентрацию воды, продолжительность формирования фрикционного контакта и потенциальный ресурс.

Степень разработанности проблемы.

Для оценки влияния климатических условий на состояние минеральных моторных масел при их хранении в бронетехнике и резервуарном парке применен комплекс приборов включающий: фотометр для прямого фотометрирования; прибор для термостатирования при статических и циклически изменяющихся температурах испытания; малообъемный вискозиметр; центрифугу; электронные весы и трехшариковую машину трения, позволяющие определить состав продуктов старения масел по концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов, концентрацию воды, кинематическую вязкость и противоизносные свойства. Применение данных средств контроля позволяет обосновать предельное состояние масел при их хранении и осуществлять их замену по фактическому состоянию.

Исследования проводились по следующим направлениям: изучение процессов окисления (старения) масел; оценка влияния продуктов старения на противоизносные свойства и процессы, протекающие на поверхностях трения.

Существенный вклад в изучение процессов окисления (старения) смазочных масел внесли: А. Б. Виппер, М. А. Григорьев, Л. А. Кондаков, С. Е. Крейн, А. В. Неподгодьев, К. К. Папок, А. И. Соколов, Н. И. Черножуков, Г. И. Шор, В. В. Чанкин и др. Данные исследования приняты за основу для разработки семи госстандартов по определению термоокислительной стабильности масел различной базовой основы, главными показателями которой приняты: кинематическая вязкость, кислотность (щелочность), период осадкообразования, диэлектрическая проницаемость, оптическая плотность, испаряемость, триботехнические свойства. На основании анализа данных исследований в настоящей работе предложен комплексный критерий оценки термоокислительной стабильности, учитывающий количество поглощенной тепловой энергии продуктами окисления и испарения, т. е. сброс избыточной тепловой энергии происходит по двум каналам, что вызывает перераспределение энергии и колебание скоростей окисления и испарения. Кроме того, применение прямого фотометрирования окисленных масел позволило подтвердить образование при окислении двух видов продуктов различной оптической плотности.

Оценка противоизносных свойств окисленных масел и масел, находящихся на длительном хранении, проводилась на трехшариковой машине трения со схемой «шар – цилиндр», преимущество которой заключалось во взаимодействии каждого шара с индивидуальной дорожкой трения.

Изучением триботехнических свойств смазочных масел занимались: И. В. Крапельский, О. Б. Айнбиндер, И. А. Буяновский, В. Г. Виноградов, С. В. Венцель, А. С. Ахматов, А. Ю. Шилинский, В. Н. Лозовский, В. П. Лашхи, Р. М. Матвеевский, М. А. Григорьев, Ю. А. Розенберг и др. Их работы содержат фундаментальные основы молекулярно-механической теории трения, на основании которой в настоящей работе предложен интегральный критерий определения противоизносных свойств смазочных масел, зависимость которого от концентрации продуктов окисления (старения) имеет линейный характер, что позволяет сравнивать масла различных базовых основ и назначения, а также установить влияние сроков хранения на этот критерий.

Существенный вклад в изучение процессов, протекающих на фрикционном контакте, внесли Н. А. Буше, А. Б. Виппер, И. С. Гершман, Д. Н. Гаркунов, Б. И. Костецкий, А. С. Кужаров и др. В этих работах рассмотрены вопросы формирования на поверхностях трения защитных граничных слоев. На основе анализа результатов исследований разработан электрометрический метод оценки интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте при пропускании постоянного тока через пару трения от внешнего стабилизированного источника питания. Это позволило определить продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформаций, протекающих на фрикционном контакте, и оценить влияние продуктов окисления (старения) на их продолжительность, а также обосновать энергетический критерий, учитывающий количество поглощенной энергии при термостатировании масел и триботехнических испытаниях, зависимость которого от концентрации продуктов окисления (старения) имеет линейный характер.

Предметом исследования является метод контроля состояния моторных масел при длительном хранении техники.

Цель диссертационной работы: разработать методическую и приборную базы контроля состояния моторных масел, находящихся на длительном хранении, с применением оптических, термических и триботехнических методов испытания.

Задачи исследований.

1. Разработать комплексную методику контроля и средства измерения характеристик моторных масел, находящихся на длительном хранении, позволяющие осуществлять текущий контроль за их физико-химическим состоянием.

2. Исследовать состояние моторных масел парка машин, находящихся на длительном хранении, с применением комплексной методики и провести статистическую обработку экспериментальных данных.

3. Провести сравнительную оценку параметров термоокислительной стабильности и противоизносных свойств моторных масел, применяемых в современной бронетехнике, исследовать процессы окисления и влияние их на триботехнические параметры, обосновать критерии.

4. Исследовать влияние сроков хранения моторных масел на показатели термоокислительной стабильности и противоизносных свойств.

5. Разработать практические рекомендации по контролю состояния моторных масел, находящихся на длительном хранении, и техническое средство по уменьшению скорости их старения.

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

При выполнении работы применялись стандартные и специально разработанные приборы, а для обработки результатов экспериментальных 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 трибологии, оптики, теплотехники, 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 минеральных моторных масел, включающий определение параметров термоокислительной стабильности, противоизносных свойств и процессов, протекающих на фрикционном контакте.

2. Результаты анализа состояния моторных масел парка машин по концентрации общих, растворимых и нерастворимых 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 моторных масел, применяемых в бронетехнике, и критерий противоизносных свойств.

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

5. Результаты исследования ресурса и противоизносных свойств моторных масел различных сроков хранения.

6. Практические рекомендации по контролю состояния моторных масел при длительном хранении и снижению скорости их старения.

Научная новизна наиболее существенных результатов, полученных лично автором:

1. Разработанный комплексный метод контроля состояния и средства измерения, в отличие от известных, позволяет оценить состояние моторных масел парка машин, находящихся на длительном хранении, установить новые критерии процессов, протекающих в масле, при статических и циклически изменяющихся температурах и триботехнических испытаниях.

2. Предложены новые показатели качества моторных масел, находящихся на длительном хранении, определяющие концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения, воды, состояние вязкости, противоизносные свойства и склонность масел к формированию защитных граничных слоев на поверхности трения, что позволяет совершенствовать систему технического обслуживания машин, повысить эффективность использования смазочных масел за счет организации текущего контроля.

3. Предложен критерий оценки противоизносных свойств моторных масел, характеризующий условную концентрацию продуктов старения на номинальной площади фрикционного контакта, позволяющий оценить противоизносные свойства без испытаний на износ, а применение электрометрического метода позволяет по коэффициенту электропроводности фрикционного контакта и времени его формирования определить склонность масел к формированию защитных граничных слоев на поверхности трения.

4. Установлены общие закономерности изменения оптических свойств товарных моторных масел при окислении, подтверждающие образование двух видов продуктов различной оптической плотности, вызывающих явление перераспределения избыточной тепловой энергии, поглощаемой этими продуктами, и характеризующие процессы самоорганизации, протекающие в смазочном масле при термостатировании, изменения противоизносных свойств товарных масел при их окислении, характеризующие их начальное понижение при значении коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}} < 0,15$ ед. и повышение при увеличении коэффициента $K_{\text{п}} > 0,15$ ед.

