

На правах рукописи

Юдин Алексей Владимирович

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ
И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ
СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ**

Специальность 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 автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: **Ковальский Болеслав Иванович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лукьяненко Михаил Васильевич**, кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», заведующий кафедрой систем автоматического управления

Данилевич Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ДПО «Академия стандартизации, метрологии и сертификации», кафедра «Стандартизация, сертификация и менеджмент качества», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»

Защита состоится «07» октября 2014 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Процессы, протекающие в трибосистемах двигателей внутреннего сгорания, определяются механическими, термоокислительными, температурными и химическими воздействиями, а смазочный материал как элемент этой системы оказывает влияние на её надёжность. Ему присущи такие свойства надёжности, как безотказность, долговечность, сохраняемость и восстанавливаемость, т. е. для него существует предельное состояние, по достижении которого его необходимо заменять на новое.

В связи с тем, что эти процессы протекают одновременно, то исследование раздельного влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства является актуальной задачей, решение которой позволит разработать мероприятия по уменьшению скорости окисления и повышению температуры начала деструкции базовой основы и присадок.

Степень научной проработанности темы. Научное и практическое значение представляет контроль влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства масел. Исследования данных процессов проводились в два этапа. На первом этапе моторные масла различной базовой основы подвергались окислению при температуре 180 °С с перемешиванием, а затем испытанию на противоизносные свойства. На втором этапе те же масла подвергались термостатированию без перемешивания в температурном диапазоне от 140 до 300 °С с повышением температуры на 20 °С и последующими триботехническими испытаниями.

Существенный вклад в изучение процессов окисления смазочных материалов внесли М.А. Григорьев, Л.А. Кондаков, С.Е. Крейн, А.В. Непогодьева, К.К. Папок, Н.И. Черножуков, Г.И. Шор, Н.М. Эмануэль и др. В результате анализа работ в этой области для оценки интенсивности процессов окисления обосновано применение средств контроля, позволяющих определять при окислении изменения вязкости, летучести, оптических и противоизносных свойств. Это позволило определить критерий термоокислительной стабильности, учитывающий сброс избыточной тепловой энергии по двум параметрам – изменению коэффициента поглощения светового потока K_n и летучести G . Методом фотометрии установлено два вида продуктов различной оптической плотности и явление перераспределения тепловой энергии между продуктами окисления и летучестью, вызывающее изменение скоростей окисления и испарения.

Изучению механизма температурной деструкции посвящены работы Г.И. Фукса, И.А. Буяновского, Р.М. Матвеевского, Г.И. Шора, Н.К. Мышкина и др. В них явление температурной деструкции на параметры износа оценивалось при триботехнических испытаниях, а влияние температуры на свойства масел не учитывалось. Поэтому в настоящей работе воздействие темпе-

ратуры на процессы температурной деструкции, протекающие в смазочном материале, исследовалось фотометрическим методом по изменению коэффициента поглощения светового потока K_n , вязкости μ и летучести G , а влияние продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства – на трехшариковой машине трения со схемой шар–цилиндр.

Применение фотометрического метода позволило установить, что сброс избыточной тепловой энергии происходит по двум параметрам – изменению коэффициента поглощения светового потока K_n и летучести G . Однако большая часть тепловой энергии поглощается продуктами испарения. В этой связи предложен критерий температурной стойкости смазочных масел, учитывающий изменение оптических свойств и летучести.

Для оценки доминирующего влияния продуктов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства масел проведен анализ работ в этой области. Существенный вклад в изучение процессов, протекающих на фрикционном контакте, внесли И.В. Крагельский, Б.И. Костецкий, В.Г. Виноградов, Р.М. Матвеевский, И.А. Буяновский, Ю.С. Заславский, И.С. Гершман, А.С. Кужаров, И.А. Буше, Г.И. Шор, А.С. Ахматов и другие. Однако в их работах при оценке противоизносных свойств учитывались все процессы, протекающие на фрикционном контакте, одновременно. В данной работе противоизносные свойства оценивались при постоянных параметрах трения окисленных и термостатированных масел в диапазоне температур от 140 до 300 °С, что позволило установить различия во влиянии продуктов окисления и температурной деструкции на их противоизносные свойства, обосновать общий критерий противоизносных свойств Π , учитывающий концентрацию продуктов окисления и температурой деструкции на номинальной площади фрикционного контакта. Предложен обобщенный показатель противоизносных свойств (ОПП), учитывающий скорости изменения критериев противоизносных свойств окисленных и термостатированных масел, позволяющий определить доминирующее влияние продуктов окисления или температурной деструкции на механизм изнашивания.

Цель диссертационной работы. Повысить эффективность использования моторных масел за счет организации контроля раздельного влияния процессов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства.

Задачи исследования.

1. Разработать комплексную методику контроля термоокислительной стабильности, температурной стойкости и противоизносных свойств товарных и отработанных моторных масел.

2. Исследовать процессы окисления и температурной деструкции моторных масел различных классов вязкости, групп эксплуатационных свойств и базовых основ, оценить влияние их продуктов на противоизносные свойства и обосновать критерии.

3. Выполнить анализ состояния отработанных моторных масел парка машин с применением диагностических средств контроля и комплексной методики.

4. Разработать практические рекомендации по применению комплексной методики при выборе моторных масел в зависимости от степени нагруженности двигателей, их идентификации и классификации по группам эксплуатационных свойств и контроля текущего состояния при эксплуатации.

Объект исследования. Товарные и отработанные моторные масла различных базовых основ и классов вязкости.

Предмет исследования. Процессы окисления и температурной деструкции и их влияние на противоизносные свойства.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с применением методов анализа контроля процессов окисления и температурной деструкции углеводородов и присадок к ним, теории экспериментов, теории трения, износа и смазки, методов расчета ресурса смазочных материалов, методов контроля оптических, физических и теплотехнических свойств.

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

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором, подтверждается теоретически и экспериментально. Научные положения аргументированы. Теоретические результаты и выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями и их математической обработкой, непротиворечивостью данным других авторов, использованием экспериментального оборудования, позволяющего с достаточной точностью осуществлять измерения требуемых параметров, а также стандартных программ для обработки экспериментальных данных с применением современных средств вычислительной техники в соответствии с поставленными задачами.

На защиту выносятся.

