

На правах рукописи



Ермилов Евгений Александрович

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ
ТЕРМООКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ 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

Красноярск – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Безбородов Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **Власов Юрий Алексеевич**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно – строительный университет», кафедра «Автомобили и тракторы», профессор

Надежкин Андрей Вениаминович
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», кафедра «Судовые двигатели внутреннего сгорания», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «05» июля 2021 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.26, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Адоптированный ГОСТ 17479.1–2015 к международным стандартам SAE и API устанавливает общие требования к качеству моторных масел, производимых на территории Российской Федерации, который не позволяет осуществить обоснованный выбор масел для конкретных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), ввиду отсутствия критериев эксплуатационных свойств, вследствие того, что показатель качества эксплуатационных свойств не является физико-химической константой и зависит от процессов и условий, в которых оно проявляется.

В связи с этим, современный уровень развития техники и технологий транспортных средств требует применение высокоэффективных моторных масел, производство которых, возможно при наличии новейших технологий, средств и методов контроля качества, что обосновывает цель и задачи диссертационного исследования.

Степень разработанности темы. Научное и практическое значение представляет метод контроля влияния продуктов окисления и температурной деструкции на триботехнические и вязкостно-температурные характеристики моторных масел, обеспечивающие увеличение ресурса их работы в двигателях и повышение надежности самого двигателя. Исследование этих процессов проводилось в два этапа. На первом этапе моторные масла различной базовой основы, класса вязкости и группы эксплуатационных свойств подвергались окислению при температурах 170 и 180 °С, а затем окисленные масла подвергались триботехническим испытаниям. На втором этапе те же масла подвергались температурной деструкции при тех же температурах, а затем триботехническим испытаниям.

Существенный вклад в изучение процессов окисления смазочных материалов внесли М. А. Григорьев, А. В. Непогодьеv, Н. И. Черножуков, К. К. Папок, Н. М. Эмануэль, Г. И. Шор, Б. И. Ковальский и др. В результате анализа работ в этой области для оценки интенсивности процессов окисления предложены средства контроля, которые позволяют определить при окислении изменение испаряемости, вязкости, противозносных и оптических свойств. Это дало возможность обосновать критерий термоокислительной стабильности, учитывающий сброс избыточной тепловой энергии по двум параметрам – изменению оптической плотности и испаряемости. Применение фотометрирования позволило установить два вида продуктов различной оптической плотности и явление перераспределения тепловой энергии между продуктами окисления и испарения, вызывающее изменение скорости окисления и испарения. Однако большая часть тепловой энергии поглощается продуктами испарения. В этой связи предложен критерий температурной стойкости смазочных масел, учитывающий изменение оптических свойств и испаряемости.

Изучению механизма температурной деструкции посвящены работы И. Г. Фукса, И. А. Буяновского, Р. М. Матвеевского, Г. И. Шора, Н. К. Мышкина, Б. И. Ковальского и др. В них влияние температурной деструкции на параметры износа оценивалось при триботехнических испытаниях, а воздействие температуры на свойства масел не учитывалось. Поэтому в настоящей работе влияние температуры на процессы температурной деструкции, протекающие в смазочном материале, оценивалось фотометрическим методом, т. е. по изменению оптической плотности, испаряемости и вязкости, а влияние продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства – на трехшариковой машине трения со схемой шар – цилиндр.

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, Р. М. Матвеевский, И. А. Буяновский, Ю. С. Заславский, И. С. Гершман, А. С. Кужаров, Н.А. Буше, Г.И. Шор, Б.И. Ковальский и др. Однако эти ученые при оценке противоизносных свойств учитывали 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 170 до 180 °С, что позволило выявить различия во влиянии продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства масел, обосновать общий критерий противоизносных свойств, учитывающий концентрацию продуктов окисления или температурой деструкции на номинальной площади фрикционного контакта, и предложить обобщенный показатель противоизносных свойств (ОППС), учитывающий скорости изменения критериев противоизносных свойств окисленных и термостатированных масел, установить доминирующее влияние продуктов окисления или температурной деструкции на механизм изнашивания.

Объекты исследования. Моторные масла минеральной, частично-синтетической и синтетической базовых основ, различных классов вязкости и групп эксплуатационных свойств.

Предмет исследования. Процессы термоокисления и температурной деструкции, и влияние их продуктов на эксплуатационные свойства моторных масел.

Цель диссертационной работы. Повысить контроль качества эксплуатационных свойств моторных масел, обеспечить обоснованный их выбор для ДВС различной степени нагруженности, разработать предложения по усовершенствованию системы классификации моторных масел по классам вязкости и группе эксплуатационных свойств.

Задачи исследования:

1. Разработать метод контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел

различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств.

2. Исследовать процессы окисления и температурной деструкции моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств и определить влияния продуктов этих процессов на оптические свойства, кинематическую вязкость и испаряемость.

3. Обосновать количественные критерии процессов окисления и температурной деструкции и их связь с противоизносными свойствами и вязкостно-температурными характеристиками моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств.

4. Разработать предложения по усовершенствованию системы классификации моторных масел по классам вязкости и группе эксплуатационных свойств для ДВС различной степени нагруженности.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств, позволивший оценить влияние температуры в диапазоне от 180 и 170 °С на их эксплуатационные свойства.

2. Предложены альтернативные критерии термоокислительной стабильности и температурной стойкости, позволяющие сравнивать различные смазочные материалы.

3. Предложен коэффициент доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции, позволяющий обосновано выбирать более термостойкие моторные масла.

4. Предложен обобщенный показатель противоизносных свойств термостатированных масел, позволяющий оценить влияние продуктов термостатирования на противоизносные свойства испытуемых моторных масел.

5. Предложен эмпирический критерий эксплуатационных свойств моторных масел, позволяющий комплексно оценить эксплуатационные свойства исследуемых моторных масел и идентифицировать масла на соответствие группам эксплуатационных свойств.