5. Установлен энергетический критерий, характеризующий суммарную условную энергию, поглощенную смазочным маслом, при окислении и триботехнических испытаниях, определяемый суммой коэффициента термоокислительной стабильности и параметра износа, зависимость которого от коэффициента поглощения светового потока описывается линейным уравнением, позволяющий сравнивать различные масла и выбирать наиболее термостойкие с лучшими противоизносными свойствами.

Практическая значимость работы. На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации, включающие технологии: диагностирования моторных масел при длительном хранении техники; определения концентрации воды; оценки противоизносных свойств и потенциального ресурса, позволяющие установить влияние климатических условий на состояние масел, планировать сроки их замены по фактическому состоянию. Кроме того, доказано, что применение разработанной замкнутой системы компенсации давления в масляных баках и картере двигателя позволяет исключить попадание извне загрязнений и влаги и тем самым увеличить ресурс.

Реализация результатов работы. Результаты исследований использованы в учебном процессе Института нефти и газа Сибирского федерального университета, в воинских частях Министерства обороны, на базе хранения танковых войск (пос. Козулька, Красноярский край), войсковой части (пос. Топчиха, Алтайский край и г. Новосибирск) и в организациях МЧС (г. Красноярск).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на базе хранения танковых войск (пос. Козулька, Красноярский край), в организациях МЧС (г. Красноярск), войсковых частях (пос. Топчиха, Алтайский край и г. Новосибирск).

Публикации. По теме опубликовано 19 научных работ, включая 9 работ в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, получено три патента РФ №2451293, № 2454654, № 2485486.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 179 страниц, включая 145 страниц машинописного текста, 88 рисунков, 11 таблиц. Работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка литературы из 132 наименований и приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

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 приведены анализ способов хранения техники, источников загрязнения моторных масел и методы их определения; рассмотрено влияние загрязнений на работу двигателей, защитных и коррозионных свойств масел, современных методов контроля процессов старения; обоснован комплексный метод текущего контроля качества масел при эксплуатации и хранении техники.

С этой целью выполнен анализ видов и методов хранения техники, приведена классификация загрязнений и выявлены факторы, влияющие на качество масел при их хранении. Смазочный материал как элемент механической системы влияет на ее надежность, поэтому установление для него предельного состояния является актуальной задачей.

Одной из важных проблем при определении предельного состояния моторных масел является поиск и обоснование критериев оценки механизма их старения при длительном хранении и эксплуатации техники. Так как процесс старения моторных масел характеризуется окислением, расходом функциональных присадок, влиянием климатических условий хранения, техническим состоянием масляной системы, то подход к решению этой проблемы должен быть комплексным.

Основными требованиями к смазочным материалам являются: достаточные противоизносные свойства, обеспечивающие прочность масляной пленки, необходимая вязкость при высоких температурах и высоком градиенте сдвига, способность химически модифицировать поверхности при граничном трении и нейтрализовать кислоты, образующиеся при окислении.

Обзор проведенных исследований выявил отсутствие научно обоснованных критериев оценки предельного состояния смазочных масел, учитывающих влияние продуктов старения на противоизносные свойства и механохимические процессы, протекающие на фрикционном контакте, а также отсутствие технических средств, снижающих процессы старения масел при длительном хранении техники.

В этой связи разработаны основные направления и задачи исследований, включающие определение: состава продуктов старения моторных масел, находящихся на длительном хранении; концентрации воды; противоизносных свойств масел, находящихся на длительном хранении; сопротивляемости окислению; влияния сроков хранения на противоизносные свойства масел и их потенциальный ресурс.

Вторая глава посвящена разработке комплексной методики контроля товарных моторных масел и масел, находящихся на длительном хранении, обоснованию средств контроля с кратким их описанием, технологиям проведения и обработки экспериментальных данных.

При хранении бронетехники применяются в основном три марки моторных масел: МТ-16П, М-16ИХП-3 и М-16Г2ЦС, поэтому в данной главе приведена их характеристика. Все испытания проводились на указанных маслах.

При разработке методики исследования рассмотрены требования к средствам измерения, основное из которых – использование малого объема масел для исключения влияния доливов на процесс старения. В качестве средств измерения применялись: фотометр, малообъемный вискозиметр, прибор для термостатирования масел при статических и циклично изменяющихся температурах, центрифуга, трехшариковая машина трения, со схемой «шар – цилиндр», весы и микроскоп электронный «Альтами MetIM» для измерения пятен износа.

Комплексная методика включает технологии исследования: состояния моторных масел парка машин, находящихся на длительном хранении; термоокислительной стабильности товарных масел и масел с различным сроком

хранения при статических и циклично изменяющихся температурах; противоизносных свойств и процессов, протекающих на фрикционном контакте.

Технология исследования состояния масел представлена на рисунке 1 и предусматривает определение концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения, кинематической вязкости, концентрации воды, противоизносных свойств и интенсивности механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте. Результаты исследования позволяют получить дополнительную информацию по состоянию масел парка машин.

Технология исследования термоокислительной стабильности товарных масел и масел с различным сроком хранения предусматривает использование всех измерительных средств. Испытание масел проводится при статической температуре 170 °С и циклически изменяющейся через 10 °С от 140 до 170 °С и от 170 до 140 °С. Данные исследования позволяют получить информацию о сопротивляемости масел температурным воздействиям и определить: скорости окисления и испарения масел, влияние продуктов окисления на кинематическую вязкость, температурный предел работоспособности; потенциальный ресурс и критерии процессов самоорганизации, протекающие в смазочных материалах, а также влияние сроков хранения на эти параметры. Данная информация позволяет выявить более термостойкие масла с наибольшими температурными пределами работоспособности и потенциальным ресурсом.

Технология исследования противоизносных свойств предусматривает испытания товарных и окисленных масел и масел с различным сроком хранения. Параметры трения: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с, температура масла в объеме – 80 °С, время испытания – 2 ч. Для исследования процессов, протекающих на фрикционном контакте, через один из трех шаров пропускаться постоянный ток величиной 100 мкА от внешнего стабилизированного источника питания 3 В.

Испытание окисленных масел на противоизносные свойства проводилось при значениях коэффициента поглощения светового потока, равных 0,1; 0,2; 0,3...0,8 ед., что позволило оценить влияние концентрации продуктов окисления на противоизносные свойства масел и механохимические процессы, протекающие на фрикционном контакте.

Обработка экспериментальных данных производилась с использованием программы «Advanced Grapher».

Третья глава содержит результаты исследования моторных масел, находящихся на хранении в технике, товарных и окисленных масел с различным сроком хранения; оценку их противоизносных свойств; критерии оценки процессов самоорганизации при их термостатировании и противоизносных свойств; температурные области применения моторных масел.

Влияние климатических условий на состояние моторных масел М-16П исследовано для парка машин, состоящего из 25 ед., по методике, представленной на рисунке 1.