1. Комплексная методика контроля процессов окисления, температурной деструкции и влияния их продуктов на противоизносные свойства моторных масел различных базовых основ, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств.

2. Результаты контроля термоокислительной стабильности, температурной стойкости и влияния их продуктов на противоизносные свойства моторных масел и критерии оценки.

3. Результаты апробации комплексной методики по контролю состояния отработанных моторных масел парка машин.

4. Результаты регрессионного анализа процессов окисления, температурной деструкции и противоизносных свойств моторных масел.

5. Обобщенный показатель противоизносных свойств моторных масел, учитывающий доминирующее влияние продуктов окисления и температурной деструкции на изнашивание.

6. Практические рекомендации по технологиям контроля товарных и работающих моторных масел.

Научная новизна работы.

1. Разработанная комплексная методика контроля процессов окисления и температурной деструкции в отличие от известных позволяет оценивать противоизносные свойства моторных масел, предварительно окисленных при температуре 180 °С и термостатированных в диапазоне температур от 140 до 300 °С.

2. Впервые установлен и обоснован общий критерий противоизносных свойств окисленных и термостатированных масел, позволяющий определить доминирующее влияние процессов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства масел и совершенствовать систему их идентификации и классификации по группам эксплуатационных свойств.

3. Разработанная методика контроля процессов температурной деструкции позволяет определить критическую температуру работоспособности моторных масел и обосновать оптимальную температуру для их испытания на термоокислительную стабильность.

4. Методика контроля отработанных моторных масел с применением фотометра, вискозиметра, центрифуги, машины трения, прибора для термостатирования и весов позволяет по составу продуктов старения, концентрации воды, противоизносным свойствам и вязкости обосновать предельное состояние работающих масел, техническое состояние системы фильтрации и цилиндропоршневой группы, а при эксплуатации двигателей диагностировать их состояние и корректировать сроки замены.

Практическая значимость работы. На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации, включающие технологии контроля: влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел; потенциального ресурса и температурной области работоспособности; предельной температуры испытания на термоокислительную стабильность; доминирующего влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства; предельных параметров состояния работающих масел, а также рекомендации по идентификации и классификации по группам эксплуатационных свойств.

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены на предприятиях ООО АТП «Терминалнефтегаз» и ИП АТП В.М. Сидоров и учебном процессе Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

10-й международной конференции «Трибология и надежность» (Санкт-Петербург, 2010 г.); научно-технической конференции с участием иностранных специалистов, посвященной 120-летию выдающегося триболога М.М. Хрущева «Трибология машиностроению» (Москва, 2010 г.); научных семинарах и конференциях Института нефти и газа Сибирского федерального университета (Красноярск, 2010–2012 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе три работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, получено шесть патентов, написана монография. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Автором лично разработаны методы контроля влияния процессов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел, проведены исследования раздельного влияния процессов окисления и температурой деструкции на противоизносные свойства моторных масел с различной базовой основой, обоснованы критерии изменения состояния масел в зависимости от условий их эксплуатации.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 156 страниц машинописного текста, 49 рисунков, 14 таблиц. Состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографического списка из 137 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены методы и средства определения критериев термоокислительной стабильности $E_{\text{тос}}$ и температурной стойкости $E_{\text{тс}}$ смазочных масел, а также их роль в повышении надежности трибосопряжений, работающих в условиях граничного трения скольжения.

С этой целью выполнен анализ эксплуатационных свойств моторных масел, в результате которого установлено, что основным фактором, влияющим на процессы, протекающие на фрикционном контакте, является температура. Она зависит от нагрузки на трибосистему и рабочих процессов, происходящих в ней, ускоряет окисление, температурную деструкцию и химические реакции смазочного масла с металлическими поверхностями. Основные эксплуатационные свойства, определяющие ресурс моторного масла – термоокислительная стабильность и температурная стойкость, продукты которых влияют на вязкость μ , коррозионную активность и кислотное число. Рассмотрен механизм старения моторных масел, являющийся многостадий-

ным процессом образования свободных радикалов, перехода их в радикалы перекисей, а затем – в гидроперекиси. В результате окисления образуются вода, смолы, кислоты, сложные эфиры, увеличивающие кислотность масла. В этой связи кислотное число многими авторами принято за основной показатель, характеризующий интенсивность окислительных процессов и ресурс смазочных материалов.

Анализ современных методов определения термоокислительной стабильности и температурной стойкости показал, что наряду со стандартными существует множество инженерных методов, адаптированных к применению на эксплуатационных предприятиях и обладающих экспресс-анализом. Температурная стойкость как эксплуатационный показатель, в основном, определяется в условиях трения, определяет температурную область применения смазочных масел, но малоизучена и не включена в перечень сертификационных показателей. Однако количественная оценка влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства масел и нагрузку схватывания, а также процессы, протекающие на фрикционном контакте под влиянием этих продуктов, в научной литературе освещены недостаточно.

Исходя из результатов проведенного анализа установлена необходимость исследования кинетики образования продуктов окисления и температурной деструкции и их отдельного влияния на противоизносные свойства смазочных масел. Это позволит определить основные направления по повышению эффективности использования масел.

Вторая глава посвящена разработке комплексной методики контроля, включающей испытания масел на термоокислительную стабильность, температурную стойкость и противоизносные свойства, обоснованию выбора моторных масел и средств измерения, математической обработке экспериментальных данных, определению погрешности измерительных средств.

Комплексная методика, состоящая из четырех отдельных методик, предусматривает использование таких средств измерения, как прибор для термостатирования масел с перемешиванием и без перемешивания, фотометр для прямого фотометрирования, малообъемный вискозиметр, центрифуга, трехшариковая машина трения со схемой трения шар–цилиндр, весы.

Методика испытания моторных масел на термоокислительную стабильность включает два этапа. На первом этапе пробы масел постоянной массы ($100 \pm 0,1$ г) термостатировались при температуре 180 °С с перемешиванием. Через постоянные промежутки времени (8 ч) отбирались пробы окисленного масла для прямого фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока, вязкости и испаряемости.

Второй этап предусматривал испытание масел по той же технологии, но при определенных значениях коэффициента поглощения светового потока дополнительно отбиралась проба окисленного масла для испытания на ма-

шине трения, а оставшаяся часть масла доливалась до первоначального значения $100 \pm 0,1$ г.

