

На правах рукописи



Шрам Вячеслав Геннадьевич

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И
МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ**

Специальность:

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки)

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

Официальные оппоненты: **Денисов Валерий Николаевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО Национальный минерально-сырьевой университет "Горный", профессор
кафедры приборостроения

Глухов Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО "Омский государственный
технический университет", заведующий ка-
федрой метрологии и приборостроения

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Российский государственный
университет нефти и газа
им. И. М. Губкина» (РГУ нефти и газа
им. И.М. Губкина) г. Москва

Защита состоится « 3 » 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. Белинского, 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 темы исследования. Работоспособность смазываемых деталей не может быть обеспечена в отрыве от рассмотрения условий смазки, ибо она зависит от поведения всей триады «металл-смазочный материал-металл». Смазочный материал должен рассматриваться как конструкционный материал, применение которого не может и не должно носить случайного характера. Выбор смазочного материала должен производиться конструктором столь же продуманно, как и выбор материала, термообработки, микрогеометрии и т.д. Определение критических температур важно для предварительного выбора смазочного материала при проектировании и эксплуатации соответствующего узла трения. Приближенным расчетом можно оценить возможную температуру в контакте сопряжения при наиболее тяжелых условиях его работы и подобрать смазочный материал с несколько большей критической температурой. В этой связи, разработка метода контроля интенсивности процессов температурной деструкции масел и влияние их продуктов и нагрузки на противоизносные свойства является актуальной задачей, решение которой позволит создать банк данных для современных масел, и обеспечит обоснованный их выбор на стадии проектирования техники.

Степень разработанности темы. Температурная стойкость как эксплуатационный показатель, характеризует температурную область работоспособности смазочных материалов и определяется непосредственно при граничном трении скольжении или в объеме по лаконогаарообразованию. В этой области известны работы Р.М. Матвеевского, И.А. Буяновского, Н.К. Мышкина, и др. Температурная стойкость смазочных масел при трении определяется по критическим температурам (ГОСТ 23.221-84), нагрузкам схватывания и обобщенным показателем износа. Все показатели определяются по величине износа или коэффициенту трения. При этом учитываются изменения свойств масел в результате температурной, механической и химической деструкций, протекающих на поверхностях трения в контакте.

Задачи исследования в диссертационной работе предусматривают предварительное термостатирование масел, в результате чего в объеме масла протекает процесс температурной деструкции базовой основы и легирующих присадок. Влияние температуры на процесс деструкции оценивалось оптическим методом по коэффициенту поглощения светового потока, вязкости, испаряемости, а продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства – по величине износа.

Объекты исследования: моторные масла различных базовых основ.

Предмет исследования: процессы температурной деструкции моторных масел и влияние продуктов этих процессов и нагрузки на противоизносные свойства.

Цель диссертационной работы: разработать метод контроля процессов температурной деструкции моторных масел различных базовых основ и влияния их продуктов и нагрузки на противоизносные свойства.

Задачи исследования:

1. Разработать комплексный метод контроля процессов температурной деструкции моторных масел различных базовых основ и влияния их продуктов и нагрузки на противоизносные свойства.
2. Исследовать влияние температуры в диапазоне от 140 до 300 °С на интенсивность процессов деструкции моторных масел различной базовой основы и обосновать критерий оценки.
3. Исследовать влияние концентрации продуктов температурной деструкции и нагрузки на изнашивание и обосновать критерий оценки.
4. Разработать практические рекомендации по выбору смазочных масел в зависимости от степени нагруженности и температурного режима работы.

Научная новизна работы:

1. Разработан комплексный метод контроля процессов температурной деструкции моторных масел различной базовой основы, включающий оценку влияния температуры на процессы деструкции масел и их продуктов на противоизносные свойства, определяемого изменением оптических свойств, вязкости, испаряемости и смазывающей способности при увеличении нагрузки.
2. Получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения процессов температурной деструкции моторных масел, позволяющие установить: температурные области образования двух видов продуктов деструкции, различающиеся оптическими свойствами и энергоемкостью их образования; явление перераспределения избыточной тепловой энергии на образование продуктов деструкции и испарение; критерий температурной стойкости, определяемый суммой коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости, позволяющий сравнивать смазочные масла по стойкости к температурным воздействиям.
3. Получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения изменения противоизносных свойств термостатированных моторных масел от концентрации продуктов температурной деструкции и нагрузки, что позволило установить: три характерных температурных области, независимо от базовой основы, различающиеся величиной износа и температурным диапазоном их формирования; температурный диапазон действия продуктов деструкции присадок, обеспечивающих предотвращение схватывания; критерий противоизносных свойств смазочных масел, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа, характеризующий условную концентрацию продуктов температурной деструкции на номинальной площади фрикционного контакта,

позволяющий сравнивать различные смазочные масла по противоизносным свойствам.

4. Разработаны практические рекомендации, включающие технологии определения: температурной стойкости и совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства термостатированных масел; предложения по совершенствованию классификации моторных масел, позволяющие создать банк данных (справочник) по смазочным маслам с новыми показателями и обоснованно осуществлять их выбор при проектировании техники в зависимости от степени нагруженности и температурного режима работы.

Практическая значимость. На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации по технологиям определения: температурной стойкости смазочных масел, влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства, предложения по совершенствованию классификации моторных масел, позволяющие создать банк данных (справочник) по смазочным маслам с новыми показателями и обоснованно осуществлять их выбор.

Методы исследования: решение поставленных задач осуществлялось с применением теоретического анализа механизма температурной деструкции смазочных масел, теории трения, износа и смазки, оптики и теплотехники. При выполнении работы применялись поверенные стандартные и специально разработанные автором приборы, теория планирования и обработки результатов экспериментальных исследований, методы математической статистики и регрессионного анализа.

На защиту выносятся:

1. Комплексный метод контроля процессов температурной деструкции моторных масел различных базовых основ и влияния их продуктов и нагрузки на противоизносные свойства.

2. Результаты экспериментальных исследований и регрессионного анализа процессов температурной деструкции моторных масел различной базовой основы в диапазоне температур от 140 до 300 °С и критерий температурной стойкости.

3. Результаты исследований влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на изнашивание и критерий противоизносных свойств.