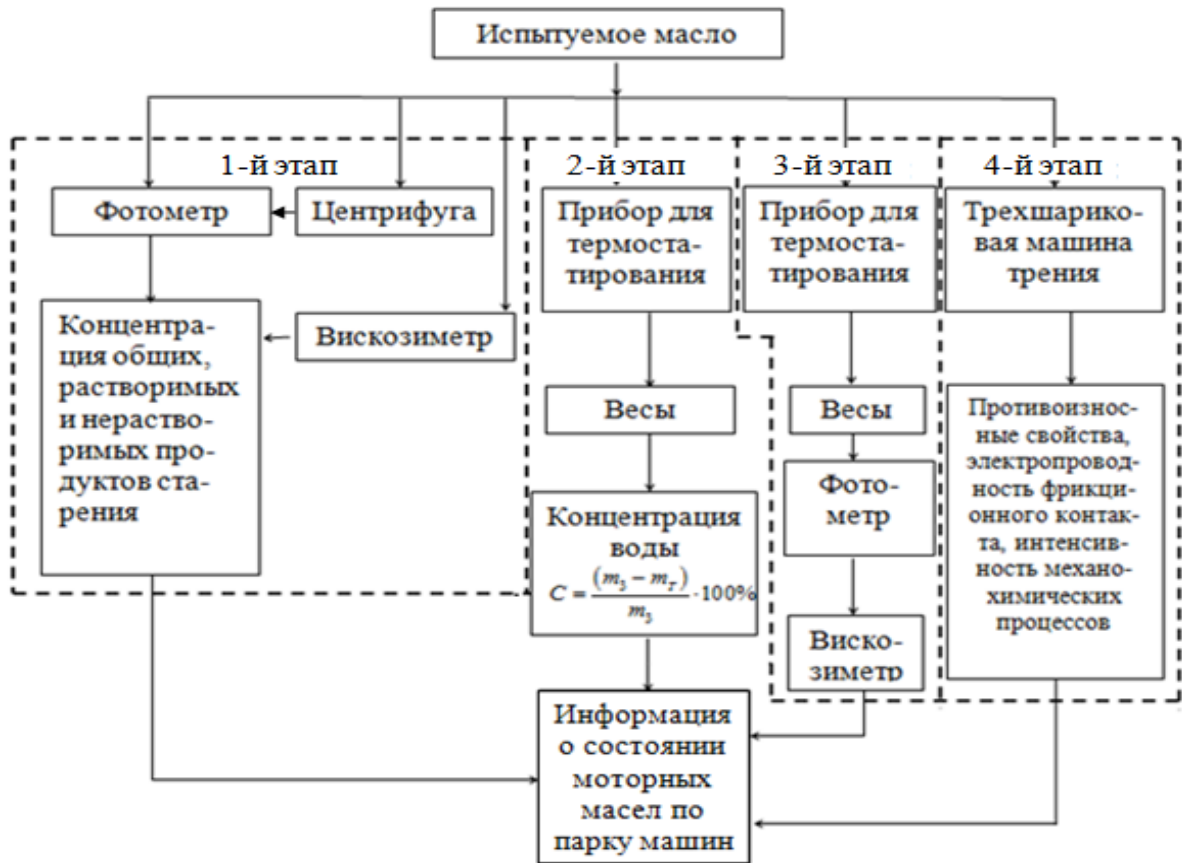


Рисунок 1 – Блок-схема технологии исследования состояния моторных масел парка машин

Оценка производилась по коэффициенту поглощения светового потока, характеризующему концентрацию общих $K_{по}$, растворимых $K_{пр}$ и нерастворимых $K_{нн}$, продуктов старения и кинематической вязкости (рисунок 2).

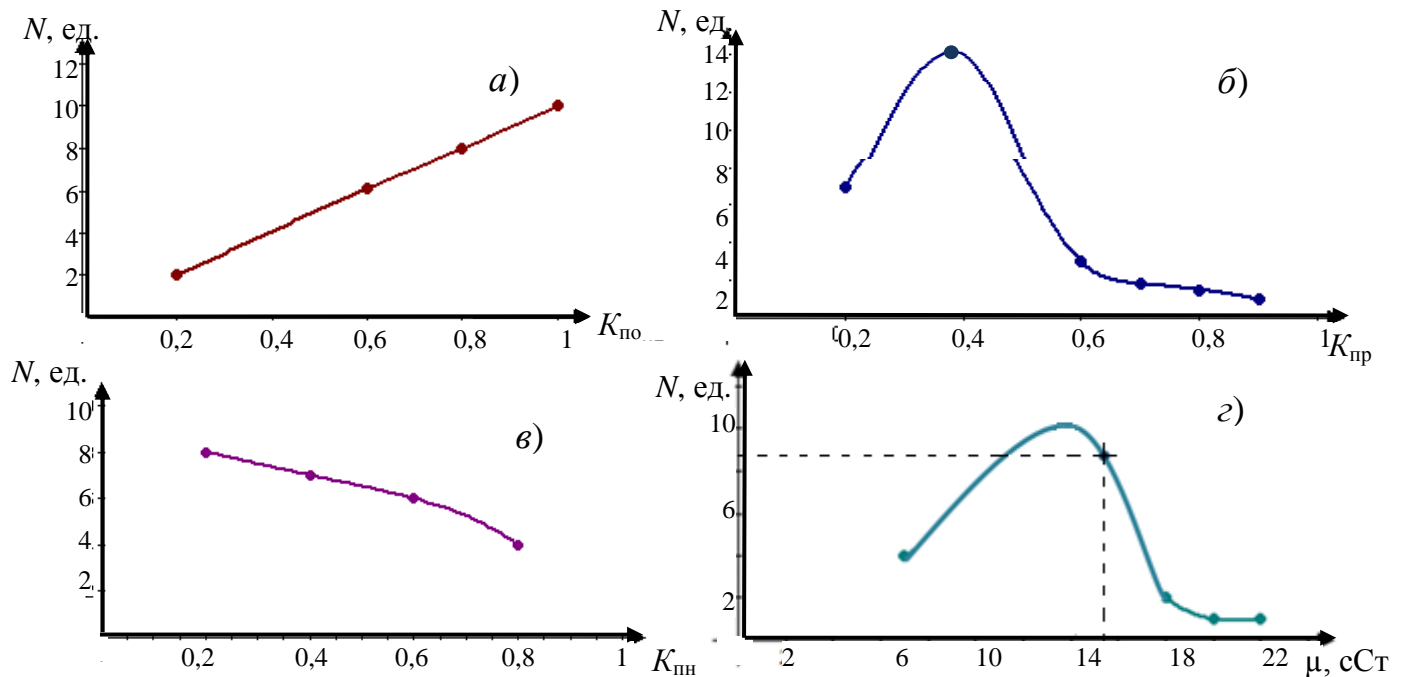


Рисунок 2 – Плотность распределения концентрации общих (а), растворимых (б) и нерастворимых (в) продуктов старения и кинематической вязкости (г)

при испытании минеральных моторных масел МТ-16П

Максимальное загрязнение общими продуктами старения ($K_{по} > 0,8$ ед.) установлено в 10 ед. техники – 40 %, растворимыми ($K_{пр} = 0,9$ ед.) в 1 ед. – 4 % и нерастворимыми ($K_{пн} = 0,8$ ед.) в 4 ед. – 16 %. Вязкость, соответствующая норме (16 сСт), установлена для 8 ед. техники – 32 %, ниже нормы в 14 ед. – 56 % и выше нормы в 4 ед. – 16 %.