Методика испытания на температурную стойкость предусматривала термостатирование масел без перемешивания в течение постоянного времени (8 ч) в диапазоне температур от 140 до 300 °С с последующим фотометрированием, определением вязкости, испаряемости и противоизносных свойств. Температура испытания масел повышалась на 20 °С.

Методика испытания на трехшариковой машине трения предусматривала испытания при постоянных параметрах трения: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с, температура масла в объеме – 80 °С, время испытания – 2 ч.

Методика испытания отработанных моторных масел дополнительно включала центрифугирование и термостатирование при температуре 180 °С для определения концентрации растворимых и нерастворимых продуктов старения, сопротивляемости окислению и оценки отработанного ресурса.

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

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований процессов окисления и температурной деструкции моторных масел различной базовой основы, а также влияния продуктов этих процессов на противоизносные свойства. Дополнительно, представлены результаты апробации разработанной методики при оценке состояния отработанных моторных масел парка машин.

Испытанию подвергались: минеральные моторные масла М-8Г₂, Utech Navigator 15W-40 SG/CD, ТНК Супер 10W-40 SL/CF; частично синтетические Mobil Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF, ТНК Супер 5W-40 SL/CF, Shell Rimula R5E 10W-40 CJ/CG/CF; синтетические Mobil Super 3000 5W-40 SJ/SL/CF, Aqip Tec sint 5W-30 CJ/CF.

Термоокислительная стабильность моторных масел определялась по изменению коэффициентов поглощения светового потока $K_{по}$, относительной вязкости K_{μ} и испаряемости K_G при температуре термостатирования 180 °С. Установлено, что при окислении образуется два вида продуктов с различной оптической плотностью, что вызывает изгиб зависимости $K_{по} = f(t)$. Причем начало образования вторичных продуктов окисления определяется продлением участка зависимости после точки изгиба до пресечения с осью абсцисс t . Кроме того, обнаружено явление перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения, что подтверждается зависимостями скоростей окисления $V_{Kпо}$ и испарения V_G от времени окисления t .

Предложен критерий термоокислительной стабильности

$$E_{тос} = K_{по} + K_{Go}, \quad (1)$$

где $K_{по}$ – коэффициент поглощения светового потока при окислении масел;
 K_{Go} – коэффициент испаряемости;

$$K_{Go} = m/M, \quad (2)$$

где m – масса испарившегося масла за время испытания t , г; M – масса оставшейся пробы масла за время испытания t , г.

Зависимости критерия термоокислительной стабильности представлены на рис. 1.

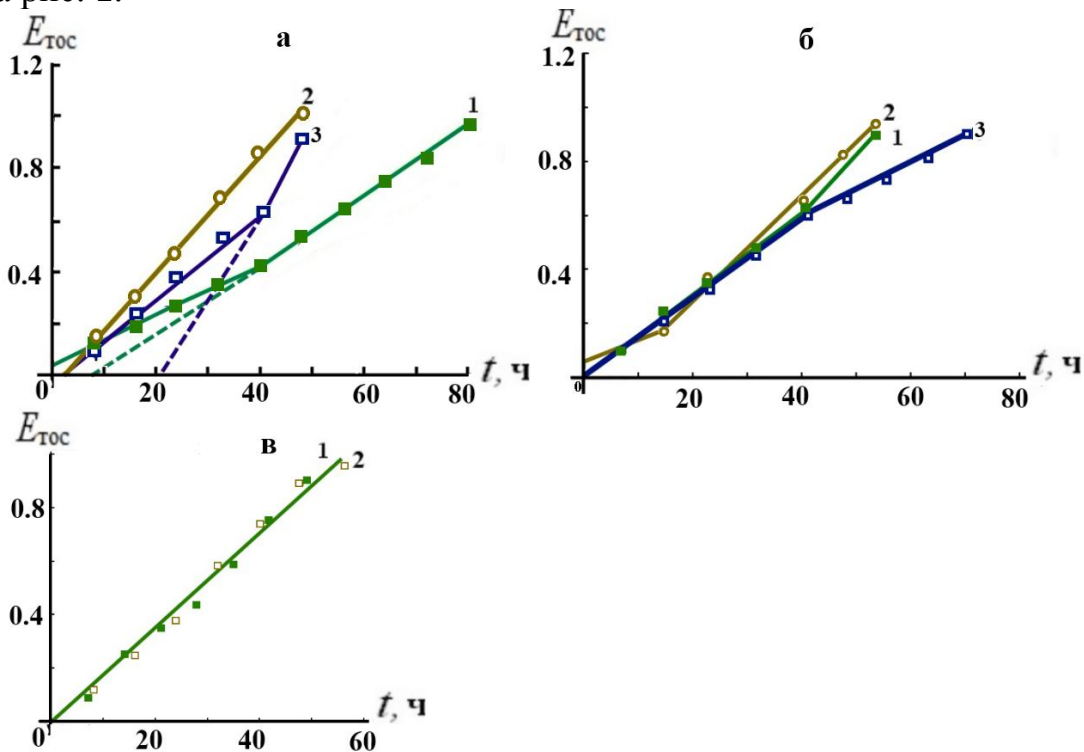


Рис. 1. Зависимость критерия термоокислительной стабильности от времени окисления моторных масел: а – минеральных: 1 – М-8Г₂; 2 – Utech navigator 15W-40 SG/CD; 3 – ТНК Супер 10W-40 SL/CF; б – частично синтетических: 1 – Mobil Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF, 2 – ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 3 – Shell Rimula R5E 10W-40 CJ/CG/CF; в – синтетических: 1 – Mobil Super 3000 5W-40 SY/SL/CF; 2 – Aqip Tecsint 5W-30 CJ/CF

При значении критерия $E_{тос} = 0,8$ ед. определялся потенциальный ресурс моторных масел.

Противоизносные свойства моторных масел оценивались по средне-арифметическому значению диаметров пятен износа на трех шарах.

Предложен эмпирический критерий противоизносных свойств Π_o окисленных масел, определяемый отношением

$$\Pi_o = K_{по}/U_o, \quad (3)$$

где $K_{по}$ – коэффициент поглощения светового потока окисленной пробы масла; U_o – параметр износа при данном значении коэффициента $K_{по}$, мм.