4. Практические рекомендации по выбору смазочных масел в зависимости от степени нагруженности и температурного режима работы.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных в работе научных положений, выводов и рекомендаций, подтверждается теоретически и экспериментально. Научные положения аргументированы, теоретические результаты работы получены с использованием положений трибологии, оптики, теплотехники, выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями, их воспроизводимостью и

результатами математической обработки с использованием сертифицированных программ.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены, на Международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири», посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета (Тюмень, 2011), Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук (Санкт-Петербург, 2012), на XIII научно-технической конференции молодежи ОАО «Транссибнефть» (Омск, 2012), на II научно-практической конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса» (Новокузнецк, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, в том числе 7 статей в изданиях рекомендованных ВАК, 1 патент РФ.

Личный вклад автора. Автором лично разработаны методы контроля температурной стойкости и противоизносных свойств моторных масел, проведены исследования и их математическая обработка, оценено влияние продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства масел различной базовой основы, обоснованы критерии температурной деструкции и противоизносных свойств, участие в подготовке научных статей и оформлении патента.

Объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, изложенных на 143 страниц машинописного текста, поясняется 60 рисунками, 9 таблицами. Список литературы включает 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен обзор методов и средств определения температурной стойкости смазочных масел, роль этого показателя в классификации масел и температурной области работоспособности трибосопряжений, влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на смазывающие свойства масел и формирования граничных слоев.

С этой целью выполнен анализ в области классификации смазочных масел, который показал, что информация предоставляемая производителями нефтепродуктов, разработчикам новой техники и эксплуатационникам недостаточна для принятия обоснованного решения по их выбору для машин и механизмов различной степени нагруженности. Кроме того отсутствуют экспрессивные методы определения предельных температур работо-

способности масел, недостаточно изучен механизм изменения свойств граничных слоев вследствие температурной деструкции масел на нагрузку схватывания. В этой области известны работы Н.А. Буше, И.А. Буяновского, Р.М. Матвеевского, Л.И. Бершадского, Н.К. Мышкина, Г. Тейлора и др.

Смазочный материал, как элемент трибосистемы, существенно влияет на надежность всей системы, поэтому для него должно быть научно обоснованно предельное состояние. Однако установленный ресурс масел по пробегу и наработке не всегда объективно характеризует их состояние т.к. в этом случае не учитываются индивидуальные условия и режимы эксплуатации техники, ее техническое состояние, система доливов и состояние фильтрующих элементов. Кроме того, практически отсутствуют методы и критерии оценки текущих значений изменения противоизносных свойств и их прогнозирование в период эксплуатации техники из-за многообразия эксплуатационных факторов, влияющих на механизм старения и процессов протекающих в самом смазочном масле. В этой области можно отметить работы И.В. Крагельского, Б.В. Дерягина, Г.И. Шора, В.Е. Венцеля, Р.С. Фейна, Б.И. Костецкого, Г.В. Виноградова, И. Одингга и др.

На основании проведенного анализа исследований в области температурной стойкости смазочных масел установлено, что этот показатель эксплуатационных свойств в основном исследовался применительно к граничному трению (ГОСТ 23.221-84), а работ в области изучения процессов, протекающих в объеме смазочного материала при высоких температурах и влияние продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства масел и процессы, протекающие на фрикционном контакте изучены недостаточно, поэтому поиск новых методов и обоснование критериев оценки качества смазочных масел является актуальной задачей, решение которой позволит совершенствовать систему классификации моторных масел, создать банк данных (справочник) по смазочным маслам с новыми показателями и обоснованно осуществлять их выбор.

Второй раздел посвящен разработке комплексного метода исследования смазочных масел, включающего испытания на температурную стойкость и противоизносные свойства при изменении нагрузки, позволяющего оценить влияние процессов температурной деструкции на состояние смазочных масел; обоснованию выбора смазочных материалов для исследования и средств контроля с кратким их описанием, проведению и обработке результатов исследований, включающей определение значений среднего арифметического, среднеквадратического отклонений, коэффициента регрессии, коэффициента корреляции, относительные погрешности аппроксимации каждого опыта и среднюю погрешность аппроксимации эксперимента. Схема комплексного метода представлена на рисунке 1.

Особенностью метода является проведение испытаний в три этапа, на первом этапе исследуется температурная стойкость масла в диапазоне температур от 140 до 300 °С, на втором этапе исследуются изменения про-

тивоизносных свойств термостатированных масел в зависимости от нагрузки, на третьем этапе проводится анализ результатов исследования, обоснование критериев температурной стойкости, противоизносных свойств, оценка совместного влияния продуктов деструкции и нагрузки на противоизносные свойства смазочных масел.



Рисунок 1 – Схема комплексного метода контроля триботехнических свойств смазочных масел

Метод определения температурной стойкости заключался в следующем. Пробу масла массой $80 \pm 0,1$ г в течение 8 часов термостатировали без перемешивания в диапазоне температур от 140 до 300 °С с интервалом в 10 °С. При каждой температуре испытывали новую пробу масла. После каждого испытания, производили взвешивание термостатированной пробы и определяли испаряемость масел, измеряли оптическую плотность и вязкость.

Пробу термостарованного масла испытывали в течение двух часов на трехшариковой машине трения со схемой трения «шар-цилиндр» с параметрами: нагрузка 13, 23 и 33 Н, скорость скольжения 0,68 м/с, температура масла в объеме 80 °С. Противоизносные свойства масел определяли по

среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах. Результаты экспериментальных исследований обрабатывали методами математической статистики и регрессионного анализа с использованием лицензионных программ ЭВМ «Advanced grapher», «Excel».

Комплексную оценку температурной стойкости смазочных масел проводили по коэффициенту поглощения светового потока, относительной вязкости и испаряемости, а влияние продуктов температурной деструкции и нагрузки по противоизносным свойствам, по которым производили поиск критериев оценки.

Третий раздел содержит результаты экспериментальных исследований термостойкости моторных масел, совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства смазочных масел с использованием разработанного метода и средств измерения.

Исследования, для выявления принципиальных различий в процессах деструкции масел и влияния их продуктов и нагрузки на противоизносные свойства термостатированных масел и процессы формирования граничных слоев на поверхностях трения, проводились на товарных моторных маслах на минеральной основе М-8Г_{2К}, частично синтетической ТНК Супер 5W-40 SL/CF и синтетической ESSO Ultron 5W-40 SL/CF.