Концентрация воды (рисунок 3) определялась путем термостатирования проб масел (100 г) при температуре 120 °С в течение 20 мин при перемешивании с частотой вращения мешалки 300 об/мин. Установлено, что в большинстве машин (11 ед. – 44 %) концентрация воды составила 0,4 %.

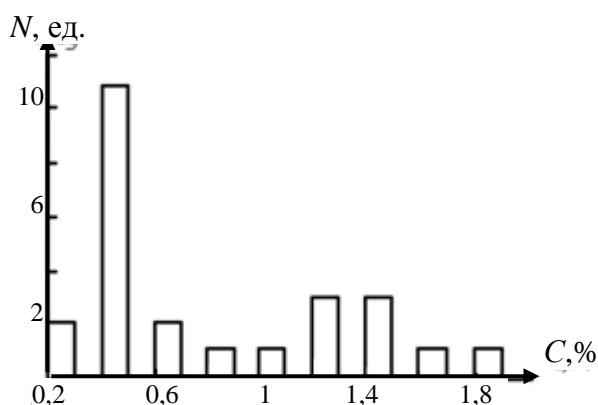


Рисунок 3 – Гистограмма распределения концентрации воды в моторных маслах МТ-16П при хранении техники

Сопrotивляемость масел МТ-16П температурным воздействиям оценивалась по изменению коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ и испарению G при температуре 170 °С и времени испытания 3 ч при перемешивании масел стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. Исследования показали (рисунок 4), что для большинства проб масел (12 ед. – 48 %) коэффициент $K_{п}$ увеличился на 0,04 ед., а испаряемость в 11 пробах масла (44 %) составила 6 г (рисунок 5).

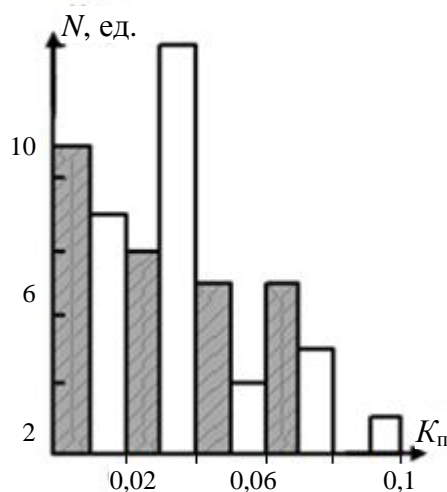


Рисунок 4 – Гистограмма изменения коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ минеральных масел МТ-16П при хранении в технике: ■ – до окисления; □ – после окисления в течение 3 ч для парка машин (толщина фотометрического слоя 0,15мм)

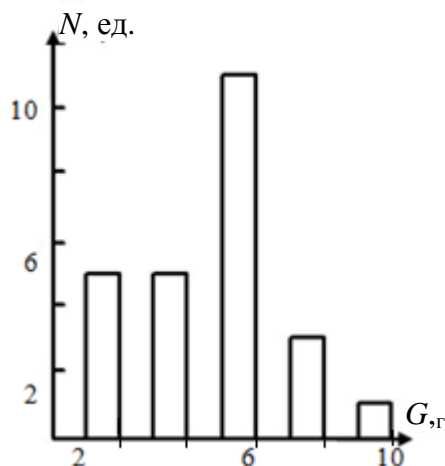


Рисунок 5 – Гистограмма испаряемости минерального масла МТ-16П после окисления в течение 3 ч для парка машин

Противоизносные свойства масел (рисунок 6), оцениваемые по диаметру пятна износа, для большинства проб (17 ед. – 68 %) составили до 0,3 мм.

Полученная информация по состоянию моторных масел при хранении техники позволяет выявить машины с плохими показателями физико-химических свойств моторных масел и спланировать их замену, а также при наборе статистических данных определить предельное состояние моторных масел по вязкости, концентрации нерастворимых продуктов старения, воды и противоизносным свойствам.

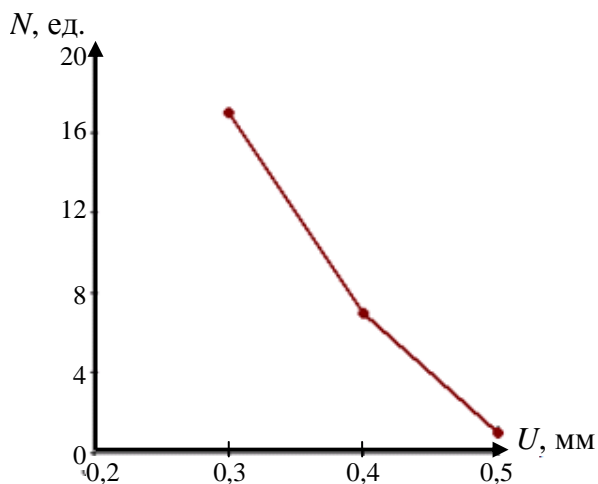


Рисунок 6 – Распределение противоизносных свойств моторных масел МТ-16П по парку машин

В результате исследований моторных масел МТ-16П; М-16ИХП-3 и М-16Г2ЦС (срок хранения 1 год) доказана эффективность применения комплексной методики, направленной на получение информации по выбору масел для двигателей различной степени нагруженности. Испытаниями масел на термоокислитель-

ную стабильность при статической температуре 170 °С и циклически изменяющейся в диапазоне от 140 до 170 °С и от 170 до 140 °С через 10 °С определены: зависимости коэффициента поглощения светового потока K_{Π} от времени испытания; влияние продуктов окисления на вязкость и противоизносные свойства; влияние температуры на испаряемость масел и скорости окисления и испарения; критерии интенсивности процессов самоорганизации; установлено явление перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения; определен потенциальный ресурс. Результаты испытания представлены в таблице.

Таблица – Экспериментальные данные исследованных масел

| Показатель | Марка масла | | |
|--|--------------------|--------------------|------------------|
| | МТ-16П | М-16ИХП-3 | М-16Г2ЦС |
| Время испытания при температуре 170 °С, ч | 24,0 | 56,0 | 56,0 |
| Показатели испытания при температуре 170 °С (в конце испытания): | | | |
| коэффициент поглощения светового потока | 0,79 | 0,84 | 0,8 |
| коэффициент термоокислительной стабильности | 0,8 | 0,88 | 0,82 |
| увеличение вязкости | 1,17 | 1,24 | 1,1 |
| испаряемость, г | 1,8 | 3,2 | 5,4 |
| средняя скорость испаряемости, г/ч | 0,075 | 0,057 | 0,096 |
| критерий противоизносных свойств П | $\Pi=3,563K_{\Pi}$ | $\Pi=4,375K_{\Pi}$ | $\Pi=3,8K_{\Pi}$ |
| показатели при циклическом изменении температуры от 140 до 170 °С. | | | |
| время испытания, ч | 2,0 | 5,0 | 7,0 |
| температура начала, окисления, °С | < 140 | < 140 | < 150 |
| температура начала испарения, °С | < 140 | < 140 | < 140 |

Из представленных данных видно, что лучшими показателями обладает масло М-16Г2ЦС, хотя по критерию противоизносных свойств оно уступает маслу М-16ИХП-3.