Данный критерий принят безразмерным и характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта. Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента

поглощения светового потока имеет линейный характер и описывается уравнением

$$\Pi_0 = aK_{\text{по}}, \quad (4)$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия Π_0 .

Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока представлена на рис. 2.

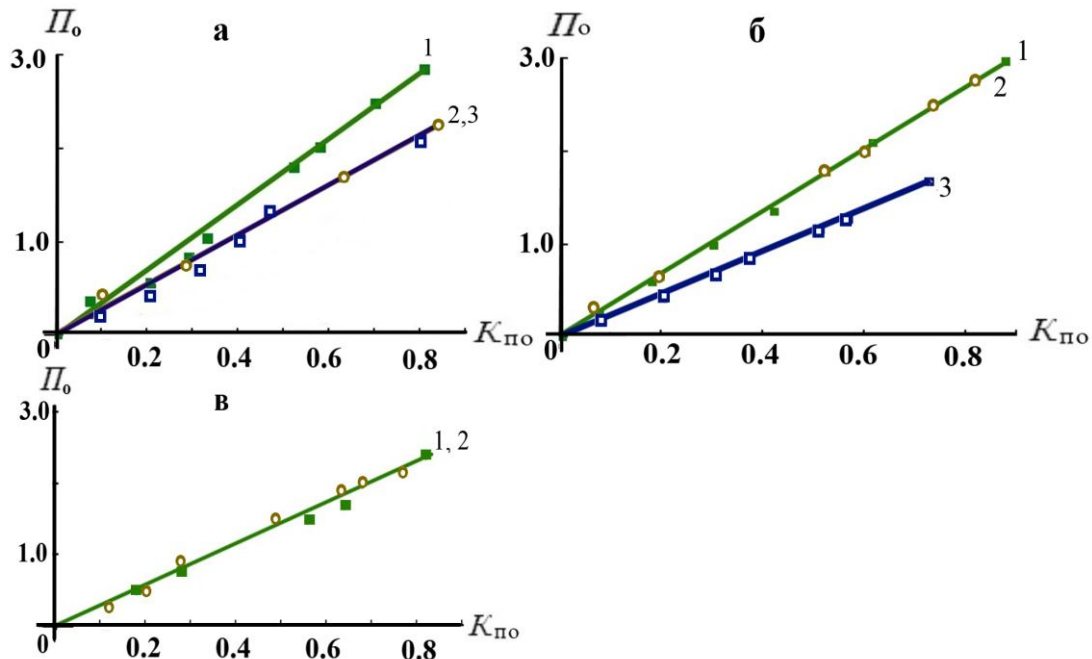


Рис. 2. Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении моторных масел: а – минеральных, б – частично синтетических, в – синтетических (условные обозначения см. на рис. 1)

Установлена общая закономерность понижения противоизносных свойств для всех исследуемых масел при малых значениях коэффициента $K_{\text{по}}$ и дальнейшее их повышение при образовании продуктов окисления с большей оптической плотностью.

Температурная стойкость исследуемых масел оценивалась по коэффициенту поглощения светового потока $K_{\text{пт}}$ и испаряемости. Для оценки температурной стойкости предложен критерий

$$E_{\text{тс}} = K_{\text{пт}} + K_{\text{Гт}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{пт}}$ – коэффициент поглощения светового потока при заданной температуре термостатирования; $K_{\text{Гт}}$ – коэффициент испаряемости при той же температуре;

$$K_{\text{Гт}} = m/M, \quad (6)$$

где m – масса испарившегося масла при данной температуре термостатирования, г; M – масса оставшейся пробы после термостатирования при той же температуре.

Зависимость критерия температурной стойкости от температуры термостатирования представлена на рис. 3.

При термостатировании моторных масел в диапазоне температур от 140 до 300 °С установлена общая закономерность снижения противоизносных свойств при малых значениях коэффициента $K_{\text{пт}}$ и повышение их при увеличении данного коэффициента больше определенного значения.

Для оценки противоизносных свойств термостатированных масел предложен эмпирический критерий Π_T , характеризующий условную концентрацию продуктов температурной деструкции на номинальной площади фрикционного контакта:

$$\Pi_T = K_{\text{пт}}/U_T, \quad (7)$$

где U_T – параметр износа при данном значении коэффициента $K_{\text{пт}}$.