Влияние температуры на изменение оптических свойств масел оценивалось коэффициентом поглощения светового потока K_{Π} (рисунок 2). Установлено три характерных температурных области для всех исследуемых масел, различающимися характером изменения коэффициента K_{Π} . Первая температурная область до $T_{кр1}$ характеризуется линейным изменением коэффициента K_{Π} и составляет для масел: М-8Г_{2К} – 240 °С; ТНК Супер 5W-40 – 210 °С; ESSO Ultron 5W-40 – 220 °С и описывается уравнением:

$$K_{\Pi} = a(T - T_H) + b, \quad (1)$$

где a – коэффициент, характеризующий интенсивность процесса деструкции, °С⁻¹; b – коэффициент, характеризующий оптические свойства товарного масла; T – температура испытания, °С; T_H – температура начала деструкции, °С.

Температура начала деструкции для масел составила: М-8Г_{2К} и ТНК Супер 5W-40 SL/CF - 160 °С; ESSO Ultron 5W-40 SL/CF - 170 °С. Регрессионные уравнения процессов деструкции в первой температурной области имеют вид для масел:

$$\text{М-8Г}_{2\text{К}} \quad K_{\Pi} = 0,002 \cdot (T - 160) + 0,073 \quad (2)$$

$$\text{ТНК Супер 5W-40 SL/CF} \quad K_{\Pi} = 0,003 \cdot (T - 160) + 0,031 \quad (3)$$

$$\text{ESSO Ultron 5W-40 SL/CF} \quad K_{\Pi} = 0,004 \cdot (T - 170) + 0,023 \quad (4)$$

Во второй температурной области от $T_{кр1}$ до $T_{кр2}$ наблюдается резкое увеличение коэффициента K_{Π} , указывающее на образование новых (вторичных) продуктов деструкции с большей оптической плотностью, причем

исходным материалом для их образования являются первичные продукты, образовавшиеся до температуры $T_{кр1}$. Изменения коэффициента $K_{п}$ в этой области характеризуются увеличением его значений, вызванными перераспределением избыточной энергии между первичными и вторичными продуктами деструкции. Критическая температура $T_{кр2}$ составила: для М-8Г_{2К} – 280 °С; ТНК Супер и ESSO Ultron 5W-40 SL/CF - 270 °С.

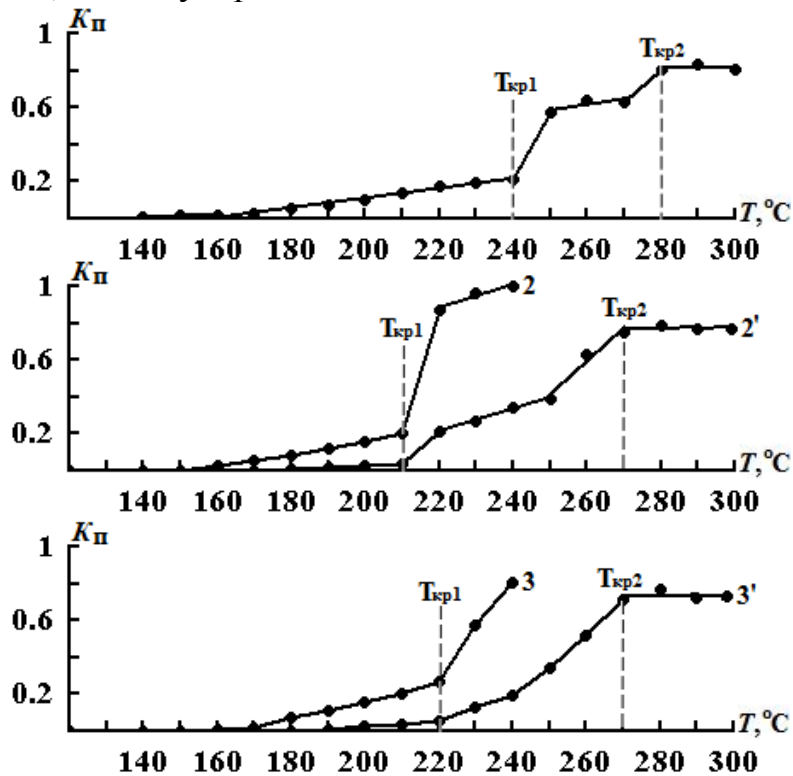


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ от температуры термостатирования моторных масел: а - М-8Г_{2К}; б - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; в - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF (1 - толщина фотометрируемого слоя 8 мм; 2' и 3' – 2 мм)

Третья температурная область определяется температурой больше $T_{кр2}$ и характеризуется стабилизацией коэффициента $K_{п}$, причем для масел 2 и 3 (кривые 2' и 3') толщина фотометрируемого слоя составляла 2 мм.

Изменение вязкости при термостатировании масел оценивалось коэффициентом относительной вязкости K_{μ} (рисунок 3), определяемым отношением вязкости термостатированного масла к вязкости товарного. Вязкость минерального масла (кривая 1) увеличивается во всем температурном интервале испытания и при $T_{кр1}$ достигает предельно-допустимого увеличения 40%. Для частично синтетического масла (кривая 2) вязкость сначала увеличивается на 5% до температуры $T_{кр1}$, а при температуре больше $T_{кр1}$ вязкость начинает падать и при температуре 300 °С она уменьшается на 20% по отношению к товарному маслу. Вязкость синтетического масла (кривая 3) уменьшается во всем температурном диапазоне, и при температуре 300 °С она уменьшается на 20%.

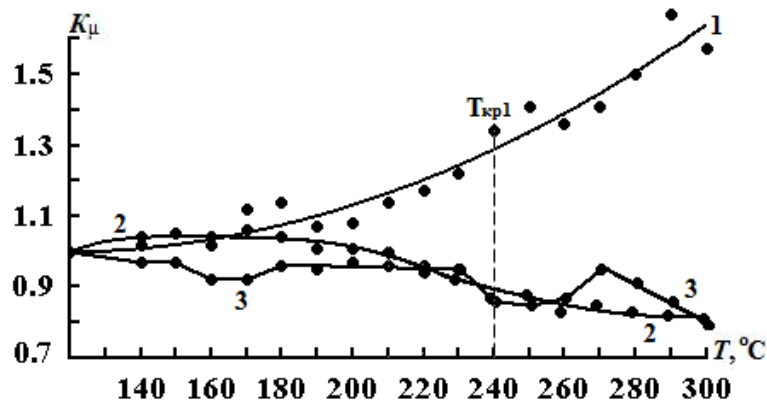


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента относительной вязкости от температуры термостатирования моторных масел: 1 - М-8Г_{2К}; 2 - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; 3 - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

Испаряемость масел при термостатировании (рисунок 4) резко увеличивается при температуре выше $T_{кр1}$, поэтому температура $T_{кр1}$ является предельно допустимой для условий эксплуатации.