Потенциальный ресурс определялся временем достижения установленного значения коэффициента $K_{\Pi} = 0,8$ ед., а при циклическом изменении температуры испытания – количеством циклов повышения и понижения температуры испытания. Кроме того, по минимальным значениям скоростей окисления и испарения при циклическом изменении температуры установлены температуры начала окисления и испарения.

Критерий противоизносных свойств моторного масла, характеризующий условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, определялся отношением коэффициента поглощения светового потока к диаметру пятна износа. Установлены линейные зависимости критериев противоизносных свойств П от коэффициента K_{Π} , что позволяет сравнивать моторные масла различных марок.

Термоокислительную стабильность минеральных масел предложено оценивать коэффициентом $E_{\text{ТОС}}$, определяемым суммой коэффициентов K_{Π} и испарения K_G :

$$E_{\text{тос}} = K_{\text{п}} + K_{\text{Г}}, \quad (1)$$

$$K_{\text{Г}} = m/M, \quad (2)$$

где m и M – соответственно массы испарившегося масла и оставшегося после термостатирования.

Интенсивность процессов, протекающих на фрикционном контакте, предложено оценивать коэффициентом электропроводности фрикционного контакта, позволившего определить продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций.

Влияние сроков хранения масел на процессы, протекающие при термостатировании, и влияние продуктов окисления на процессы, протекающие при граничном трении скольжения, исследовалось на минеральном масле М-16ИХП-3, сроки хранения которого составили 20, 12 и 1 год, а вязкость соответственно – 16,29; 16,06; 15,33 сСт. Масла испытывались при статической температуре 170 °С и циклически изменяющейся в диапазоне от 140 до 170 °С с повышением и понижением на 10 °С.

Результаты термостатирования представлены на рисунке 7. В ходе исследований установлено, что масла со сроком хранения 20 и 12 лет имеют начальную оптическую плотность 0,047 ед. (кривые 1, 2), а масло 1-го года хранения имеет область сопротивления окислению продолжительностью 5 ч (кривая 3). За 32 ч испытания коэффициент $K_{\text{п}}$ незначительно зависит от сроков хранения, однако при дальнейшем окислении зависимости $K_{\text{п}} = f(t)$ для масел со сроком хранения 1 и 12 лет (кривые 2, 3) претерпевают изгиб при $K_{\text{п}} \approx 0,38$ ед., а для масла со сроком хранения 20 лет (кривая 1) зависимость имеет линейный характер. Изгиб функциональной зависимости $K_{\text{п}} = f(t)$ объясняется образованием двух видов продуктов окисления различной оптической плотности. Таким образом, исследования показали, что при увеличении сроков хранения масел их сопротивляемость окислению возрастает.

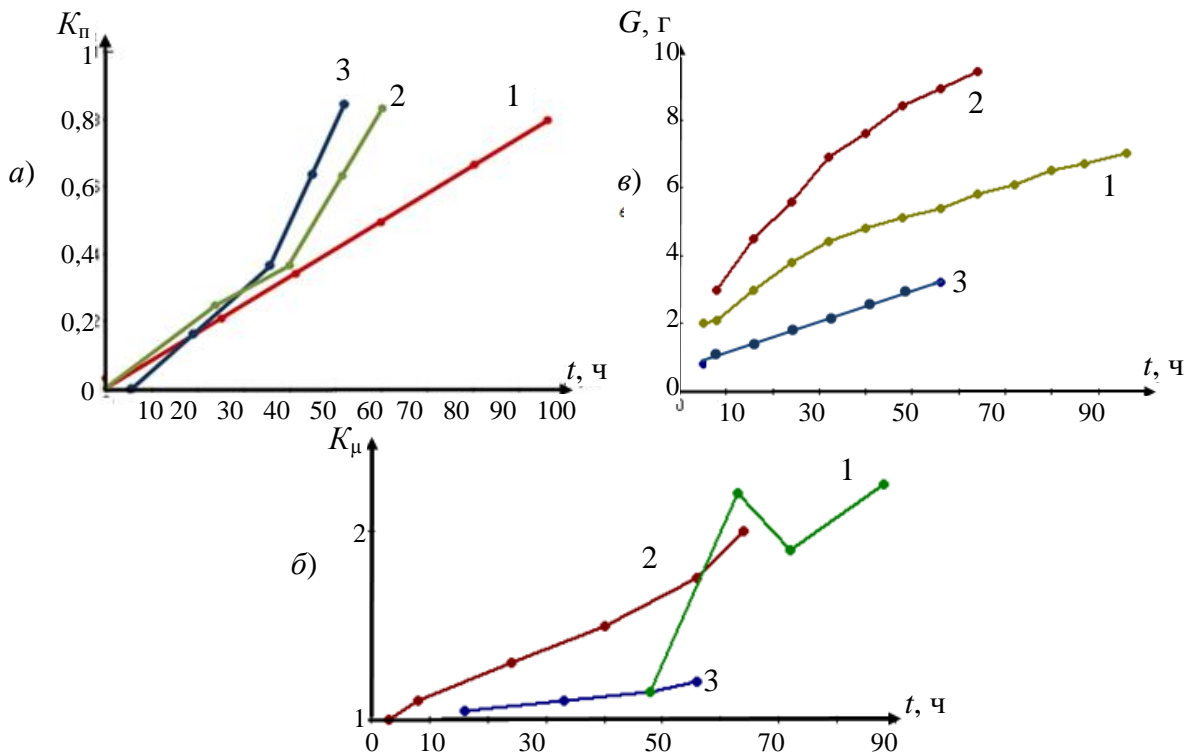


Рисунок 7 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока (a) относительной вязкости (b) и испаряемости (v) от времени окисления и срока хранения моторного масла М-16ИХП-3: 1 – 20 лет; 2 – 12 лет; 3 – 1 год

Вязкость масел (рисунок 7, b), определяемая коэффициентом относительной вязкости, независимо от сроков хранения, при их окислении увеличивается, однако более стабильное ее изменение установлено для масла со сроком хранения 1 год (кривая 3), т. е. при увеличении сроков хранения вязкость моторного масла при окислении возрастает более интенсивно.

Испаряемость масел (рис. 7, v) при окислении не имеет четкой зависимости от сроков хранения, а зависит от концентрации воды и ее влияния на присадки.

При окислении масел протекают процессы самоорганизации как защитная функция от температурных воздействий. В результате избыточная тепловая энергия поглощается продуктами окисления и испарения, а так как при окислении образуются продукты различной оптической плотности и энергоемкости, происходит перераспределение избыточной тепловой энергии в сторону увеличения скорости образования тех или иных продуктов. В этой связи для оценки интенсивности исследуемых процессов предложен коэффициент K_c , определяемый отношением скорости окисления к скорости испарения (рисунок 8).

Исследования показали, что интенсивность процессов самоорганизации более ярко выражена для масла со сроком хранения 1 год (кривая 3).