Практическая значимость. На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации, включающие технологии определения: термоокислительной стабильности; температурной стойкости; триботехнических характеристик окисленных и термостатированных масел; влияния продуктов окисления и температурной деструкции на вязкостно-температурные свойства; доминирующего влияния продуктов окисления или температурной деструкции на триботехнические и вязкостно-температурные характеристики моторных масел.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с применением анализа методов 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.

На защиту выносятся:

1. Метод контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств.

2. Результаты исследования влияния выбранных температур испытания на процессы термоокисления и температурной деструкции, вязкостно-температурные характеристики, противоизносные свойства моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств.

3. Результаты оценки преобладающего влияния процессов термоокисления или температурной деструкции на потенциальный ресурс, вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства моторных масел и критерии оценки.

4. Результаты регрессионного анализа процессов термоокисления и температурной деструкции, противоизносных свойств и вязкостно-температурных характеристик моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств.

5. Практические предложения по усовершенствованию системы классификации моторных масел по классам вязкости и группе эксплуатационных свойств для ДВС различной степени нагруженности.

Достоверность полученных результатов. 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.

Реализация результатов работы. Метод контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел внедрен в организации в филиале «Аэронавигация Центральной Сибири».

Апробация работы. Основные научные положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на научно-технических семинарах кафедры «Топливообеспечение и горючесмазочные материалы» института нефти и газа «Сибирского федерального университета» (Красноярск, 2015–2017 гг.); XXIV Научно-практической конференции «Тенденции развития науки и образования» (Самара, 2017); Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения МЦНС «Наука и просвещение» (Пенза, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, включая 10 работ в издании, рекомендованном перечнем ВАК, и 2 работы в издании, рекомендованном перечнем SCOPUS, получено 4 патента РФ.

Личный вклад автора. Автором лично разработаны методы контроля процессов окисления и температурной деструкции и их влияния на противоизносные свойства и вязкостно-температурные характеристики моторных масел, проведены исследования отдельного влияния процессов окисления и температурой деструкции на противоизносные свойства и вязкостно-температурные характеристики моторных масел с различной базовой основой, обоснованы критерии изменения состояния масел в зависимости от условий их эксплуатации, принято участие в подготовке научных статей и оформлении патента.

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 рассмотрены методы и средства определения критериев термоокислительной стабильности $E_{\text{тоc}}$ и температурной стойкости $E_{\text{тc}}$ 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 многостадийным 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 позволяющих проводить экспресс-анализ. Температурная стойкость как эксплуатационный показатель в основном оценивается в условиях трения, определяет температурную область применения смазочных масел, но мало изучена 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.

Второй раздел посвящен разработке метода контроля, включающего 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.

Суть метода заключается в следующем (рисунок 1): моторные масла проходят входной контроль и определение товарных параметров оптической плотности, вязкости и противоизносных свойств. В дальнейшем они подвергаются параллельным исследованиям на термоокисление и температурную деструкцию с определением показателей потенциального ресурса, коэффициента относительной вязкости, показателей термоокислительной стабильности, температурной стойкости, противоизносных и эксплуатационных свойств. Далее выполняется сравнительный анализ полученных данных с целью определения преобладающего процесса старения.

На основе результатов исследования производилась оценка браковочных показателей моторных масел и разработка предложений по усовершенствованию существующей системы классификации моторных масел.

Для контроля показателей пробы моторных масел постоянной массы (100,0±0,1) г термостатировались при температурах 180 и 170 °С с перемешиванием (при термоокислении) и без перемешивания при атмосферном давлении с конденсацией паров и отводом конденсата (при температурной деструкции). Через постоянные промежутки времени (8 ч)

отбирались пробы термостатированного масла для прямого фотометрирования и определения оптической плотности, вязкости и испаряемости. Затем пробы масел подвергались испытаниям по той же технологии, но при определенных значениях оптической плотности дополнительно отбиралась проба термостатированного масла для испытания противоизносных свойств на машине трения, а оставшаяся часть масла доливалась до первоначального значения ($100,0 \pm 0,1$) г.