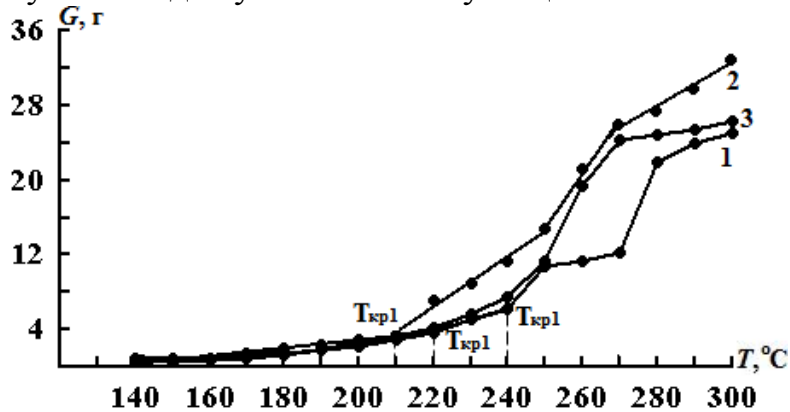


Рисунок 4 – Зависимости испаряемости G от температуры термостатирования моторных масел: 1 - М-8Г_{2К}; 2 - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; 3 - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

Связь между параметрами K_{Π} и G исследована зависимостью $K_{\Pi} = f(G)$ (рисунок 5). Для минерального и частично синтетического масел (кривые 1 и 2) установлена кусочно-линейная зависимость, имеющая изгиб при температуре больше $T_{кр2}$, что вызвано явлением перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами деструкции и испарения, т.е. процессы испарения преобладают над процессами деструкции. В этом случае продукты испарения поглощают большую часть энергии, замедляя процесс деструкции.

Регрессионные уравнения зависимостей $K_{\Pi} = f(G)$ имеют вид для масел:

М-8Г _{2К}	I-го участка	$K_{\Pi} = 0,056 \cdot G + 0,011$	(5)
	II-го участка	$K_{\Pi} = 0,017 \cdot G + 0,478$	(6)
ТНК Супер 5W-40		$K_{\Pi} = 0,031 \cdot G - 0,033$	(7)

Коэффициенты корреляции соответственно равны 0,982; 0,999; 0,985.

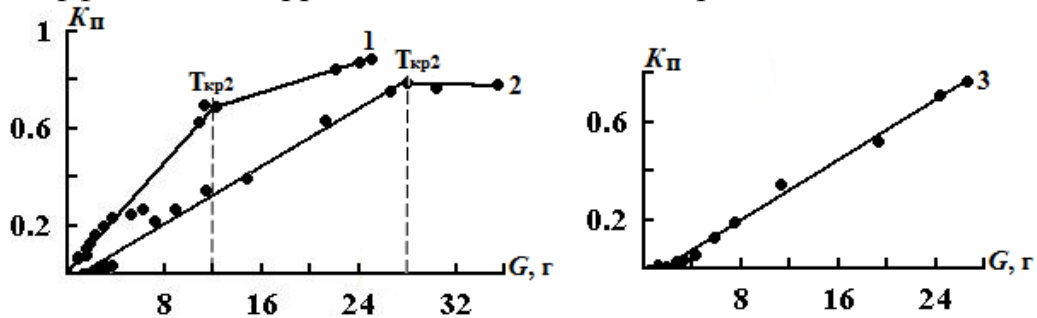


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока от испаряемости при термостатировании моторных масел: 1 - М-8Г_{2К}; 2 - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; 3 - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

Для синтетического масла (кривая 3) установлена линейная зависимость $K_{\Pi} = f(G)$ во всем температурном диапазоне, что говорит о незаконченном процессе деструкции масла.

Регрессионное уравнение имеет вид:

$$K_{\Pi} = 0,031 \cdot G - 0,046 \quad (8)$$

Коэффициент корреляции составил 0,995.

На основании полученных результатов исследования температурной стойкости установлено, что сброс избыточной энергии при термостатировании моторных масел различной базовой основы происходит по двум направлениям: изменению оптических свойств и испаряемости, поэтому в качестве оценки процессов деструкции предложен критерий температурной стойкости $E_{ТС}$, определяемый выражением:

$$E_{ТС} = K_{\Pi} + K_G, \quad (9)$$

где K_G – коэффициент испаряемости.

$$K_G = m/M, \quad (10)$$

где m – масса испарившегося масла, г; M – масса оставшегося масла после термостатирования, г.

Зависимости критерия температурной стойкости от температуры испытания представлены на рисунке 6.

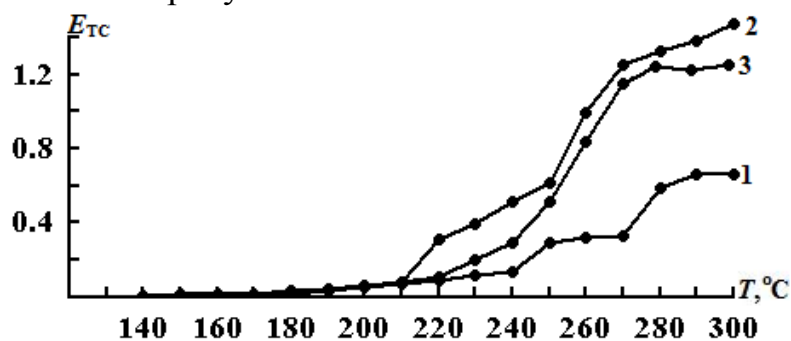


Рисунок 6 – Зависимости критерия температурной стойкости от температуры термостатирования моторных масел: 1 – М-8Г_{2К}; 2 - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; 3 - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

Зависимости износа U от температуры термостатирования представлены на рисунках 7, 8, 9. Данные зависимости характеризуются тремя областями независимо от базовой основы, различающиеся величиной износа и температурным диапазоном, и зависят от нагрузки на пару трения. Первая область определяется температурным диапазоном: для минерального и частично синтетического масла - от 140 до 160 °С; для синтетического - от 140 до 170 °С, где износ у минерального масла постоянный; частично синтетического масла незначительно возрастает; синтетического масла снижается, но его величина определяется нагрузкой.

Зависимости износа от нагрузки в первой температурной области (рисунок 10) имеют линейный характер и описываются регрессионными уравнениями для масел:

$$\text{М-8Г}_{2\text{К}} \quad U_1 = 0,003 \cdot P + 0,221 \quad (11)$$

$$\text{ТНК Супер 5W-40 SL/CF} \quad U_1 = 0,002 \cdot P + 0,272 \quad (12)$$

$$\text{ESSO Ultron 5W-40 SL/CF} \quad U_1 = 0,003 \cdot P + 0,245 \quad (13)$$

где коэффициенты 0,003, 0,002, 0,003 – характеризуют скорость увеличения износа от нагрузки P , Н.