Противоизносные свойства масел зависят от сроков хранения (рисунок 9). Так, для масла со сроком хранения 1 год (кривая 3) они понижаются в начале окисления ($K_{п} = 0,13$ ед.), а затем повышаются и превосходят товарное масло (точка на ординате). Для масел со сроками хранения 12 и 20 лет противоизносные свойства в начале окисления соответствуют товарному маслу (пунктирная линия), а затем понижаются на 30 % и стабилизируются на уровне 0,3–0,34 мм (кривые 1, 2).

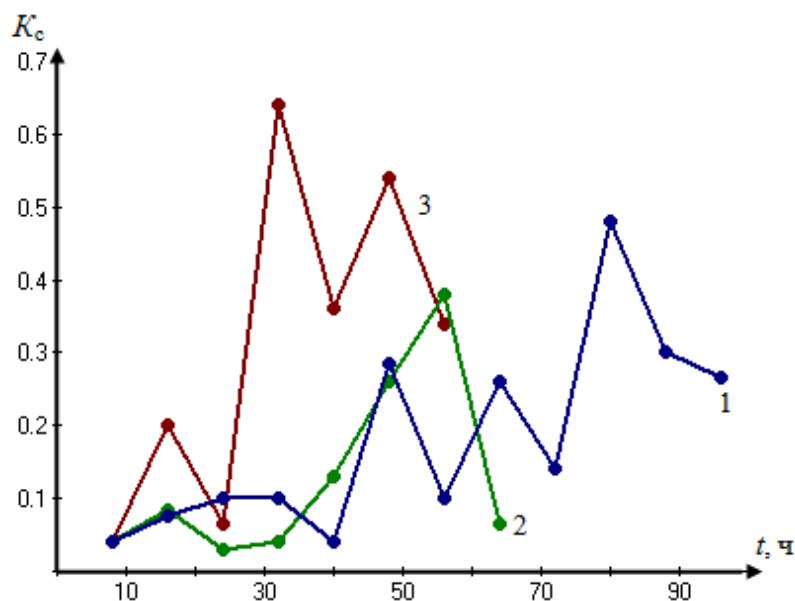


Рисунок 8 – Зависимости коэффициента интенсивности процессов самоорганизации

от времени окисления и сроков хранения масел М-16ИХП-3 (усл. обозн. см. на рисунке 7)

Автором предложен критерий оценки противоизносных свойств Π , определяемый отношением коэффициента K_{Π} к параметру износа, характеризующий условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта (рис. 9, б). Установлено, что независимо от сроков хранения масел зависимость $\Pi = f(K_{\Pi})$ имеет линейный характер, однако угол наклона данной зависимости к оси абсцисс зависит от сроков хранения. Чем больше угол наклона зависимости к оси абсцисс, тем выше противоизносные свойства масел.

Регрессионные уравнения критерия Π для масел с разными сроками хранения имеют следующий вид:

$$1 \text{ год } \Pi = 4,412 K_{\Pi}, \quad (3)$$

$$12 \text{ лет } \Pi = 2,5 K_{\Pi} + 0,25, \quad (4)$$

$$20 \text{ лет } \Pi = 2,69 K_{\Pi} + 0,25. \quad (5)$$

Из представленных данных видно, что наибольшая скорость изменения критерия Π у масла, срок хранения которого 1 год (кривая 3).

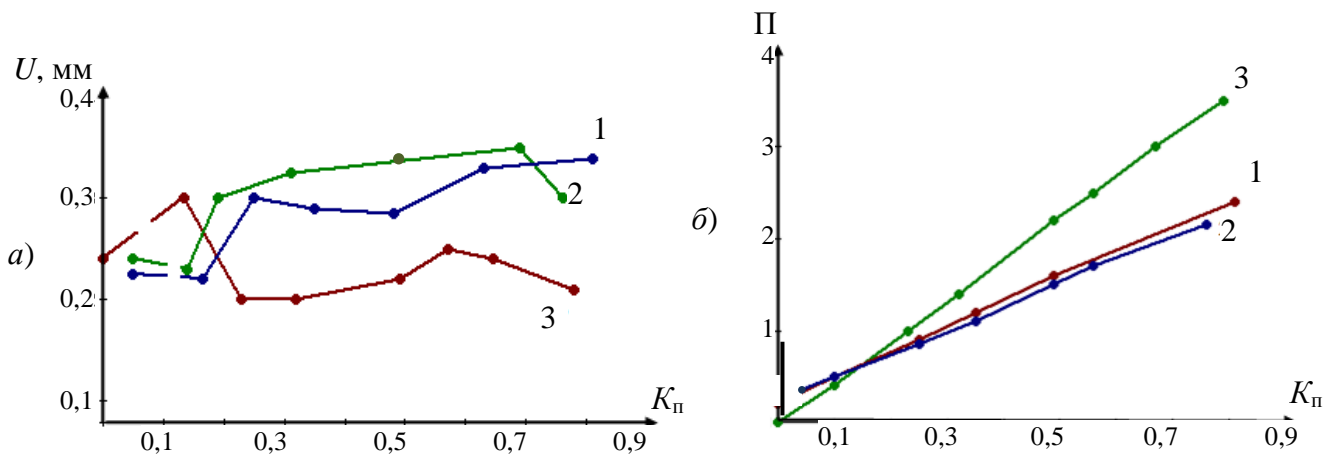


Рисунок 9 – Зависимости диаметра пятна износа U (а) и критерия противоизносных свойств Π (б) от коэффициента поглощения светового потока и сроков хранения моторного масла М-16ИХП-3 (усл. обозн. см. на рисунке 7)

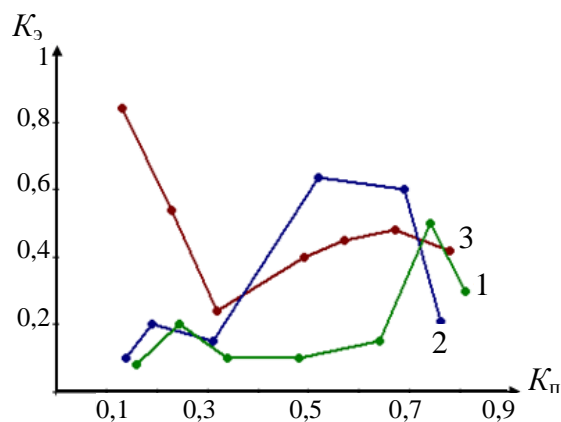


Рисунок 10 – Зависимости коэффициента электропроводности фрикционного контакта K_3 от коэффициента поглощения светового потока и сроков хранения моторного масла М-16ИХП-3 (усл. обозн. см. на рисунке 7)

Интенсивность механохимических процессов зависит от механической и химической составляющих изнашивания, причем химическая составляющая определяет электрические свойства граничных слоев. При повышении электрического сопротивления граничных слоев коэффициент электропроводности K_3 уменьшается (рисунок 10), что обуславливает разделение поверхностей трения, а значит, уменьшение износа.

При циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от 140 до 170 °С через 10 °С (рисунок 11) масло со сроком хранения 20 лет (кривая 1) выдержало неполных 4 цикла, а масла со сроком хранения 1 и 12 лет – 5 циклов. При этом скорость окисления наименьшая у масла, срок хранения которого 1 год (кривая 3), чего не наблюдалось при статической температуре 170 °С (см. рисунок 7).