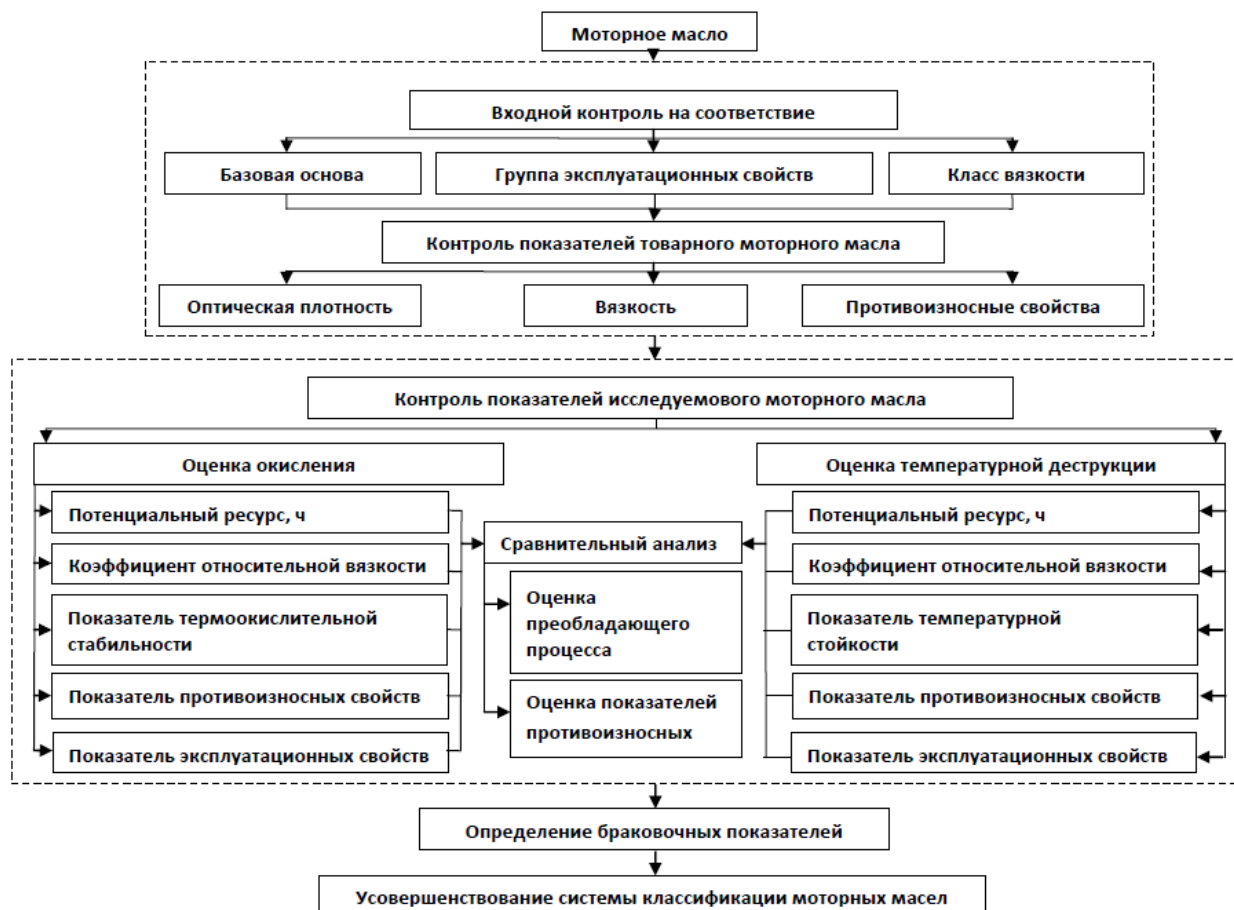


Рисунок 1 – Метод контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел

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 – 1,5 ч.

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

Третий раздел содержит результаты экспериментальных исследований процессов окисления и температурной деструкции моторных масел различной базовой основы, а также влияния продуктов этих процессов на их эксплуатационные свойства.

Испытанию подвергались моторные масла различной базовой основы, классов вязкости и группы эксплуатационных свойств. Исследования проводились по следующим маслам:

- минеральные ZIC HIFLO 10W-40 SL, Utech Navigator 15W-40 SG/CD, ТНК Супер 10W-40 SL/CF;
- частично-синтетические – Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, Mobil Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF, ТНК Супер 5W-40 SL/CF, Shell Rimula R5E 10W-40 CJ/CG/CF;
- синтетические – ALPHA'S 5W-40 SN, Mobil Super 3000 5W-40 SJ/SL/CF, Aqip Tecsint 5W-30 CJ/CF.

Термоокислительная стабильность и температурная стойкость моторных масел определялись по изменению оптической плотности D , относительной вязкости K_{μ} и испаряемости G при температурах термостатирования 180 и 170 °С. Установлено, что при окислении и температурной деструкции образуется два вида продуктов с различной оптической плотностью, это вызывает изгиб зависимости $D = f(t)$. Первый участок зависимости $D = f(t)$ характеризует процесс образования начальных (растворимых) продуктов старения, а второй – процесс образования гелеобразных продуктов, которые были установлены при центрифугировании термостатированных масел. Поэтому образование гелеобразных продуктов старения обуславливает изгиб зависимостей $D = f(t)$.

Причем начало образования вторичных продуктов окисления определяется продлением участка зависимости после точки изгиба до пересечения с осью абсцисс t . Кроме того, обнаружено явление перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами термостатирования и испарения, что подтверждается зависимостями скоростей термостатирования ΔV_D и испарения ΔV_G от времени испытания t .

Установлено, что в начальный период термостатирования моторных масел интенсивность процессов окисления и деструкции практически одинакова и зависит от температуры, но при образовании продуктов с большей энергоемкостью процессы деструкции преобладают над процессами окисления (рисунок 2).

При значении оптической плотности $D = 0,5$ ед. определялся потенциальный ресурс моторных масел. Установлено, что независимо от температуры испытания и базовой основы моторных масел при процессах окисления потенциальный ресурс больше, чем при процессах температурной деструкции.

Вязкостно-температурные характеристики моторных масел оценивались по коэффициенту относительной вязкости K_{μ} и значению индекса вязкости.

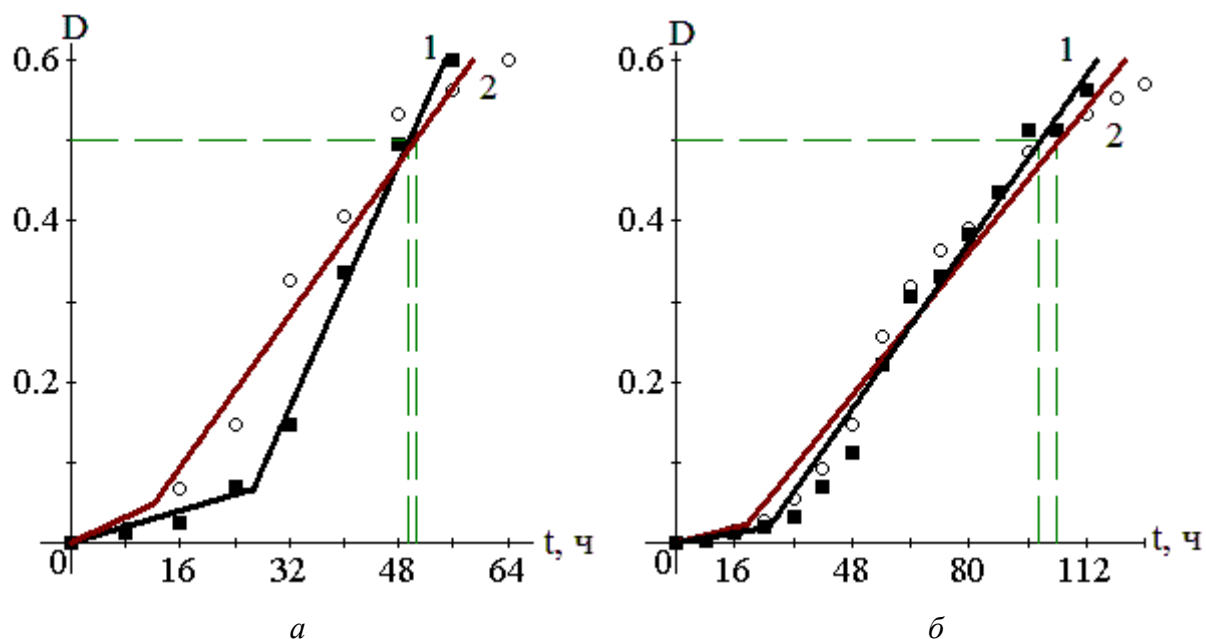


Рисунок 2 – Зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Предложены альтернативные критерии термоокислительной стабильности и температурной стойкости, учитывающие индекс вязкости и определяемые выражениями:

