

На правах рукописи



КРАВЦОВА ЕКАТЕРИНА ГЕННАДЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ
ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ
СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ В ПРИСУТСТВИИ СТАЛИ
ШХ15**

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 – 2013

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

Научный руководитель

Ковальский Болеслав Иванович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Капранов Борис Иванович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет», профессор кафедры физических
методов и приборов контроля качества

Еськов Александр Васильевич
доктор технических наук, профессор
кафедры «Экспериментальная физика»
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»

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 «11» июня 2013г. в 17:00 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.

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.

Автореферат разослан «30» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Винокуров Б. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность рассматриваемой проблемы. В большинстве узлов и агрегатов различных машин в качестве опор качения используются подшипники качения, изготовленные из стали ШХ (ГОСТ 801-60), устойчивой против трения качения при больших давлениях.

Подшипники качения работают как в жидких смазочных материалах различного назначения, так и пластичных смазках. Выбор подшипников основан на расчетах долговечности, условной нагрузки, коэффициента работоспособности и расчетной грузоподъемности, при этом не учитываются изменения свойств смазочных материалов в процессе эксплуатации.

Смазочный материал в подшипниках качения применяют для снижения трения и температуры на поверхностях тел качения. Он предохраняет тела качения от непосредственного металлического контакта путем создания эластогидродинамического слоя.

Повышенные температуры узла трения вызывают окисления смазочного материала, механическую, температурную и химическую деструкции присадок, однако влияние материала подшипника на эти процессы изучено недостаточно.

Поэтому поиск новых методов оценки влияния стали ШХ15 на процессы окисления смазочных масел различного назначения и базовых основ, а также изменение их противоизносных свойств является актуальной задачей, решение которой позволит обоснованно осуществлять выбор смазочных масел для подшипниковых узлов, контролировать и прогнозировать их состояние в процессе эксплуатации, уточнить методики расчета и повысить надежность механических систем.

Степень разработанности темы. Надежность подшипниковых узлов качения зависит от методов расчета, условий и режимов работы узлов, влияния их материалов на процессы старения смазочных масел различной базовой основы, на показатели термоокислительной стабильности, а также влияние продуктов окисления на противоизносные свойства масел.

Существенный вклад в разработку теории и методов расчета подшипников качения внесли: Н.А. Спицин, В.Н. Трейер, С.В. Пинегин, Д.Н. Решетов, М.А. Галахов, А.В. Никитин и др., однако все эти методы не учитывают изменения свойств смазочного материала при эксплуатации подшипниковых опор качения.

В процессе эксплуатации смазочный материал окисляется, продукты которого взаимодействуют с материалом подшипника, образуя химические соединения на поверхностях трения. Эти продукты оказывают существенное влияние на долговечность подшипникового узла, поэтому в данной работе проводились исследования по двум направлениям: изучению процессов окисления моторных масел различной базовой основы со сталью ШХ15 и без стали; оценки влияния продуктов окисления на противоизносные свойства.

Механизм окисления минеральных масел рассмотрены в работах Л.А. Кондакова, Н.И. Черножукова, С.Е. Крейна, А.В. Непогодьева и др., основные результаты которых применены при разработке стандартов. Однако в этих

работах в качестве основных показателей изменения свойств смазочных масел применялись вязкость, кислотность (щелочность), летучесть, оптические свойства, период осадкообразования, а механизм окисления описывался уравнениями, учитывающими изменение кислотного числа при статических температурах испытания. Испытание масел при циклически изменяющихся температурах испытания позволяет снизить трудоемкость испытаний по сравнению с испытаниями при статических температурах и определить влияние температуры на скорости изменения процессов окисления и испарения и тем самым определить температуру работоспособности исследуемого масла.

В работах А.С. Ахматова, И.А. Буяновского, С.В. Венцеля, М.А. Григорьева, В.Н. Лозовского, В.П. Лашхи, Р.М. Матвеевского, Ю.А. Розенберга, Ф.И. Фукса и др. приведены данные о влиянии продуктов старения масел при эксплуатации техники на противоизносные свойства. Эти результаты исследования послужили основой для разработки и обоснования критерия противоизносных свойств окисленных масел, что позволяет сравнивать различные смазочные масла, по этому показателю, и обосновано выбирать наиболее температурно-стабильные масла с высокими противоизносными свойствами. Кроме того, в методику расчета подшипников качения предложить ввести корректирующий коэффициент, учитывающий базовую основу масла и влияния стали на противоизносные свойства.

Целью диссертационной работы. Разработать метод контроля интенсивности процессов окисления и противоизносных свойств моторных масел различных базовых основ при использовании в механических узлах стали ШХ15 и обосновать критерии оценки.