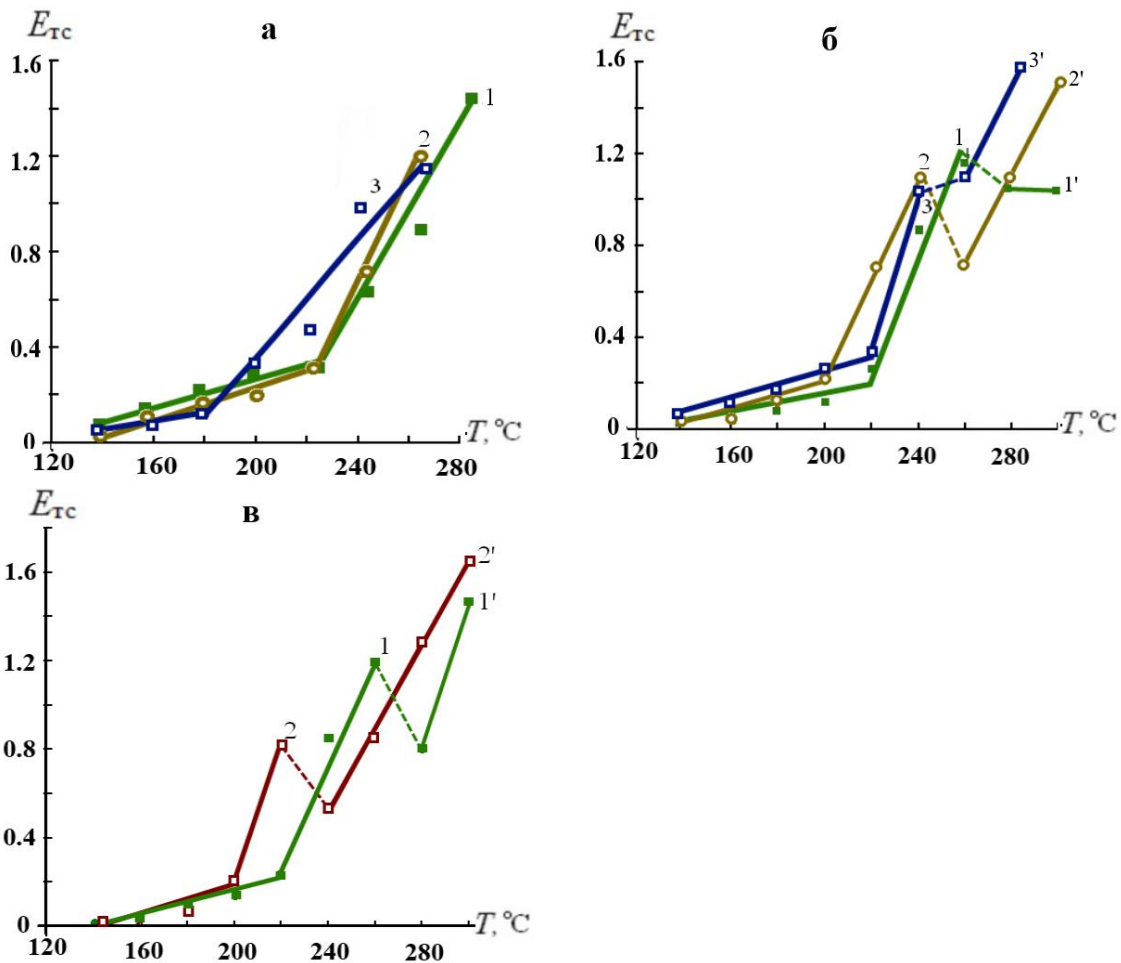


Рис. 3. Зависимость критерия температурной стойкости от температуры термостатирования моторных масел в течение 8 ч: *а* – минеральные: 1 – М-8Г₂; 2 – Utech navigator 15W-40 SG/CD; 3 – ТНК Супер 10W-40 SL/CF; *б* – частично синтетические: 1 – Mobil Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF, 2 – ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 3 – Shell Rimula R5E 10W-40 CJ/CG/CF; *в* – синтетические: 1 – Mobil Super 3000 5W-40 SY/SL/CF; 2 – Aqip Tecsint 5W-30 CJ/CF; 1, 2, 3 – толщина фотометрируемого слоя 8,0 мм; 1', 2', 3' – толщина фотометрируемого слоя 2,0 мм

Аналитическое выражение критерия Π_T имеет вид

$$\Pi_T = bK_{\text{пт}}, \quad (8)$$

где b – коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия Π_T .

Зависимость критерия противоизносных свойств термостатированных моторных масел от коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{пт}}$ представлена на рис. 4.

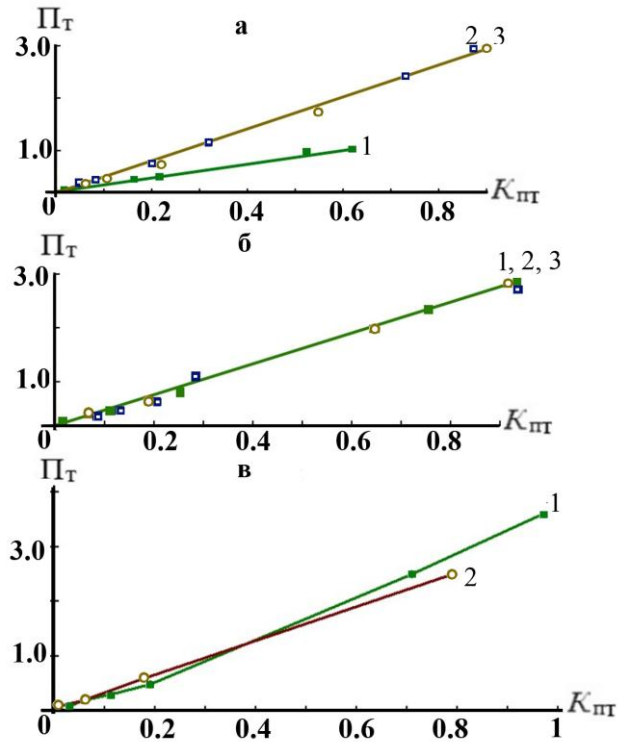


Рис. 4. Зависимость критерия противоизносных свойств термостатированных моторных масел от коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{пт}}$: а – минеральные; б – частично синтетические; в – синтетические (условные обозначения см. на рис. 1)

Экспериментальные данные по процессам окисления и температурной деструкции сведены в табл. 1 и 2.

Данные, представленные в табл. 1 и 2, показывают, что при наличии такой информации возникает возможность выбора масел с лучшими показателями термоокислительной стабильности, температурной стойкости и противоизносных свойств, и подтверждают необходимость сокращения номенклатуры производимых моторных масел и представляется возможность их выбора для квалификационных испытаний и совершенствования систем идентификации и классификации по группам эксплуатационных свойств.

Для оценки доминирующего влияния продуктов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел предложен обобщенный показатель противоизносных свойств (ОПП)

$$\text{ОПП} = V_{\text{по}} / V_{\text{пт}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{по}}$ и $V_{\text{пт}}$ – соответственно скорости изменения критериев противоизносных свойств при окислении и деструкции моторных масел.

Таблица 1

Результаты испытания моторных масел различных базовых основ при окислении

Показатель	Марка масла							
	Минеральные			Частично синтетические			Синтетические	
	М-8Г ₂ (по API CC)	Utech navigator 15W-40 SG/CD	ТНК Супер 10W-40 SL/CF	Mobile Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF	ТНК Супер 5W-40 SL/CF	Shell Rimula R5E 10W-40 CI/CH/CG/CF	Mobile Super 3000 5W-40 SJ/SL/CF	Aqip Tecsint 5W-30 A ₃ /B ₃
Потенциальный ресурс при $K_{по}=0,8$ ед., ч	76	44	47	55	53	72	49	53
Коэффициент относительной вязкости, K_{μ}	min	0,99	0,75	0,92	0,93	0,51	0,87	1,0
	max	1,39	0,99	0,99	0,97	0,86	0,94	1,12
Летучесть за 40 ч испытания, г	6,4	9,6	8,3	8,8	9,3	7,0	8,6	9,5
Коэффициент $E_{тос}$ за 40 ч испытания	0,44	0,86	0,63	0,56	0,65	0,58	0,7	0,74
Скорость окисления, 1/ч	min	0,006	0,013	0,008	0,008	0,003	0,009	0,009
	max	0,015	0,025	0,033	0,023	0,024	0,023	0,022
Скорость испарения, г/ч	min	0,07	0,15	0,15	0,1	0,15	0,13	0,1
	max	0,33	0,43	0,28	0,48	0,41	0,4	0,54
Параметр износа, мм	min	0,23	0,27	0,32	0,3	0,3	0,34	0,32
	max	0,35	0,41	0,44	0,34	0,38	0,38	0,36
Критерий противоизносных свойств $Π_0$	$Π_0=3,5K_{по}$	$Π_0=2,5K_{по}$	$Π_0=2,5K_{по}$	$Π_0=3,25K_{по}$	$Π_0=3,25K_{по}$	$Π_0=2,14K_{по}$	$Π_0=2,857K_{по}$	$Π_0=2,857K_{по}$