- для термоокислительной стабильности:

$$K_{\text{ТОС}} = \text{ИВ}_{\text{ОК}} \cdot D_{\text{ОК}}, \quad (1)$$

- для температурной стойкости:

$$K_{\text{ТС}} = \text{ИВ}_{\text{Д}} \cdot D_{\text{Д}}, \quad (2)$$

где $\text{ИВ}_{\text{ОК}}$ и $\text{ИВ}_{\text{Д}}$ – индексы вязкости, учитывающие, соответственно, процессы окисления и температурной деструкции;

$D_{\text{ОК}}$ и $D_{\text{Д}}$ – оптические плотности, учитывающие, соответственно, процессы окисления и температурной деструкции.

Данный критерий принят безразмерным и позволяет сравнивать масла различной базовой основы.

Зависимости критериев термоокислительной стабильности и температурной стойкости от оптической плотности и температуры испытания представлены на рисунке 3. Данные зависимости критериев $K_{\text{ТС(ТОС)}} = f(D)$ описываются линейным уравнением:

$$K_{\text{ТС(ТОС)}} = \alpha_{\text{ТС(ТОС)}} D, \quad (3)$$

где $\alpha_{ТС}$ и $\alpha_{ТОС}$ – параметры, характеризующие скорости изменения критериев термоокислительной стабильности и температурной стойкости соответственно, учитывающие индекс вязкости и оптическую плотность.

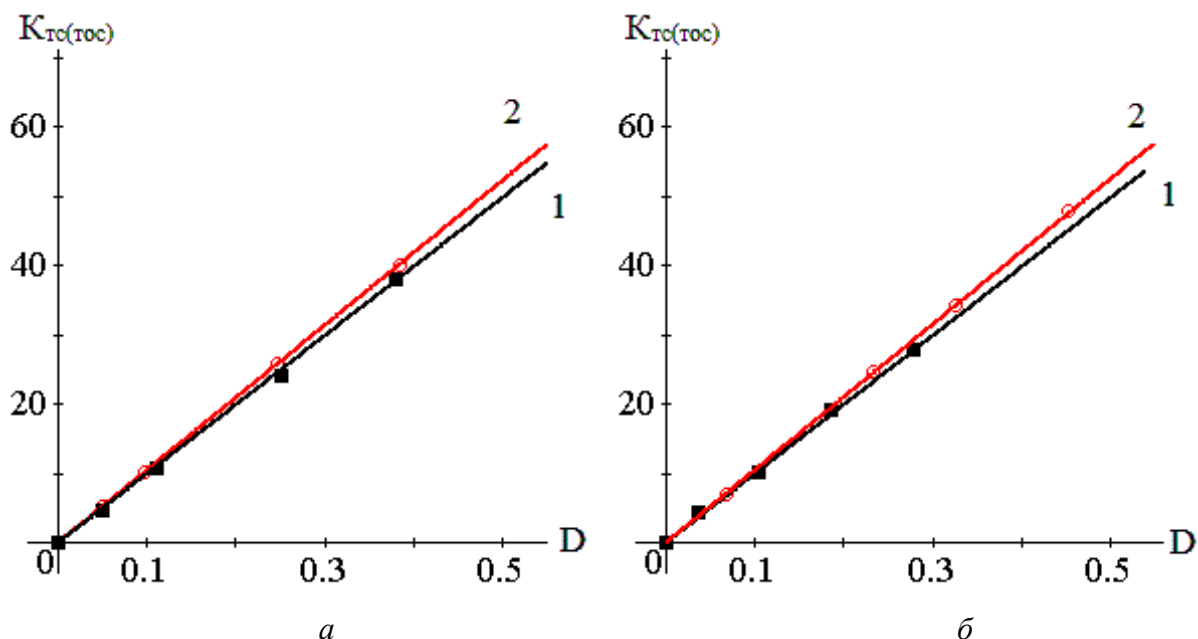


Рисунок 3 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL: *a* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Установлена общая закономерность понижения критерия термоокислительной стабильности и повышения критерия температурной стойкости при увеличении температуры испытания моторных масел.

Противоизносные свойства моторных масел оценивались по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трех шарах.

Предложен эмпирический критерий противоизносных свойств $\Pi_{ПС}$ термостатированных масел, определяемый отношением

$$\Pi_{ПС} = \frac{D}{U}, \text{ мм}^{-1} \quad (4)$$

где U – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах, мм.

Данный критерий характеризует концентрацию продуктов окисления или температурной деструкции на номинальной площади фрикционного контакта.

На рисунке 4 представлены зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности, которые имеют линейный характер и описываются уравнением

$$\Pi_{ПС} = \alpha_{\PiТС(ПТОС)} D, \quad (5)$$

где $\alpha_{\Pi_{\text{ПС}}(\text{ПТОС})}$ – скорости изменения критерия противоизносных свойств $\Pi_{\text{ПС}}$ при температурной деструкции и окислении соответственно.

Установлено, что противоизносные свойства моторных масел и доминирующее влияние одного из процессов термостатирования на противоизносные свойства зависят от базовой основы и температуры испытания.