Задачи исследования:

1. Разработать комплексный метод контроля влияния стали ШХ15 на процессы окисления и противоизносные свойства моторных масел при статической и циклически изменяющихся температурах испытания.

2. Исследовать процессы окисления, протекающие в моторных маслах различных базовых основ при статической и циклически изменяющихся температурах без стали и со сталью ШХ15, обосновать критерии оценки.

3. Исследовать влияние окисленных моторных масел со сталью ШХ15 и без стали на противоизносные свойства и обосновать критерий оценки.

4. Разработать практические рекомендации по выбору смазочных материалов для подшипниковых узлов.

Объект исследований – моторные масла различных базовых основ.

Предмет исследований – оценка влияния стали ШХ15 на окислительные процессы и противоизносные свойства моторных масел различных базовых основ при статической и циклически изменяющихся температурах.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с применением теоретического анализа механизмов окисления смазочных материалов в присутствии металлов, теории планирования экспериментов, теории трения, износа и смазки в машинах, теории изнашивания, оптических и физико-химических методов исследования.

При выполнении работы применялись поверенные стандартные и специально разработанные приборы, а для обработки результатов экспериментальных исследований использовались методы математической статистики и регрессионного анализа.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором, подтверждается теоретически и экспериментально. Научные положения аргументированы, теоретические результаты работы и выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями их воспроизводимостью и непротиворечивостью исследованиям других авторов, математической обработкой с учетом положений трибологии, теории размерностей и подобия, положений самоорганизации механических систем, а также использованием сертифицированных программ для обработки экспериментальных данных в соответствии с постановкой и планированием экспериментальных исследований.

На защиту выносятся:

- метод контроля влияния стали ШХ15 на процессы окисления и их продуктов на противоизносные свойства моторных масел при статической и циклически изменяющейся температурах испытания;
- результаты экспериментальных исследований влияния стали ШХ15 на показатели термоокислительной стабильности товарных моторных масел различных базовых основ;
- результаты регрессионного анализа процессов окисления моторных масел при статической и циклически изменяющейся температурах в диапазоне от 150 до 180°C;
- критерии оценки влияния стали ШХ15 на процессы окисления и противоизносные свойства моторных масел различных базовых основ;
- практические рекомендации по выбору смазочных масел для подшипниковых узлов.

Научная новизна работы:

- разработан метод контроля процессов окисления моторных масел при статической и циклически изменяющихся температурах испытания, позволяющий определить влияние стали ШХ15 на показатели термоокислительной стабильности и противоизносные свойства;
- получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения процессов окисления товарных масел со сталью и без стали при статической и циклически изменяющихся температурах в диапазоне от 150 до 180°C, позволяющие оценить влияние стали ШХ15 на скорости окисления и испарения, потенциальный ресурс и обосновать критерий термоокислительной стабильности;
- получены экспериментальные зависимости противоизносных свойств моторных масел различных базовых основ от концентрации продуктов окисления, что позволило установить влияния стали ШХ15 на процессы изнашивания;

- предложены критерии каталитического влияния стали ШХ15 на окислительные процессы и противоизносных свойств моторных масел различной базовой основы, позволяющие обоснованно осуществлять выбор масел для подшипниковых узлов.

Практическая значимость работы. Разработан и внедрен метод и комплекс оборудования для испытаний смазочных материалов различных базовых основ и назначения на термоокислительную стабильность при статической и циклически изменяющихся температурах, которые позволяют определить дополнительные показатели эксплуатационных свойств включающие: оптические свойства, летучесть, кинематическую вязкость, температурную область работоспособности, потенциальный ресурс, критерии термоокислительной стабильности и противоизносных свойств и влияние стали ШХ15 на эти показатели.

Результатами диссертационной работы доказана необходимость создания банка данных совместимости сталей ШХ с различными смазочными материалами, использование, которого на этапе проектирования машин и механизмов способствует повышению надежности работы подшипниковых узлов и снижению эксплуатационных затрат.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2009» Кырг.гос. ун-т строит-ва, трансп.; на международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университете «Нефть и газ Западной Сибири» Тюмень; труды четвертого международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо-2010» г. Санкт-Петербург; доклады первого международного научно-технического конгресса «Энергетика в глобальном мире» г.Красноярск; научно-методических семинарах кафедры «Топливообеспечение и горючесмазочные материалы» г. Красноярск, СФУ ИНиГ, 2009-2012 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, включая 7 работ в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, издана в соавторстве монография, получено 3 патента РФ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Реализация результатов работы. Результаты исследований использованы в учебном процессе Института нефти и газа Сибирского федерального университета и на предприятиях: ОАО АТП «ТЕРМИНАЛ НЕФТЕГАЗ », ИП. АТП Сидоров.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 136 страниц, включая 97 страниц машинописного текста, 62 рисунка, 7 таблиц. Работа состоит из введения, 5 разделов, основных выводов, библиографического списка из 103 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе проведен анализ условий работы и методов расчета подшипниковых узлов, направленных на повышение их надежности и долговечности за счет оптимального выбора условий работы и геометрических параметров, взаимодействия материалов пар трения с масляной средой, основы эластогидродинамической теории трения, методы оценки термоокислительной стабильности и противоизносных свойств.