Таблица 2

Результаты испытания моторных масел различных базовых основ при температурной деструкции

Показатель	Марка масла							
	Минеральные			Частично синтетические			Синтетические	
	М-8Г ₂	Utech navigator ISW-40 SG/CD	ТНК Супер 10W-40SL/CF	Mobile Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF	ТНК Супер 5W-40 SL/CF	Shell Rimula R5E 10W-40 CI/CH/CG/CF	Mobile Super 3000 5W-40 SJ/SL/CF	Aqip Tecsint 5W-30 A ₃ /B ₃
Предельная температура работоспособности, °C	220	220	200	220	200	200	220	200
Температура испытания при $K_{пт}=0,8$ ед.	272	254	250	245	235	231	252	220
Коэффициент относительной вязкости	min	0,75	1,1	1,05	0,96	0,84	0,85	1,01
	max	1,63	1,25	1,92	1,03	1,04	1,3	1,04
Летучесть при 220 °C, г	5,0	5,0	9,5	5,0	5,5	5,5	4,0	3,0
Коэффициент $E_{тс}$ при 220 °C, ед.	0,27	0,3	0,46	0,29	0,73	0,35	0,25	0,83
Параметр износа, мм	min	0,26	0,26	0,29	0,27	0,25	0,235	0,27
	max	0,62	0,38	0,36	0,425	0,42	0,42	0,56
Критерий противоизносных свойств $\Pi_{т}$	$\Pi_{т}=1,88 K_{пт}$	$\Pi_{т}=3,17 K_{пт}$	$\Pi_{т}=3,17 K_{пт}$	$\Pi_{т}=3,0 K_{пт}$	$\Pi_{т}=3,0 K_{пт}$	$\Pi_{т}=3,0 K_{пт}$	$\Pi_{т}=3,75 K_{пт}$	$\Pi_{т}=3,077 K_{пт}$
Обобщенный показатель противоизносных свойств (ОПП), ед.	1,86	0,79	0,79	1,08	1,08	0,71	0,76	0,929

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что на противоизносные свойства минерального дизельного масла М-8Г₂ и частично синтетических масел Mobil Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF и ТНК Супер 10W-40 SL/CF продукты окисления оказывают большее влияние, чем продукты температурной деструкции. На противоизносные свойства остальных масел большее влияние оказывают продукты температурной деструкции.

В третьей главе приведены результаты испытания отработанных минерального М-8Г₂ и частично-синтетического Shell Rimula R5E 10W-40 моторных масел по автобусному парку машин (20 проб). Распределение парка машин по пробегу, концентрации общих продуктов старения, вязкости и противоизносным свойствам представлено на рис. 5, из которого видна эффективность применения средств контроля и разработанной методики. Эти данные позволяют анализировать состояние парка машин после слива масел, а применение средств измерения в процессе эксплуатации парка позволяет осуществлять текущий контроль за состоянием масел, а при наборе статистических данных определить предельное состояние с учетом противоизносных свойств. Большая часть двигателей (10 проб) отработала 25 тыс. км на масле Shell Rimula R5E 10w-40 (рис. 5,а, кривая 1) и 5 двигателей на масле М-8Г₂, хотя нормативный пробег для замены масла составляет 20 тыс. км. При этом установлена следующая наибольшая концентрация общих продуктов старения (рис. 5,б): $K_{\text{п}}=0,7$ ед. – в 6 двигателях, работающих на масле Shell Rimula R5E; $K_{\text{п}}=0,15$ ед. – в 9 двигателях, работающих на масле М-8Г₂. Установлено допустимое увеличение вязкости масел Shell Rimula R5E на 35 % (17,6 сСт) в трех двигателях, М-8Г₂ (11,5 сСт) – в десяти двигателях (рис. 5,в).

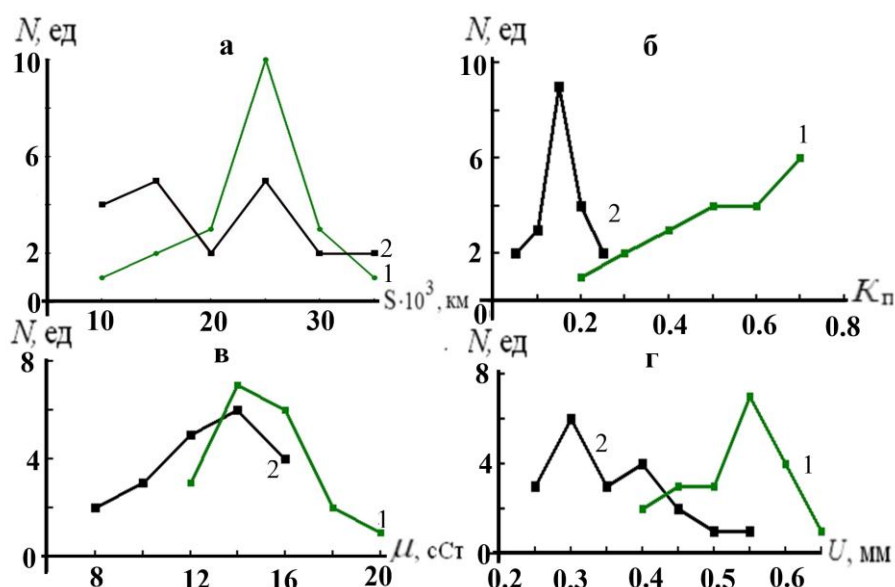


Рис. 5. Распределение парка машин по: а – пробегу; б – концентрации общих продуктов старения; в – вязкости; г – противоизносным свойствам масел: 1 – Shell Rimula R5E 10W-40 CJ/CG/CF; 2 – М-8Г₂

Противоизносные свойства отработанных масел Shell Rimula R5E

(рис. 5, а, кривая 1) в семи пробах составили 0,55 мм и в пяти пробах больше этой величины. Для масла М-8Г₂ (кривая 2) для шести проб параметр износа составил 0,3 мм, а в 11 пробах он увеличился до 0,55 мм. Эти данные показывают, что необходим поиск критерия противоизносных свойств, с помощью которого можно прогнозировать параметр износа, по значению коэффициента $K_{\text{п}}$, определяемого при прямом фотометрировании работающих масел.