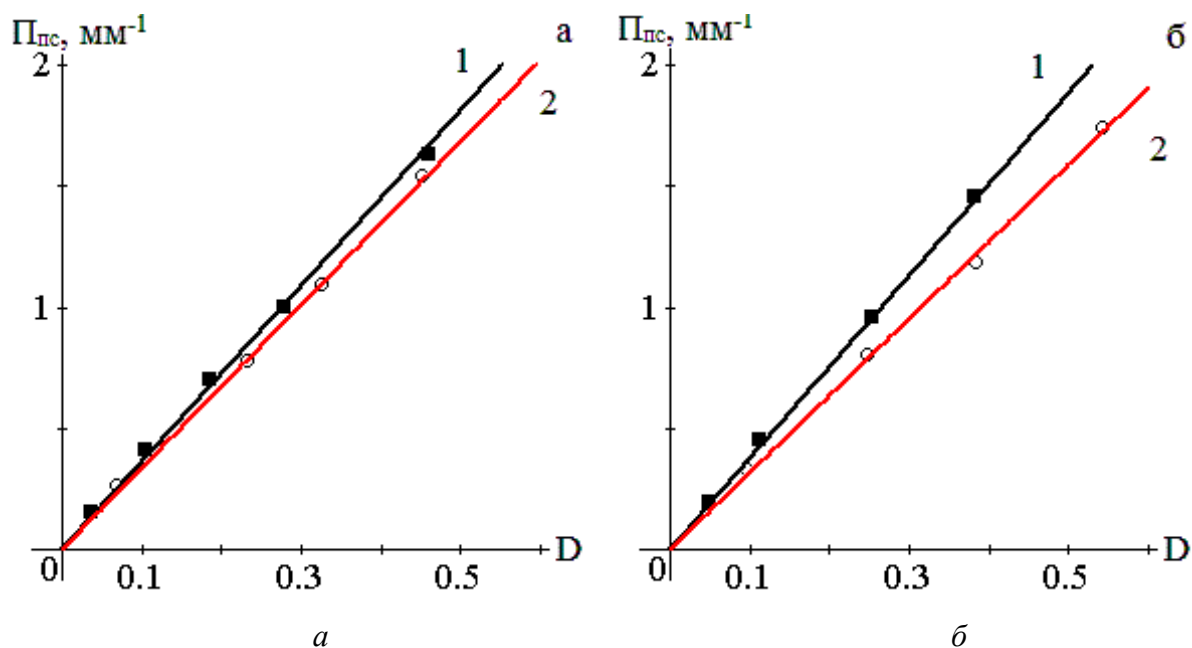


Рисунок 4 – Зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Для исследования связи между критерием температурной стойкости или термоокислительной стабильности $K_{\text{ТС(ТОС)}}$ и критерием противоизносных свойств $\Pi_{\text{ПС}}$ и температурой испытания моторного масла построена зависимость между ними (рисунок 5). Установлено, что зависимости $K_{\text{ТС(ТОС)}} = f(\Pi_{\text{ПС}})$ описываются линейным уравнением

$$K_{\text{ТС(ТОС)}} = \alpha_{\text{ТС(ТОС)}} \Pi_{\text{ПС}}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{ТС(ТОС)}}$ – скорость изменения критериев температурной стойкости или термоокислительной стабильности $K_{\text{ТС(ТОС)}}$.

Зависимости критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств моторных масел позволяют оценивать преобладающее влияние процессов окисления или температурной деструкции на их эксплуатационные свойства, а именно вязкостно-температурные характеристики и противоизносные

свойства. Установлено, что с повышением температуры испытания увеличивается различие между процессами окисления и температурной деструкции.

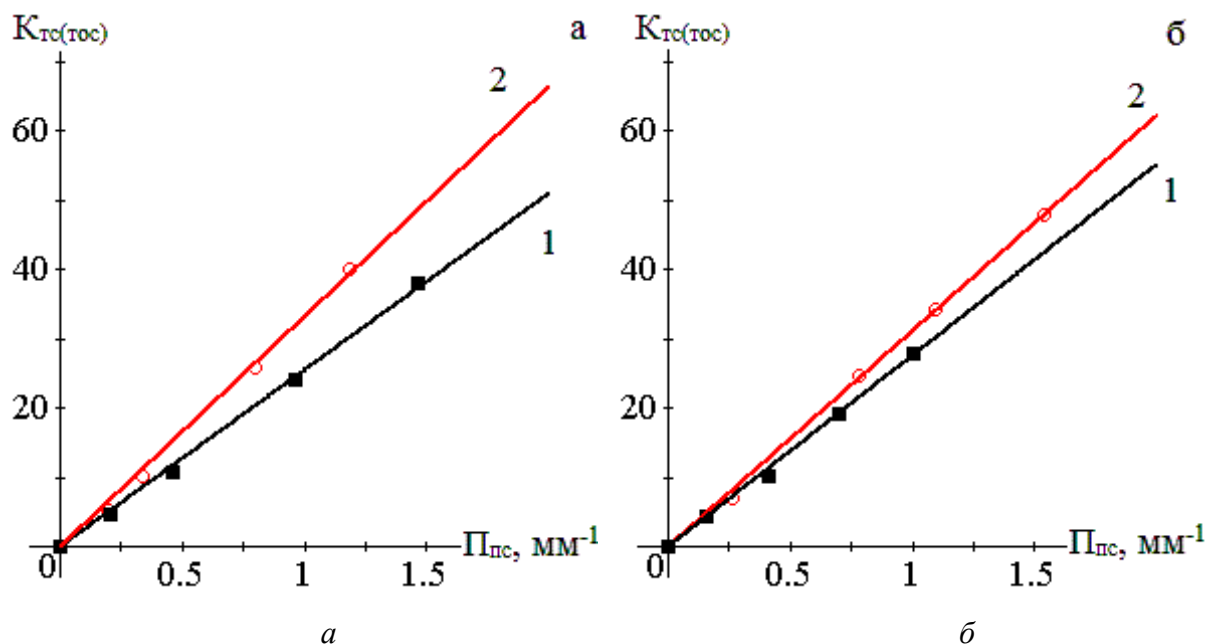


Рисунок 5 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от критерия противоизносных свойств и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Предложен эмпирический критерий эксплуатационных свойств моторных масел $K_{эс}$, который учитывает концентрацию продуктов термостатирования, вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства:

$$K_{эс} = \frac{D \cdot \lg \text{ИВ}}{U}, \text{ мм}^{-1}, \quad (7)$$

где ИВ – индекс вязкости термостатированного моторного масла;

D – оптическая плотность;

U – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах, мм.