На основе анализа установлено, что методы расчета подшипников качения на долговечность не учитывают изменение свойств смазочных материалов в процессе эксплуатации. Правильно подобранный смазочный материал может дать значительный эффект за счет снижения износа, затрат на техническое обслуживание и ремонт, и повысить срок службы машин и подшипниковых узлов.

Смазочный материал, как элемент (деталь) механической системы, в процессе эксплуатации снижает эксплуатационные свойства за счет многих факторов, к которым относятся: процессы окисления базовой основы, деструкция функциональных присадок, влияние на эти процессы условий и режимов работы техники, материалов пар трения, продуктов окисления и примесей попадающих извне. Основным требованием к смазочным материалам является обеспечение износостойкости материалов пар трения в широком диапазоне нагрузок и температур, что достигается введением разного рода пакетов присадок, поэтому решение этой проблемы направлено на определение связи между механизмами старения масел и их способностью формировать защитные граничные слои на поверхностях трения.

Обзор проведенных исследований выявил отсутствие научно-обоснованных критериев оценки влияния металлов на процессы окисления и противоизносные свойства смазочных масел.

Второй раздел посвящен разработке метода контроля влияния стали ШХ15 на окислительные процессы смазочных масел при циклическом изменении температуры испытания, обоснованию выбора моторных масел для исследования, средств контроля с кратким их описанием, проведению и обработки результатов исследования.

В качестве средств измерения выбраны: фотометр, предназначенный для определения изменения оптических свойств моторных масел при термостатировании без стали и со сталью по коэффициенту поглощения светового потока; прибор для термостатирования масел, машина трения, малообъемный вискозиметр и электронные весы.

Масла испытывались в четыре этапа. На первом этапе проба масла массой (например $100 \pm 0,1$ г) заливалось в стеклянный стакан и термостатировалось с перемешиванием стеклянной мешалкой с постоянной частотой вращения 300 ± 2

об/мин, при циклическом изменении температуры испытания от 150 до 180°C повышая на 10°C, а затем понижая на 10°C от 180 до 150°C в течение постоянного времени (6 ч). Влияние температуры на окислительные процессы оценивалось по изменению коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости и летучести.

На втором этапе масло испытывалось по аналогичной технологии, при статической температуре 180°C. После каждых 8 часов термостатирования дополнительно отбиралась проба окисленного масла 15 г. для испытания на трехшариковой машине трения со схемой «шар-цилиндр» параметры трения: нагрузка 13Н; скорость скольжения 0,68 м/с, температура в объеме 80°C, время испытания 2 часа, а проба масла в стакане доливалась товарным маслом до первоначальной массы (100±0,1г.).

На третьем и четвертом этапах масло испытывалось совместно со сталью по технологиям первого и второго этапов. Образцы стали ШХ15 представляли собой верхнюю обойму подшипника диаметром 40мм, толщиной 2 мм и шириной 10мм. Поверхность образцов подшипника полировалась, а перед испытаниями обезжиривалась бензином.

Для исследования выбраны минеральные, частично синтетические и синтетические моторные масла, что позволило оценить влияние базовой основы на сопротивляемость окислению, летучесть и изменение кинематической вязкости и определить влияние стали ШХ15 на эти показатели.

Испытанию подвергались минеральные: М-10Г_{2К}; Spectrol Super Universal 15W-40 CD/SF; частично-синтетические Лукойл Супер 15W-40 CD/SF; Chevron Sypreme 10W-40 SJ/CF; Mobil Super 10W-40 SJ/CF; синтетические: Shell Helix 0W-40 SL/CF; Chevron Sypreme 5W-30 SJ/CF; VISCO 5000 5W-40SJ/CF. Результаты экспериментальных данных обрабатывались методами математической статистики и регрессионного анализа с использованием программы Advanced Grapher. Произведена оценка достоверности экспериментальных результатов, включающая среднее квадратичное отклонение, коэффициенты корреляции, коэффициенты регрессии и среднюю погрешность аппроксимации.