Коэффициент корреляции 0,981.

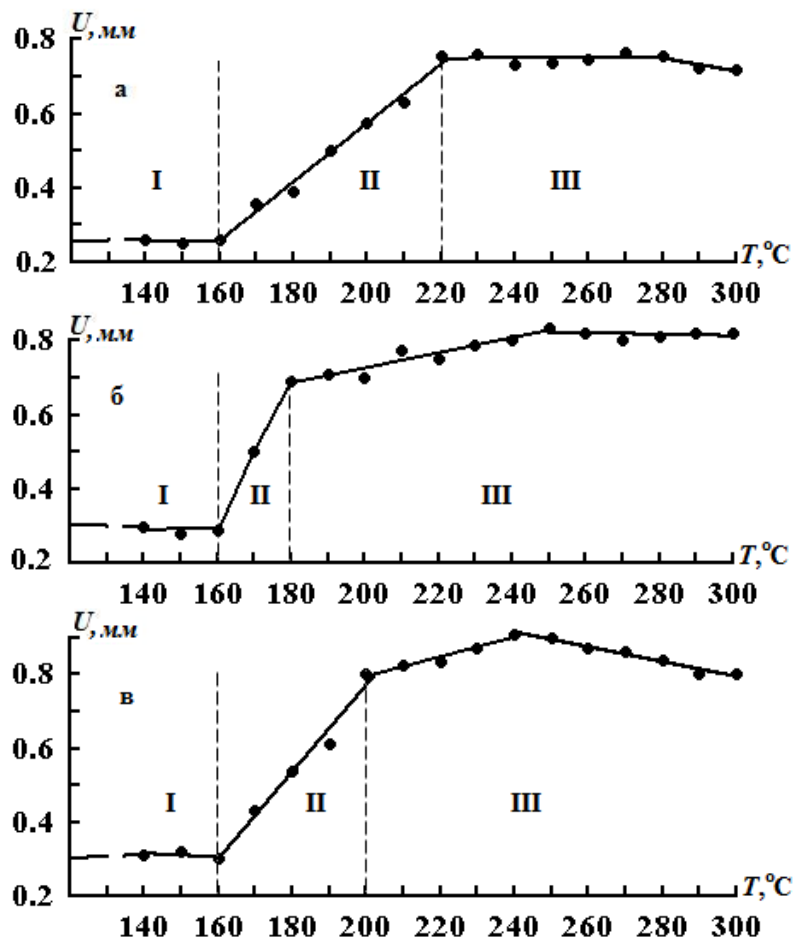


Рисунок 7 – Зависимости износа от температуры термостатирования минерального моторного масла М-8Г_{2К} и нагрузки: а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

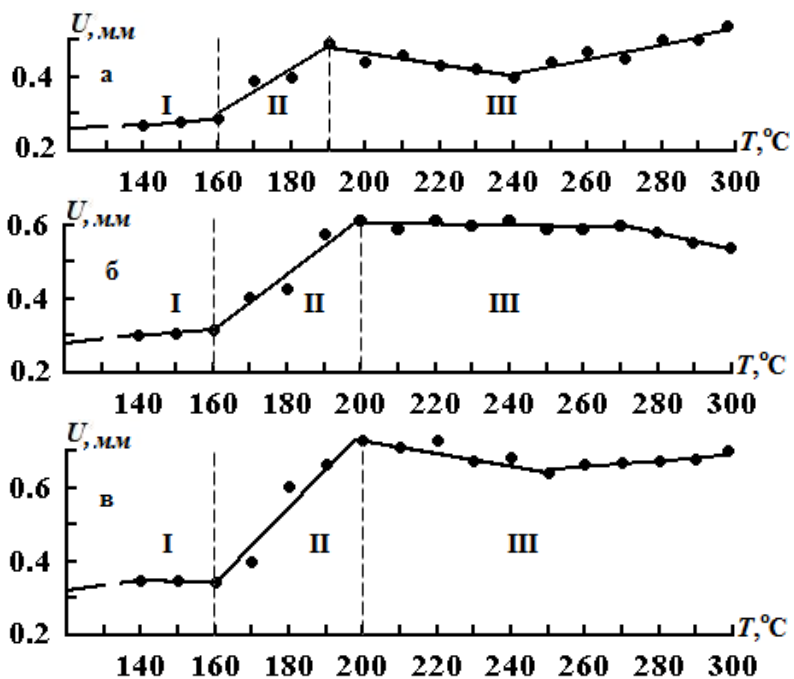


Рисунок 8 – Зависимости износа от температуры термостатирования частично синтетического моторного масла THK 5W-40 SL/CF и нагрузки:
а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

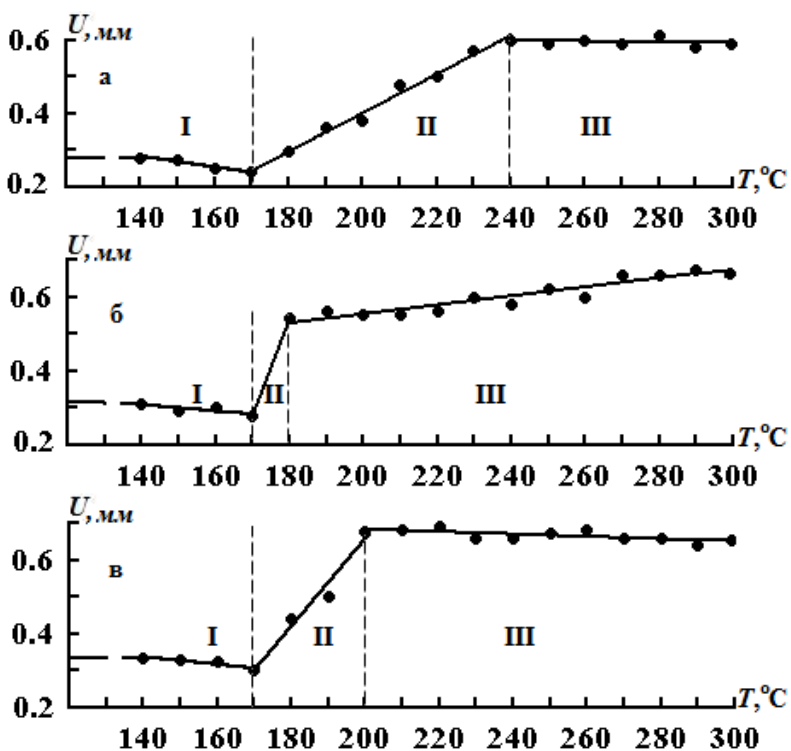


Рисунок 9 – Зависимости износа от температуры термостатирования синтетического моторного масла ESSO Ultron 5W-40 SL/CF и нагрузки:
а – 13Н; б – 23Н; в – 33Н