Зависимости критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности представлены на рисунке 6 и $K_{эс} = f(D)$ описываются линейным уравнением

$$K_{эс} = \alpha_{эстс(эстос)} D, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{ЭТС(ЭТОС)}}$ – скорость изменения эмпирического критерия эксплуатационных свойств $K_{\text{ЭС}}$ исследуемого масла при температурной деструкции и окислении соответственно.

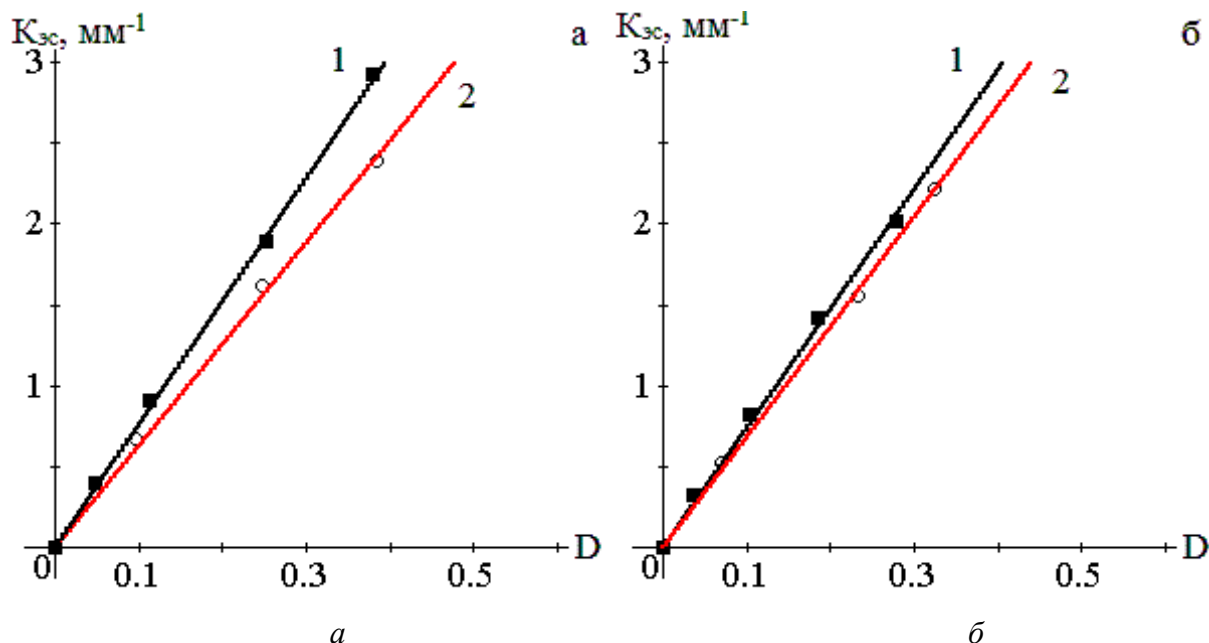


Рисунок 6 – Зависимости критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Установлено, что критерий эксплуатационных свойств $K_{\text{ЭС}}$ моторных масел и преобладающее влияние одного из процессов термостатирования на данный критерий зависят от базовой основы масла и температуры испытания.

Результаты окисления моторных масел представлены в таблице 1, а температурной деструкции – в таблице 2.

Для определения преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции на свойства моторного масла предложен коэффициент доминирующего влияния $K_{\text{ДВ}}$, рассчитываемый как отношение скоростей изменения критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности и позволяющий обоснованно выбирать более термостойкие моторные масла:

$$K_{\text{ДВ}} = \frac{\alpha_{\text{ТС}}}{\alpha_{\text{ТОС}}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{ТС}}$ и $\alpha_{\text{ТОС}}$ – параметры, характеризующие скорости изменения критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности.

Таблица 1 – Результаты испытания моторных масел различных базовых основ при окислении

Показатель	Минеральное моторное масло ZIC HIPLO 10W-40 SL	Ч/с моторное масло Castrol Magnates 10W-40 R SL/CF	Синтетическое моторное масло ALPHA S 5W-40 SN
Потенциальный ресурс при $D = 0,5$ ед., ч при 180 °C при 170 °C	50 101	69 145	76 163
Коэффициент относительной вязкости K_{μ} при 180 °C при 170 °C	1,167/1 1,169/1	1/0,652 1/0,84	1/0,8 1/0,849
Испаряемость, г: за 56 ч при 180 °C за 112 ч при 170 °C	12,05 10,84	6,18 9,8	9,09 10,72
Показатель P_{TOS} за 56 ч при 180 °C за 112 ч при 170 °C	0,693 0,668	0,386 0,481	0,496 0,531
Индекс вязкости товарного масла, ед.	98	107,13	140
Индекс вязкости окисленного масла, ед. при 180 °C при 170 °C	105,25/98 105,87/98	107,72/92,88 109,42/98,98	140/106,29 140/105,9
Критерий K_{TOS} при 180 °C при 170 °C	$K_{TOS} = 104,568 \cdot D$ $K_{TOS} = 105,017 \cdot D$	$K_{TOS} = 93,136 \cdot D$ $K_{TOS} = 102,646 \cdot D$	$K_{TOS} = 113,498 \cdot D$ $K_{TOS} = 120,459 \cdot D$
Параметр износа, мм при 180 °C при 170 °C	0,323/0,23 0,297/0,23	0,35/0,255 0,313/0,255	0,266/0,25 0,305/0,249
Критерий Π_{TOS} , mm^{-1} при 180 °C при 170 °C	$\Pi_{TOS} = 3,177 \cdot D$ $\Pi_{TOS} = 3,368 \cdot D$	$\Pi_{TOS} = 3,541 \cdot D$ $\Pi_{TOS} = 3,305 \cdot D$	$\Pi_{TOS} = 4,013 \cdot D$ $\Pi_{TOS} = 3,236 \cdot D$
Критерий $K_{ЭС}$ при 180 °C при 170 °C	$K_{ЭС} = 6,284 \cdot D$ $K_{ЭС} = 6,82 \cdot D$	$K_{ЭС} = 6,981 \cdot D$ $K_{ЭС} = 6,656 \cdot D$	$K_{ЭС} = 8,171 \cdot D$ $K_{ЭС} = 6,878 \cdot D$
Примечание: Цифры, стоящие через знак дробления (/), обозначают максимальное и минимальное значение соответственно.			