Концентрация нерастворимых продуктов старения (рис. 6) после центрифугирования отработанных масел позволяет контролировать состояние системы фильтрации. Так, для масла Shell Rimula R5E максимальная концентрация нерастворимых продуктов старения при значении $K_{\text{пн}}=0,06$ ед. установлена в пяти пробах, тогда как концентрация общих продуктов старения при значении $K_{\text{п}}=0,7$ ед. установлена в шести пробах (рис. 5,б), т. е. данные масла содержат в основном растворимые продукты старения.

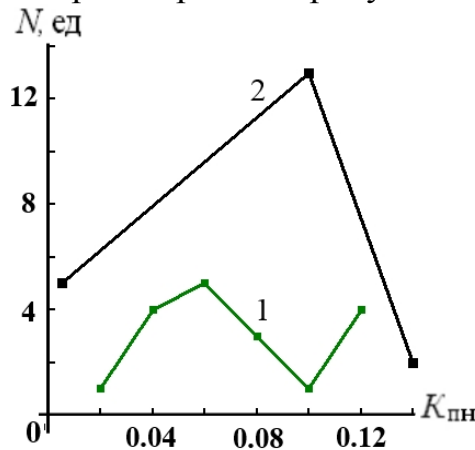


Рис. 6. Распределение концентрации нерастворимых продуктов старения моторных масел слитых при техническом обслуживании парка машин (условные обозначения см. на рис.5)

Для масла М-8Г₂ (рис. 6, кривая 2) большинство проб (13 ед.) содержит концентрацию нерастворимых продуктов при $K_{\text{пн}}=0,1$ ед., тогда как концентрация общих продуктов при $K_{\text{п}}=0,15$ ед. (см. рис. 5,б) установлена в девяти пробах, т. е. эти масла содержат большую концентрацию нерастворимых продуктов старения.

Анализ зависимости критерия противоизносных свойств Π отработанных моторных масел от концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения показал, что наиболее четкая линейная зависимость установлена от концентрации нерастворимых продуктов (рис. 7). Поэтому эти продукты оказывают более значительное влияние на параметр износа.

Аналитическое выражение критерия противоизносных свойств Π отработанных моторных масел имеет вид

$$\Pi = a K_{\text{пн}}, \quad (10)$$

где a – скорость изменения критерия Π ; $K_{\text{пн}}$ – концентрация нерастворимых продуктов старения.

Для масла Shell Rimula R5E 10W-40 коэффициент $a=2,167$, а для масла М-8Г₂ – $a=3,33$. Следовательно, чем больше значение коэффициента a , тем выше противоизносные свойства.

При прогнозировании параметра износа предложено использовать формулу

$$U=K_{\text{пн}}/\Pi. \quad (11)$$

На основе приведенных исследований моторных масел различной базовой основы установлен общий механизм окисления и температурной деструкции, заключающийся в образовании при термостатировании растворимых продуктов, переходящих в гелеобразные. Причем, растворимые продукты являются исходным материалом для гелеобразных.

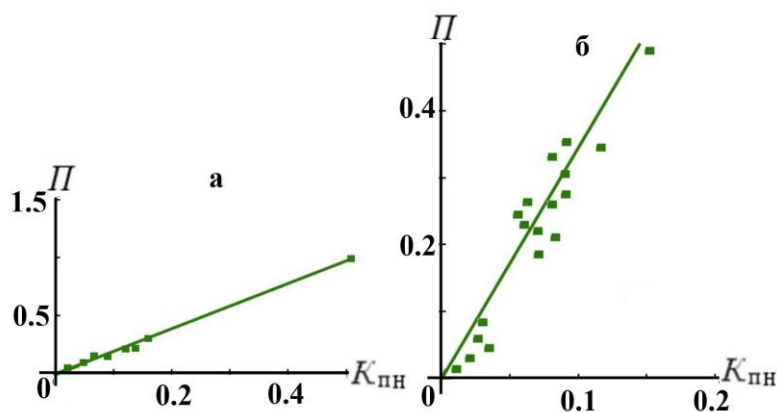


Рис. 7. Зависимость критерия противоизносных свойств от концентрации нерастворимых продуктов старения моторных масел: *а* – частично синтетическое Shell Rimula R5E 10W-40; *б* – минеральное М-8Г₂

Эти продукты различаются оптическими свойствами и энергоемкостью, что вызывает для большинства масел изгиб зависимости коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ от времени t и температуры испытания T . Влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства предложено оценивать критерием, характеризующим условную их концентрацию на номинальной площади фрикционного контакта, а доминирующее влияние одного из них – обобщенным показателем противоизносных свойств, определяемым отношением скорости изменения критерия противоизносных свойств при окислении к скорости изменения критерия противоизносных свойств при температурной деструкции масел.

В четвертой главе даны практические рекомендации, включающие технологии определения: влияния продуктов окисления на противоизносные свойства масел; потенциального ресурса; влияния продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства масел; предельной температуры испытания смазочных масел на термоокислительную стабильность; доминирующего влияния продуктов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства; состояния работающих масел. Кроме этого,

представлена технология идентификации моторных масел по группам эксплуатационных свойств.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработанная комплексная методика контроля моторных масел, включающая прямое фотометрирование, центрифугирование, определение вязкости, термоокислительной стабильности, температурной стойкости и противоизносных свойств, позволяет получить дополнительную информацию о влиянии продуктов окисления и температурной деструкции на изнашивание. Защищена охранными документами Российской Федерации (Пат. РФ №№ 2408866, 2408886, 2409814, 2431293, 2454653, 2485486).