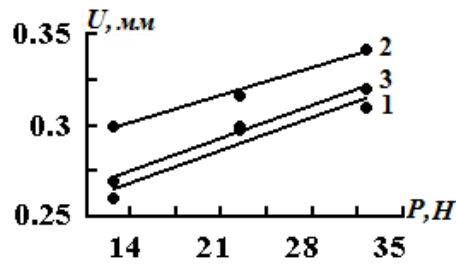


Рисунок 10 – Зависимость диаметра пятна износа от нагрузки в области отсутствия образования продуктов деструкции: 1 – М-8Г_{2К}; 2 - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; 3 - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

Вторая область определяется температурным диапазоном, зависящим от нагрузки и составляет для масел: М-8Г_{2К} - 13Н от 160 до 220 °С, 23Н от 160 до 180 °С, 33Н от 160 до 200 °С; ТНК Супер 5W-40 SL/CF - 13Н от 160 до 190 °С, 23, 33Н от 160 до 200 °С; ESSO Ultron 5W-40 SL/CF - 13Н от 170 до 240 °С, 23Н от 170 до 180 °С, 33Н от 170 до 200 °С, т.е. нагрузка неоднозначно влияет на износ, однако он увеличивается по линейной зависимости

$$U_2 = \alpha(T - T_H) + U_1, \quad (14)$$

где α – интенсивность увеличения износа от температуры, °С⁻¹; T – температура испытания, °С; T_H - температура начала влияния продуктов деструкции на износ, °С; U_1 - величина износа в первой температурной области, мм.

Регрессионные уравнения зависимости износа от температуры термостатирования для второй области при различных нагрузках имеют вид для масел:

$$\begin{aligned} \text{М-8Г}_{2\text{К}} \quad 13\text{Н} \quad U_2 &= 0,008 \cdot (T - 160) + 0,262; \quad 23\text{Н} \quad U_2 = 0,023 \cdot (T - 160) + 0,294; \\ &33\text{Н} \quad U_2 = 0,012 \cdot (T - 160) + 0,314 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{ТНК Супер} \quad 13\text{Н} \quad U_2 &= 0,007 \cdot (T - 160) + 0,293; \quad 23\text{Н} \quad U_2 = 0,007 \cdot (T - 160) + 0,322; \\ &33\text{Н} \quad U_2 = 0,011 \cdot (T - 160) + 0,342 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{ESSO Ultron} \quad 13\text{Н} \quad U_2 &= 0,004 \cdot (T - 170) + 0,241; \quad 23\text{Н} \quad U_2 = 0,013 \cdot (T - 170) + 0,283 \\ &33\text{Н} \quad U_2 = 0,012 \cdot (T - 170) + 0,306 \end{aligned} \quad (17)$$

Коэффициенты корреляции соответственно равны 0,993; 0,999 и 0,984.

Третья температурная область определяет величину износа, зависящую как от первичных, так и вторичных продуктов деструкции, а также нагрузки, поэтому изменение износа в данной области характеризуется двумя участками и работоспособностью противозадирных присадок, предотвращающих схватывание.

Зависимости диаметра пятна износа от коэффициента K_{Π} , характеризующего концентрацию продуктов деструкции, и нагрузки приведены на

рисунке 11. Показано, что при малых концентрациях продуктов температурной деструкции противоизносные свойства термостатированных моторных масел понижаются. Однако максимальное увеличение износа наступает для всех исследованных масел при значениях коэффициента K_{Π} , полученных при температурах до $T_{кр1}$ (см. рис. 2), т.е. когда образуются первичные продукты температурной деструкции. Нагрузка в этой температурной области (до $T_{кр1}$) увеличивает износ. Дальнейшее увеличение концентрации вторичных продуктов деструкции приводит либо к стабилизации износа (нагрузка 13Н), либо его уменьшает при нагрузках 23 и 33Н, причем чем больше нагрузка, тем интенсивней уменьшается износ (кривые 2 и 3). Это может объясняться формированием на поверхностях трения модифицированных слоев за счет активации присадок.

Таким образом установлено влияние концентрации продуктов температурной деструкции (первичных и вторичных) и нагрузки на параметр износа, поэтому в качестве критерия противоизносных свойств Π термостатированных масел предложено эмпирическое отношение

$$\Pi = \frac{K_{\Pi}}{U}, \quad (18)$$

где K_{Π} - коэффициент поглощения светового потока; U - износ, мм.