Таблица 2 – Результаты испытания моторных масел различных базовых масел при температурной деградации

Показатель	Минеральное моторное масло ZIC HIFLO 10W-40 SL	Ч/с моторное масло Castrol Magnates 10W-40 R SL/CF	Синтетическое моторное масло ALPHA S 5W-40 SN
Потенциальный ресурс при $D = 0,5$ ед., ч при 180 °C при 170 °C	48 94	62 120	65 120
Коэффициент относительной вязкости, K_{μ} при 180 °C при 170 °C	1,111/1 1,097/1	1/0,624 1/0,769	1/0,8 1/0,8
Испаряемость, г за 56 ч при 180 °C за 112 ч при 170 °C	3,91 4,54	3,96 6,71	4,46 5,41
Показатель P_{TC} за 56 ч при 180 °C за 112 ч при 170 °C	0,645 0,607	0,433 0,539	0,438 0,555
Индекс вязкости товарного масла, ед.	98	107,13	140
Индекс вязкости гермостигированного масла, ед. при 180 °C при 170 °C	100,15/95,22 105,23/98	113,47/105,2 112,42/104,61	140/113,9 140/114,7
Критерий K_{TC} при 180 °C при 170 °C	$K_{TC} = 99,589 \cdot D$ $K_{TC} = 99,55 \cdot D$	$K_{TC} = 112,157 \cdot D$ $K_{TC} = 107,396 \cdot D$	$K_{TC} = 122,786 \cdot D$ $K_{TC} = 126,164 \cdot D$
Параметр износа, мм при 180 °C при 170 °C	0,263/0,23 0,276/0,23	0,295/0,248 0,263/0,236	0,318/0,255 0,309/0,255
Критерий $P_{TC} \cdot \text{мм}^{-1}$ при 180 °C при 170 °C	$P_{TC} = 3,177 \cdot D$ $P_{TC} = 3,628 \cdot D$	$P_{TC} = 3,461 \cdot D$ $P_{TC} = 4,241 \cdot D$	$P_{TC} = 3,456 \cdot D$ $P_{TC} = 3,231 \cdot D$
Критерий $K_{ЭС}$ при 180 °C при 170 °C	$K_{ЭС} = 7,606 \cdot D$ $K_{ЭС} = 7,384 \cdot D$	$K_{ЭС} = 7,094 \cdot D$ $K_{ЭС} = 8,519 \cdot D$	$K_{ЭС} = 7,222 \cdot D$ $K_{ЭС} = 6,876 \cdot D$
Примечание: Цифры, стоящие через знак дроби (/), обозначают максимальное и минимальное значение соответственно.			

Если значение коэффициента доминирующего влияния меньше 1, то преобладают процессы термоокислительной стабильности, а если больше 1, то – процессы температурной стойкости.

Для определения преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства был предложен обобщенный показатель противоизносных свойств (ОПИС) термостатированных масел, позволяющий оценить преобладающее влияние продуктов температурной деструкции на триботехнические характеристики испытуемых моторных масел

$$\text{ОПИС} = \frac{\alpha_{\text{ПТС}}}{\alpha_{\text{ПТОС}}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{\text{ПТС(ПТОС)}}$ – параметры, характеризующие среднюю скорость изменения критерия противоизносных свойств от концентрации продуктов деструкции и окисления соответственно.

Если значение обобщенного показателя противоизносных свойств меньше 1, то преобладающее влияние на противоизносные свойства оказывают процессы окисления, а если больше 1, то – процессы температурной деструкции.

Для определения преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции на основные эксплуатационные свойства моторных масел был предложен коэффициент влияния процессов $K_{\text{ВП}}$ термостатированных масел, вычисляемый по формуле

$$K_{\text{ВП}} = \frac{\alpha_{\text{ЭСТС}}}{\alpha_{\text{ЭСТОС}}}, \quad (11)$$

где $\alpha_{\text{ЭСТС}}$ и $\alpha_{\text{ЭСТОС}}$ – параметры, характеризующие среднюю скорость изменения критерия эксплуатационных свойств от концентрации продуктов деструкции и окисления соответственно.

Если значение коэффициента влияния процессов окисления или температурной деструкции меньше 1, то преобладающее влияние на эксплуатационные свойства оказывают процессы окисления, а если больше 1, то – процессы температурной деструкции.

Сравнительная оценка преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции масел по коэффициенту доминирующего влияния $K_{\text{ДВ}}$, обобщенному показателю противоизносных свойств и коэффициенту влияния процессов $K_{\text{ВП}}$ представлена в таблице 3

Таблица 3 – Сравнительная оценка преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции масел различных базовых основ

Показатель	Минеральное моторное масло ZIC HIFLO 10W-40 SL	Ч/с моторное масло Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF	Синтетическое моторное масло ALPHA'S 5W-40 SN
Коэффициент $K_{дв}$, ед.:			
при 180 °С	0,952	1,204	1,081
при 170 °С	0,948	1,046	1,047
Обобщенный показатель противоизносных свойств, ед.:			
при 180 °С	1,187	0,977	0,861
при 170 °С	1,076	1,28	0,999
Коэффициент $K_{вп}$, ед.:			
при 180 °С	1,21	1,016	0,883
при 170 °С	1,083	1,279	0,999

Четвертый раздел посвящен разработке практических рекомендаций, использования предлагаемого метода с дальнейшим определением эксплуатационных свойств моторных масел при термоокислении и температурной деструкции, последующим выявлением преобладающего процесса старения и оценкой браковочных показателей моторных масел.