2. Получены функциональные зависимости процессов окисления и температурной деструкции моторных масел различной базовой основы, характеризующиеся последовательным образованием растворимых продуктов, переходящих во вторичные, различающиеся оптической плотностью и энергоемкостью. Первые являются исходным сырьем для образования вторичных, что вызывает перераспределение избыточной тепловой энергии между этими продуктами и изгиб зависимостей, а скорости образования растворимых и вторичных продуктов характеризуют сопротивляемость масел температурным воздействиям при их окислении и температурной деструкции.

3. Предложены критерии термоокислительной стабильности $E_{\text{тос}}$ и температурной стойкости $E_{\text{тс}}$, определяемые общими аналитическими уравнениями $E_{\text{тос}} = K_{\text{по}} + K_{\text{Go}}$, $E_{\text{тс}} = K_{\text{пт}} + K_{\text{Гт}}$, что позволяет совершенствовать систему их идентификации и классификации по группам эксплуатационных свойств.

4. Предложены новые критерии противоизносных свойств, общие для процессов окисления и температурной деструкции товарных и работающих моторных масел, определяемые отношением коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ к параметру износа U , характеризующие условную концентрацию продуктов окисления и температурной деструкции на номинальной площади фрикционного контакта, и описываемые линейными уравнениями $P = aK_{\text{п}}$, скорость изменения которых позволяет сравнивать масла и обоснованно осуществлять их выбор для квалификационных испытаний, совершенствовать систему классификации по группам эксплуатационных свойств, а также прогнозировать противоизносные свойства работающих масел.

5. Впервые предложен обобщенный показатель противоизносных свойств моторных масел ОПП, определяемый отношением скоростей изменения критериев противоизносных свойств окисленных и термостатированных масел, позволяющий выявить доминирующее влияние продуктов окисления или температурной деструкции на изнашивание, а также основные направления по улучшению качества масел.

6. Применение разработанной комплексной методики и средств контроля для оценки текущего состояния работающих масел позволяет получить дополнительную информацию в процессе эксплуатации техники – скорость старения моторных масел, состав продуктов старения, изменение вязкости и противоизносных свойств, которая даст возможность корректировать сроки замены масел в зависимости от их состояния и системы фильтрации. Это снижает эксплуатационные затраты, повышает эффективность использования масел и надежность двигателей внутреннего сгорания.

7. Разработанные практические рекомендации позволяют определить: влияние продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел, их потенциальный ресурс, что важно при выборе масел для квалификационных и моторных испытаний; предельную температуру работоспособности, используемую при классификации по группам эксплуатационных свойств, а также совершенствовать систему идентификации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:

а) статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Ковальский Б.И. Процессы самоорганизации в минеральных моторных маслах при их окислении / Б.И. Ковальский, **А.В. Юдин**, А.С. Ромащенко и др. // Наука и технологии трубопроводного транспорта, нефти и нефтепродуктов – 2011. С. 67-71.

2. Ковальский Б.И. Процессы самоорганизации в частично синтетических моторных маслах при их окислении / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, М.М. Рунда, **А.В. Юдин** и др. // Наука и технологии трубопроводного транспорта, нефти и нефтепродуктов – 2011. С. 64-67.

3. Ковальский Б.И. Влияние сроков хранения масел М-16ИХП-3 на термоокислительную стабильность и противоизносные свойства / Б.И. Ковальский, **А.В. Юдин**, М.М. Рунда, В.С. Янович // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний №5, 2012. С. 19-24.

4. Ковальский Б.И. Результаты контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел различной базовой основы / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, В.С. Янович, Н.Н. Малышева, **А.В. Юдин** // Контроль. Диагностика. №4, 2014. С. 74-76.

б) патенты:

5. Пат. 2409814 Российской Федерации: МПК G01N 33/30 / Способ определения температурной стойкости смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, О.Н. Петров, **А.В. Юдин**, А.С. Ромащенко; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет».

– № 2009141423/15 от 09.11.2009; опубл. 20.01.2011. Бюл. №2.

6. Пат. 2408866 Российской Федерации: МПК G01N 33/56 / Способ определения смазывающей способности масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, **А.В. Юдин**, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет». – № 2009144350/28 от 30.11.2009; опубл. 10.01.2011. Бюл. №1.

7. Пат. 2408886 Российской Федерации: МПК G01N 33/30 / Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, **А.В. Юдин**, Н.Н. Ананьев, Е.Г. Мальцева; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет». – № 2009141424/28 от 09.11.2009; опубл. 10.01.2011. Бюл. №1.

8. Пат. 2451293 Российской Федерации: МПК G01N 33/30 / Способ определения работоспособности смазочных масел / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, **А.В. Юдин**, М.М. Рунда; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет». – № 2011106660/15 от 22.02.2011; опубл. 20.05.2012. Бюл. №14.

9. Пат. 2454653 Российской Федерации: МПК G01N 3/56 / Способ определения противоизносных свойств масел / Б.И. Ковальский, **А.В. Юдин**, М.М. Рунда, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет». – № 2011102120/28 от 20.01.2011; опубл. 27.06.2012. Бюл. №1.

10. Пат. 2485486 Российской Федерации: 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; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет». – № 2011144795/28 от 03.11.2011; опубл. 20.06.2013. Бюл. №17.

в) монография:

11. Ковальский Б. И. Современные методы очистки и регенерации отработанных смазочных масел: препринт / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Л. А. Фельдман, О. Н. Петров, **А. В. Юдин**. – Красноярск: Сибирский Федеральный университет, 2011. – 104 с.

г) материалы конференций:

12. Ковальский Б. И. Электрометрический метод контроля механохимических процессов при граничном трении скольжения / Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, **А. В. Юдин** // Сборник научных трудов 10-ой международной конференции "Трибология и Надёжность" - Санкт-Петербург, 2010 г.

13. Ковальский Б. И. Влияние степени окисления моторных масел на их противоизносные свойства / Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, **А. В. Юдин** // Сборник научных трудов научно-технической конференции "Трибология-Машиностроение", посвященная 120-летию М.М. Хрущева. – Москва, 2010 г.