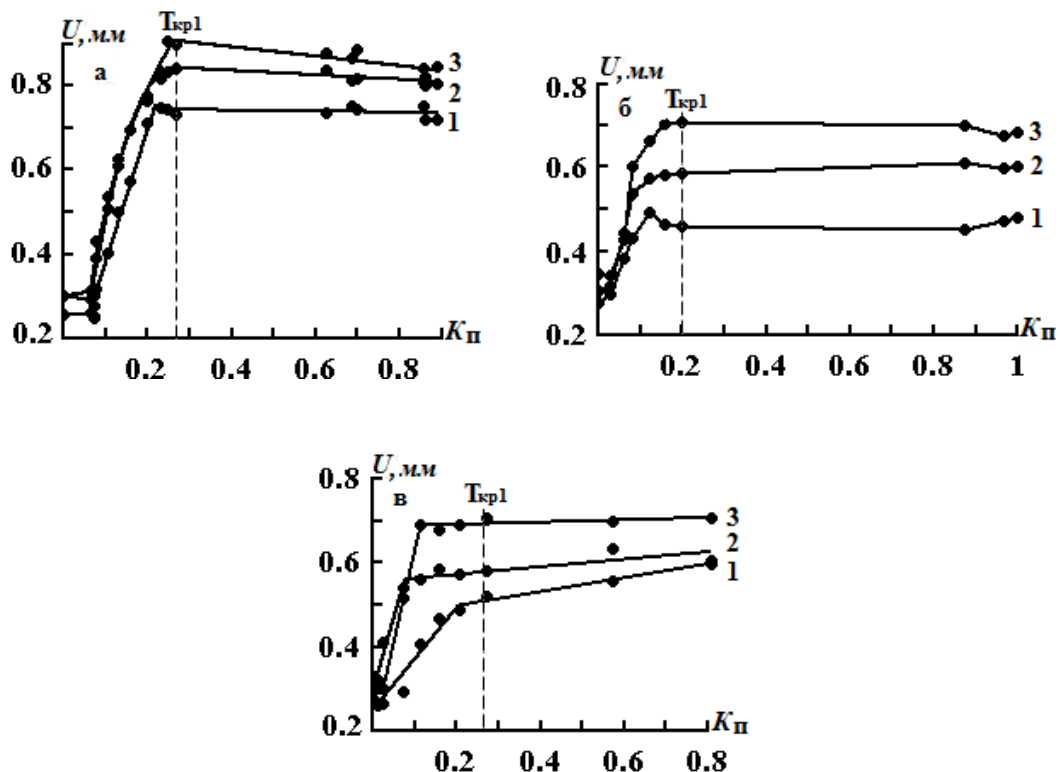


Рисунок 11 – Зависимости износа от коэффициента поглощения светового потока при термостатировании моторных масел: а – М-8Г_{2К}; б - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; в - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF; при нагрузках 1 – 13Н; 2 – 23Н; 3 – 33Н

Данный критерий (рисунок 12) характеризует условную концентрацию продуктов деструкции на номинальной площади фрикционного контакта. Показано, что зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока имеют линейный характер, причем чем, выше величина нагрузки, тем ниже противоизносные свойства при одном и том же значении K_{Π} .

Регрессионные уравнения зависимостей противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при различных нагрузках имеют вид для масел

$$\text{М-8Г}_{2\text{К}} \quad P=13\text{Н} \quad \Pi = 1,32K_{\Pi}, \quad P=23\text{Н} \quad \Pi = 1,22K_{\Pi}, \quad P=33\text{Н} \quad \Pi = 1,15K_{\Pi}, \quad (19)$$

$$\text{ТНК Супер} \quad P=13\text{Н} \quad \Pi = 2,11K_{\Pi}, \quad P=23\text{Н} \quad \Pi = 1,67K_{\Pi}, \quad P=33\text{Н} \quad \Pi = 1,48K_{\Pi}, \quad (20)$$

$$\text{ESSO Ultron} \quad P=13\text{Н} \quad \Pi = 2,14K_{\Pi}, \quad P=23\text{Н} \quad \Pi = 1,74K_{\Pi}, \quad P=33\text{Н} \quad \Pi = 1,44K_{\Pi}, \quad (21)$$

Коэффициенты при K_{Π} характеризуют скорость изменения критерия противоизносных свойств, по которым построены зависимости скорости изменения противоизносных свойств от нагрузки (рисунок 13). По данным видно, что с увеличением нагрузки противоизносные свойства понижаются, причем чем выше величина скорости, тем быстрее происходит снижение противоизносных свойств с ростом нагрузки.

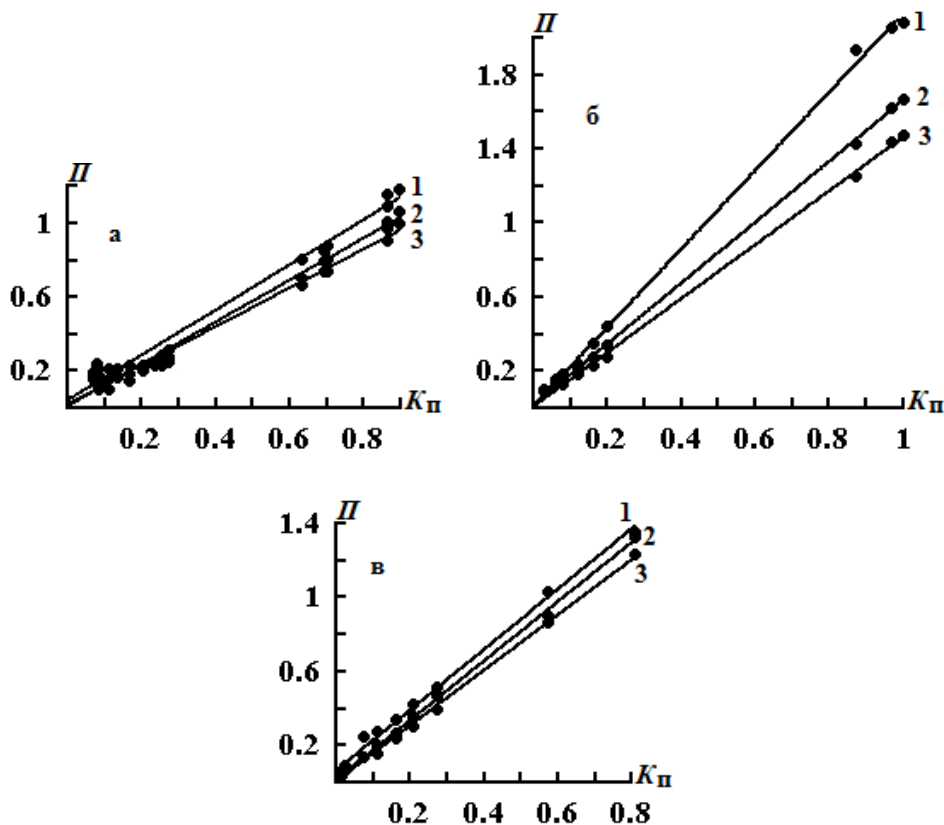


Рисунок 12 – Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока термостатированных моторных масел: а – М-8Г_{2К}; б - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; в - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF; при нагрузках 1 – 13Н; 2 – 23Н; 3 – 33Н

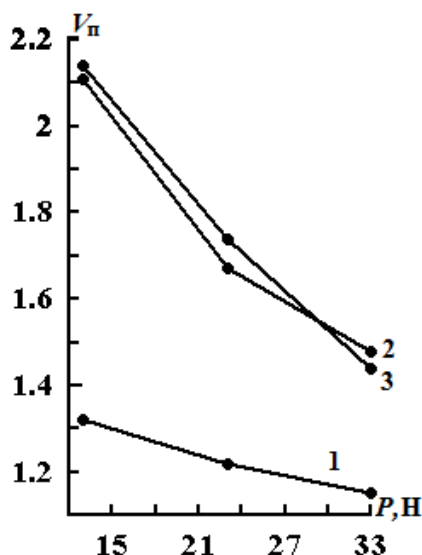


Рисунок 13 – Зависимости скорости изменения критерия противоизносных свойств от нагрузки: 1 – М-8Г_{2К}; 2 - ТНК Супер 5W-40 SL/CF; 3 - ESSO Ultron 5W-40 SL/CF

Четвертый раздел посвящен разработке практических рекомендаций по контролю состояния смазочных масел, включающие технологии определения: температурной стойкости и совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства термостатированных масел; предложения по совершенствованию классификации моторных масел, позволяющие создать банк данных (справочник) по смазочным маслам с новыми показателями для обоснованного их выбора при проектировании техники.