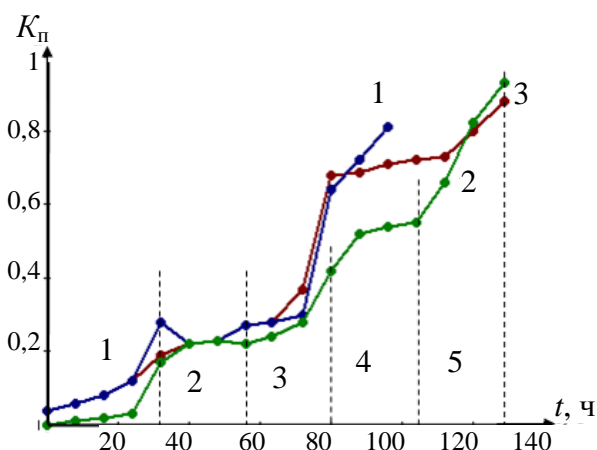


Рисунок 11 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления и сроков хранения моторного масла М-16ИХП-3 при циклическом изменении температуры: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры; 2, 4 – циклы понижения температуры (усл. обозн. см. на рисунке 7)

Для определения температур начала окисления и испарения масел с различным сроком хранения построены зависимости скоростей окисления и испарения от продолжительности испытания (рисунок 12) при циклическом изменении температуры. Исследования показали, что амплитуда скоростей окисления и испарения зависит от сроков хранения масла: чем они больше, тем больше амплитуда.

Влияние сроков хранения масел на потенциальный ресурс определен при статической температуре 170 °С и циклически изменяющейся в диапазоне температур от 140 до 170 °С (рисунок 13) и значении коэффициента $K_п = 0,8$ ед.

$V_{Kп}$, ед./ч

V_G , г/ч

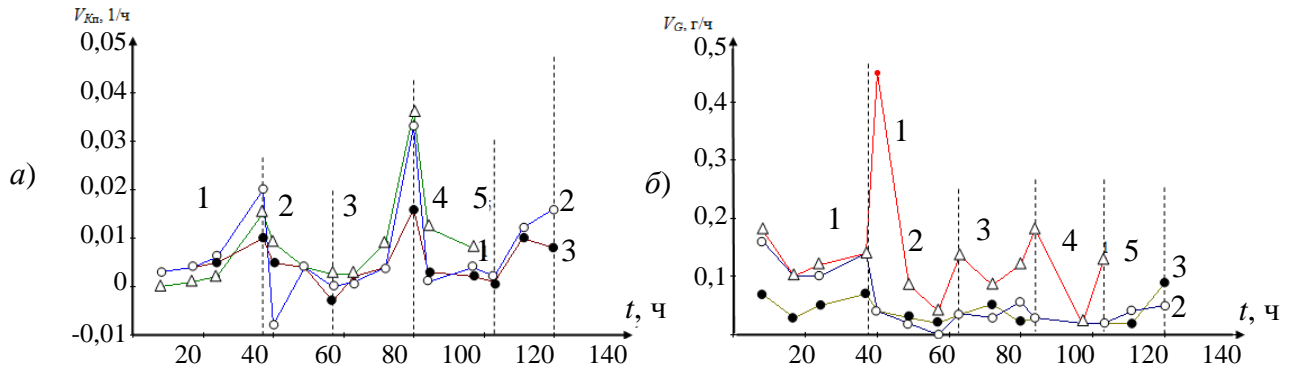


Рисунок 12 – Зависимости скоростей окисления (а) и испарения (б) моторного масла М-16 ИХП-3 от времени окисления и сроков хранения при циклическом изменении температуры (усл. обозн. см. на рисунке 7)

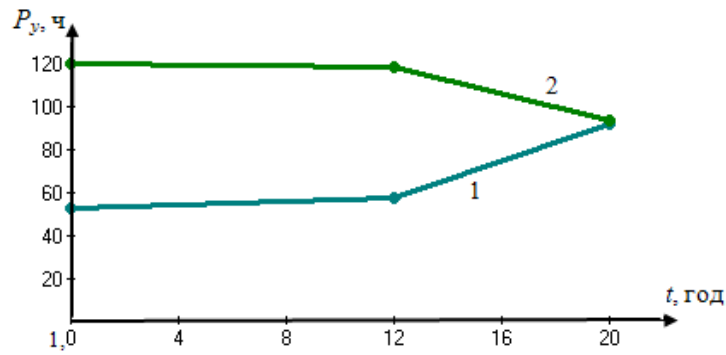


Рисунок 13 – Зависимости потенциального ресурса при окислении минерального моторного масла М-16 ИХП-3 от сроков хранения ($K_{\text{п}} = 0,8$ ед.): 1 – температура испытания 170 °С; 2 – циклическое изменение в диапазоне от 140 до 170 °С

Установлено, что при статической температуре 170 °С ресурс возрастает при увеличении сроков хранения масел (кривая 1); при циклическом изменении температур он уменьшается, а при сроке хранения 20 лет не зависит от условий испытания. Из представленных данных видно, что ресурс незначительно изменяется в течение срока хранения до 12 лет как при статической температуре испытания, так и циклически изменяющейся.

На основе проведенных исследований для оценки состояния моторных масел, заправленных в технику длительного хранения, предложены следующие показатели: вязкость, коэффициент поглощения светового потока, коэффициент термоокислительной стабильности, испаряемость, состав продуктов старения, коэффициент интенсивности процессов самоорганизации, температуры начала окисления и испарения, противоизносные свойства, критерий противоизносных свойств, коэффициент электропроводности фрикционного контакта и энергетический критерий.

Четвертая глава посвящена разработке практических рекомендаций по контролю состояния моторных масел, включающих технологии: диагностирования моторных масел, заправленных в технику, находящуюся на длительном хранении; определения концентрации влаги; оценки противоизносных свойств; определения потенциального ресурса моторных масел при длительном хранении, а также предложения

по снижению скорости процессов старения масел, заправленных в технику длительного хранения за счет применения разработанного устройства замкнутой системы компенсации давления в масляных баках и картере двигателя, исключающего попадание извне загрязнений и влаги.

Основные научные результаты и выводы

1. Впервые разработана комплексная методика контроля состояния моторных масел, включающая прямое фотометрирование, центрифугирование, определение показателей термоокислительной стабильности, противоизносных свойств и интенсивности процессов, протекающих при окислении и в зоне фрикционного контакта, которая предлагается для испытания масел, находящихся в объектах длительного хранения (до 20 лет), что позволяет получить дополнительную информацию о состоянии моторных масел, оценить текущее их состояние для парка машин и повысить эффективность использования смазочных материалов в целом.

2. Мониторинг состояния моторных масел парка машин (40 ед.) показал, что при длительном хранении техники такие параметры состояния, как оптические свойства и состав продуктов старения изменяются в широких пределах от 0,1 до 1,0 ед.: вязкость – от 12,0 до 22,0 сСт (норма $16 \pm 0,5$ сСт), концентрация воды – от 0,1 до 1,8 г и противоизносные свойства – от 0,25 до 0,5 мм, что позволяет совершенствовать систему планирования смены масел, выявить причины ускоренного процесса старения масел и разработать рекомендации по их устранению.

3. Получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения процессов старения и окисления товарных масел и масел, находящихся на длительном хранении в технике, на основании которых установлено, что при старении и окислении масел образуется два вида продуктов различной оптической плотности. Причем первичные продукты являются исходным материалом для образования вторичных и происходящие в них процессы обуславливают явления перераспределения избыточной тепловой энергии между этими продуктами, характеризуют процессы самоорганизации, протекающие в смазочном материале, интенсивность которых предложено оценивать коэффициентом, определяемым отношением скорости окисления (старения) к скорости испарения.

4. Предложен критерий оценки противоизносных свойств моторных масел, находящихся на длительном хранении и испытываемых на термоокислительную стабильность при статических и циклически изменяющихся температурах, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа и характеризующий условную концентрацию продуктов старения (окисления) на номинальной площади фрикционного контакта. Установлена линейная зависимость между критерием и коэффициентом поглощения светового потока, угол наклона которой к оси абсцисс определяет противоизносные свойства испытываемого масла, что позволяет контролировать противоизносные свойства без триботехнических испытаний.

5. Установлена общая закономерность изменения противоизносных свойств моторных масел при их окислении, заключающаяся в том, что при концентрации продуктов окисления $K_{\text{п}} = 0,15$ ед. противоизносные свойства понижаются, при увеличении концентрации они повышаются, а при увеличении сроков хранения противоизносные

свойства вновь понижаются. В качестве триботехнических параметров минеральных масел, наряду с износом, предложены коэффициент электропроводности фрикционного контакта и время его формирования. Увеличение коэффициента электропроводности в области формирования адсорбционных слоев вызывает увеличение износа, а в области хемосорбционных слоев значения износа колеблются из-за различной прочности этих слоев; кроме того, при переходе одних слоев в другие наблюдается резкое изменение времени их формирования.

6. Предложен энергетический критерий, определяемый суммой коэффициента термоокислительной стабильности и параметра износа, характеризующий суммарную условную энергию, поглощенную смазочным маслом при окислении и триботехнических испытаниях, зависимость которого от коэффициента поглощения светового потока описывается линейным уравнением; при этом чем больше угол наклона зависимости к оси абсцисс, тем ниже противоизносные свойства испытываемого масла и его сопротивляемость температурным воздействиям. Доказано, что данный критерий не зависит от сроков хранения масел до 10 лет, но при увеличении сроков свыше 10 лет, возрастает из-за увеличения концентрации продуктов старения, загрязнений и воды, попадающих извне.

7. Разработаны практические рекомендации, включающие технологии: диагностирования моторных масел, заправленных в технику, содержащуюся на длительном хранении; определения концентрации воды; оценки противоизносных свойств и потенциального ресурса моторных масел, позволяющие установить влияние климатических условий на состояние моторных масел, планировать сроки их замены по фактическому состоянию. Применение разработанной замкнутой системы компенсации давления в масляных баках и картере двигателя позволяет исключить попадание извне загрязнений и влаги и тем самым повысить эффективность использования масел и увеличить ресурс.

Основное содержание диссертационной работы отражено в публикациях:

а) статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Рунда, М.М. Процессы самоорганизации в минеральных моторных маслах при их окислении / М.М. Рунда, А.В. Берко, Б.И. Ковальский // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – Вып. 2. – С. 67–71.

2. Ковальский, Б.И. Процессы самоорганизации в частично синтетических моторных маслах при их окислении / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, А.В. Берко // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – Вып. 3. – С. 66–69.

3. Ковальский, Б.И. Влияние доливов на процессы окисления моторных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Мальшева, М.М. Рунда, В.Г. Шрам // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – №4 (86). – С. 58–63.

4. Ковальский, Б.И. Исследования влияния продуктов окисления на противоизносные свойства минерального трансмиссионного масла ТСЗП-8 / Б.И. Ковальский, В.С. Янович, М.М. Рунда и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – №6 (88). – С. 55–61.

5. 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. Вестник нефтяных компаний. – 2012. – № 5. – С.19–24.

6. 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.

7. Рунда, М.М. Методика предварительного выбора моторных масел / М. М. Рунда, Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева, И. А. Шумовский // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. – 2012. – №8 (67). – С.130–135.

8. Верещагин, В.И. Результаты исследования состояния моторного масла при эксплуатации двигателя / В. И. Верещагин, Б. И. Ковальский, М. М. Рунда // Вестник Томского политехнического университета. – 2013.– Т. 322 (№2). – С. 157–159.

б) патенты

9. Пат. № 2451293 РФ, МПК GOIN 33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, М.М. Рунда, и др.; заявитель патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 201110660/15; заявл. 22.02.2011; опубл. 20.05.12, Бюл. № 14.

10. Пат. № 2454654 РФ, МПКGOIN 3/56, GOIN 33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, М.М. Рунда и др.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011107418/28; заявл. 22.02.2011; опубл. 27.06.12, Бюл. № 18.

11. Пат. № 2485486 РФ, МПКGOIN 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, А.В. Юдин, М.М. Рунда и др.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011144795/28; заявл. 03.11.2011; опубл. 20.06.13, Бюл. № 17.

в) другие издания

12. Ковальский, Б.И. К вопросу исследования влияния характеристик ГСМ на эксплуатацию вооружения и военной техники / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда. // Бюллетень научно-методических материалов. 2011. – № 63. – С. 209–215.

13. Ковальский, Б.И. Результаты испытания минеральных моторных масел на термоокислительную стабильность / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, А.В. Берко // Сборник диссертационных исследований докторов, адъютантов и соискателей академии. – 2011. – Вып. 4. – С. 175–184.

14. Берко, А.В. Влияние термоокислительных процессов на противоизносные свойства моторного масла МТ-16п / А.В. Берко, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда // Сборник рефератов депонированных рукописей. – ЦВНИ МО РФ. – 2011. – № 98. – С. 25.

15. Безбородов, Ю.Н. Процессы самоорганизации в минеральных моторных маслах при их окислении / Ю.Н. Безбородов, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда // Сборник рефератов депонированных рукописей. – ЦВНИ МО РФ. –2011. – № 95. – С. 31.

16. Ковальский, Б.И. Результаты испытания на термоокислительную стабильность при циклическом изменении температуры / Б.И. Ковальский, А.А. Мосолов, М.М. Рунда // Сборник рефератов депонированных рукописей. – ЦВНИ МО РФ. – 2011. – № 95. – С. 49.

17. Ковальский, Б.И. Результаты исследования моторного масла МТ-16п при хранении бронетехники / Б.И. Ковальский, А.А. Мосолов, М.М. Рунда, В.С. Янович // Сборник рефератов депонированных рукописей. – ЦВНИ МО РФ. – 2011. – № 95. – С. 151.

18. Рунда, М.М. Исследование влияния характеристик ГСМ на эксплуатацию вооружения и военной техники / М.М. Рунда, Б.И. Ковальский, А.В. Берко // Бюллетень научно-методических материалов. – 2011. – Вып. 63. – С. 209–215.

19. Ковальский, Б.И. Влияние климатических условий эксплуатации двигателей на процесс старения моторного масла / 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.