Разработанные рекомендации внедрены в организации в филиале «Аэронавигация Центральной Сибири».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработанный метод контроля влияния процессов окисления и температурной деструкции, включающий термостатирование масел и их прямое фотометрирование, определение вязкости и индекса вязкости, термоокислительной стабильности, температурной стойкости и противоизносных свойств, позволяет получить дополнительную информацию о влиянии процессов окисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства, обосновать доминирующие влияния одного из них и критерии оценки.

2. Получены эмпирические зависимости и регрессионные уравнения процессов окисления и температурной деструкции моторных масел различных базовых основ, классов вязкостей и групп эксплуатационных свойств, давшие возможность подтвердить единый механизм температурных преобразований в масле независимо от процессов окисления или температурной деструкции, который предусматривает образование на первой стадии растворимых продуктов, переходящих в продукты более энергоемкие и отличающиеся скоростью процессов, обуславливающей сопротивляемость температурным воздействиям.

3. Предложены альтернативные критерии термоокислительной стабильности и температурной стойкости, определяемые произведением оптической плотности испытуемого моторного масла при окислении или температурной деструкции на индекс вязкости, что позволило обосновать коэффициент доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции и сравнивать масла различной базовой основы.

4. Предложен критерий противоизносных свойств термостатированных масел, что дало возможность обосновать обобщенный показатель противоизносных свойств, с помощью которого было выявлено преобладающее влияние продуктов температурной деструкции над продуктами окисления.

5. Предложен эмпирический критерий эксплуатационных свойств моторных масел, учитывающий изменение оптических свойств, индекса вязкости и параметра износа, что позволило обосновать коэффициент влияния процессов термостатирования и подтвердить преобладающее влияние процессов окисления или температурной деструкции на эксплуатационные свойства испытуемых масел. Защищен охранными документами Российской Федерации (Патент РФ № 2637621).

6. Разработанные практические рекомендации включают технологии определения термоокислительной стабильности, температурной стойкости, противоизносных свойств, вязкостно-температурных характеристик, потенциального ресурса, критериев эксплуатационных свойств и преобладающего влияния процессов температурной деструкции или окисления, что позволяет обоснованно выбирать моторные масла для квалификационных и моторных испытаний и совершенствовать систему классификации моторных масел.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) статьи базы данных SCOPUS:

1. Ermilov, E. A. Substantiation of optical criteria of thermal-oxidative stability of lubricating oil / B. I. Kovalski, V. A. Balyasnikov, D. V. Agrovichenko, V. Z. Oleynik, V. I. Afanasov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – 87 p.

2. Ermilov, E. A. Method for monitoring evaluation of dominant influence processes of oxidation and temperature destruction on basic indications of bodies of motor oils / Yu. N. Bezborodov, B. I. Kovalski, // IOP Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1399 p.

б) статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

3. Ермилов, Е. А. Исследование влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Е. А. Ермилов, М. М. Рунда // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний. – 2016. – № 12. – С. 14–17.

4. Ермилов, Е. А. Влияние продуктов окисления на вязкостно-температурные характеристики моторных масел / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Е. А. Ермилов // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний. – 2017. – № 1. – С. 20–22.

5. Ермилов, Е. А. Окисление и температурная деструкция минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL в процессе эксплуатации / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. А. Балясников // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2017. – № 6. – С. 26–29.

6. Ермилов, Е. А. Оценка влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. А. Балясников // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 5. С. 99–106.

7. Ермилов, Е. А. Оценка влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции синтетического моторного масла Alpha'S 5W-40 SN / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. А. Балясников // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 5. – С. 185–192.

8. Ермилов, Е. А. Оценка влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. А. Балясников // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 6. – С. 67–74.

9. Ермилов, Е. А. Оценка влияния процессов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. З. Олейник // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 6. – С. 214–222.

10. Ермилов, Е. А. Влияние процессов окисления и температурной деструкции на вязкостно-температурные характеристики моторных масел / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. З. Олейник // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 9. – Ч. 1. – С. 310–318.

11. Ермилов, Е. А. Метод контроля термоокислительной стабильности моторных масел / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, В. З. Олейник, Н. С. Батов // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 4. – С. 130 – 134.

12. Ермилов, Е. А. Метод контроля влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN / Е. А. Ермилов, Ю. Н. Безбородов, Б. И. Ковальский // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2019. – № 12-8. С. 972 – 979.

в) патенты РФ:

13. Пат. № 2650602, МПК G 01 N 25/12, G 01 N 33/30. Способ определения температурной области работоспособности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н., Афанасов В. И., Ермилов Е. А., Батов Н. С.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». – № 2016150615; заявл. 21.12.2016; опубл. 16.04.2018, Бюл. № 11.

14. Пат. № 2637621, МПК G 01 N 25/00, G 01 N 33/30. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ермилов Е. А., Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н., Петров О. Н., Сокольников А. Н.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». – № 2017117809; заявл. 22.05.2017; опубл. 05.12.2017, Бюл. № 34.

15. Пат. № 2621471, МПК G 01 25/00. Способ определения интенсивности процессов окисления смазочных материалов / Ковальский Б. И., Верещагин В. И., Безбородов Ю. Н., Сокольников А. Н., Ермилов Е. А.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». – № 2016131943; заявл. 03.08.2016; опубл. 06.06.2017, Бюл. № 16.

16. Пат. № 2627562, МПК G 01 N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Сокольников А. Н., Ермилов Е. А., Балясников В. А., Батов Н. С.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». – № 2016127325; заявл. 06.07.2016; опубл. 08.08.2017, Бюл. № 22.

г) работы в других изданиях:

17. Ермилов, Е. А. Оценка влияния процессов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел / Е. А. Ермилов, В. А. Балясников, В. З. Олейник, Д. В. Агровиченко // Тенденции науки и образования в современном мире. – Самара. – 2017. – № 24-2. – С. 21–25.

18. Ермилов, Е. А. Сравнительная характеристика температурных пределов работоспособности масел и классами эксплуатационных свойств / В. А. Балясников, Е. А. Ермилов, В. З. Олейник // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения, Пенза: МЦНС «Наука и просвещение». – 2017. – 310 с.