Разработанные рекомендации внедрены на предприятии ФГУП КрОЗ Россельхозакадемии, и в учебный процесс кафедры «Тракторы и автомобили» Института управления инженерными системами Красноярского государственного аграрного университета и кафедры «Топливообеспечение и ГСМ» Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

Основные выводы и результаты исследования

1. Разработанный комплексный метод контроля процессов температурной деструкции масел позволяет по изменению оптической плотности, вязкости, испаряемости и противоизносным свойствам определить: состояние смазочных масел в зависимости от температуры испытания, установить процессы температурной деструкции, заключающейся в последовательном образовании первичных продуктов, переходящих во вторичные, различающиеся оптическими свойствами и температурными областями их образования, и использовать эти параметры как основу для совершенствования системы классификации масел.

2. Предложен критерий температурной стойкости смазочных масел, характеризующий энергию поглощенную продуктами температурной деструкции и испарения, позволяющий сравнивать смазочные масла и совершенствовать систему классификации.

3. Установлены три характерных температурных области изменения износа термостатированных масел независимо от базовой основы и нагрузки, различающиеся величиной износа и температурным диапазоном, причем в первой температурной области, где процессы деструкции отсутствуют, параметр износа у минерального масла постоянный; частично синтетического масла незначительно возрастает; синтетического масла снижается и линейно зависит от нагрузки, во второй температурной области износ увеличивается по линейной зависимости и определяется концентрацией первичных продуктов деструкции и нагрузкой, в третьей температурной области износ зависит от суммарной концентрации первичных и вторичных продуктов деструкции и нагрузки и характеризует температурный диапазон действия продуктов деструкции присадок, обеспечивающих предотвращение схватывания.

4. Предложен критерий противоизносных свойств термостатированных масел, характеризующий условную концентрацию продуктов деструкции на номинальной площади фрикционного контакта, зависимость которого от коэффициента поглощения светового потока имеет линейный характер, позволяющий повысить информативность о качестве масел и осуществлять обоснованный выбор смазочных масел.

5. Разработаны практические рекомендации, включающие технологии определения: температурной стойкости и совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства термостатированных масел; предложения по совершенствованию классификации моторных масел, позволяющих создать банк данных (справочник) по смазочным маслам с новыми показателями для обоснованного их выбора при проектировании техники.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Шрам, В.Г.** Исследование влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства минерального моторного масла М8-Г_{2К} / В.Г. Шрам, Б.И. Ковальский, Ю.Н.Безбородов, Н.Н. Малышева, И.В. Надежкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. «Вестник КузГТУ». Кузбасс. №5 (86). 2012. С 57-64.

2. **Шрам, В.Г.** Исследование влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства частично синтетического моторного масла ТНК Супер 5W-40 SL/CF / В.Г. Шрам, Б.И. Ковальский, Ю.Н.Безбородов, Н.Н. Малышева, И.В. Надежкин // Вестник Кузбасского

государственного технического университета. «Вестник КузГТУ». Кузбасс. №6 (86). 2012. С 67-74.

3. **Шрам, В.Г.** Исследование влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства синтетического моторного масла Esso Ultron 5W-40 / В.Г. Шрам, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.Н. Сокольников, И.В. Надейкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 71-78.

4. **Шрам, В.Г.** Влияние продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства товарного и отработанного моторного масла М-8Г_{2К} / В.Г. Шрам, Б.И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, А.Н. Сокольников, И. В. Надейкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 2. С. 53-58.

5. Ковальский, Б.И. Исследование термостойкости частично синтетических моторных масел /Б.И.Ковальский, **В.Г. Шрам**, О.Н. Петров, Ю.Н. Безбородов // Научно-технологический журнал «Технологии нефти и газа». Москва. №3 (86). 2013. С 25-29.

6. Ковальский, Б.И. Исследование влияния продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства частично синтетических моторных масел / Б.И.Ковальский, **В.Г. Шрам**, О.Н. Петров, Ю.Н. Безбородов // Научно-технологический журнал «Технологии нефти и газа». Москва. №4 (87). 2013. С 27-32.

7. Ковальский Б.И. Процессы, протекающие на фрикционном контакте при триботехнических испытаниях работающих моторных масел / Б.И.Ковальский, В.И. Верещагин, **В.Г. Шрам**, М.М. Рунда // Журнал Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 172-177.

Публикации в научных изданиях

8. **Патент № 2471187** РФ МПК G 01 N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Ковальский Б.И., Безбородов Ю.Н., Малышева Н.Н., **Шрам В.Г.** – № 2011123068/15(034175). заявл. 07.06.2011; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36.

9. **Шрам, В.Г.** Повышение надежности работы машин и механизмов, за счет наиболее эффективного применения смазочных материалов [текст] / Всероссийский конкурс «Наукоемкие инновационные проекты молодых ученых»: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. - СПб., 2012. С 226-228.

10. **Шрам, В.Г.** Определение смазывающей способности моторных масел [текст] / Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. - СПб., 2012. С 218-222.

11. **Шрам, В.Г.** Исследование влияния температуры и нагрузки на противоизносные свойства смазочных материалов [текст] / Тезисы конкурсных работ «XIII научно-технической конференции молодежи ОАО «Транссибнефть»». – Омск. 2012. С 29.

12. **Шрам, В.Г.** Лабораторная машина для изучения смазывающей способности масел [текст] / Шрам В.Г., Петров О.Н. // Материалы II научно-практической конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса». – г. Новокузнецк. 2012. С 323-326.

13. Ковальский, Б.И. Система контроля смазочных материалов [текст] / Б.И. Ковальский, **В.Г. Шрам**, Е.Г. Кравцова, Н.Н. Малышева // Научно-технологический журнал «Промышленный сервис». Москва. №2 (47). 2013. С 17-21.

Подписано в печать «___»_____2014 г.
Печать плоская. Формат 60х84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041 Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел/факс (391)249-74-81, 249-73-55
E-mail:print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>