В третьем разделе приведены результаты испытания моторных масел различных базовых основ при циклическом изменении температуры без стали ШХ15 и со сталью.

Влияние стали ШХ на процессы окисления оценивалось по изменению коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$, коэффициенту относительной вязкости $K_{\text{в}}$, и летучести G относительно показателей масел испытанных без стали (рисунок 1-3). Установлено, что сталь ШХ15 практически не оказывает влияния на процессы окисления минерального масла (рисунок 1а), ускоряет процессы окисления для частично синтетического (рисунок 1 б, кривая 2) и синтетического (рисунок 1в, кривая 2) масел соответственно в 1,2 и 1,5 раза.

Коэффициент относительной вязкости, определяемый отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного (рисунок 2) зависит от наличия в масле стали ШХ15. Для минерального и синтетического масел сталь понижает

вязкость, а для частично синтетического масла сталь оказывает незначительно влияние.

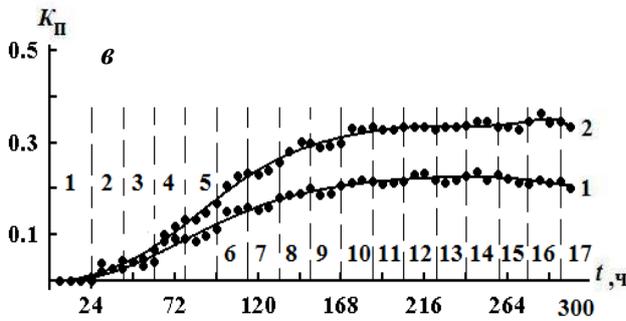
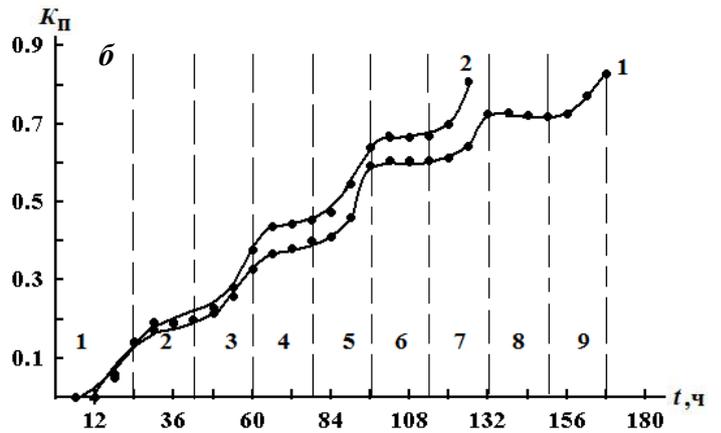
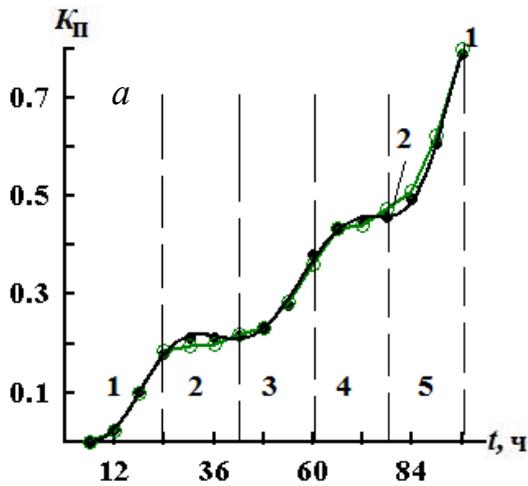


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента поглощения светового потока $K_{П}$ от времени испытания минерального масла М-10Г₂К (а), частично синтетического Chevron Supreme 10W-40 SJ/CF (б) и синтетического Shell Helix 0W-40 SL/CF (в) при циклическом изменении температуры: 1 - товарное масло; 2 - тоже со сталью ШХ15; 1, 3, 5 - циклы повышения температуры; 2, 4 - циклы понижения температуры.

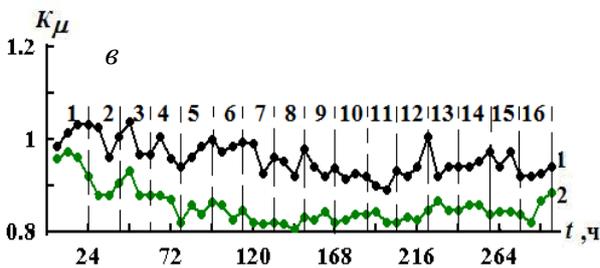
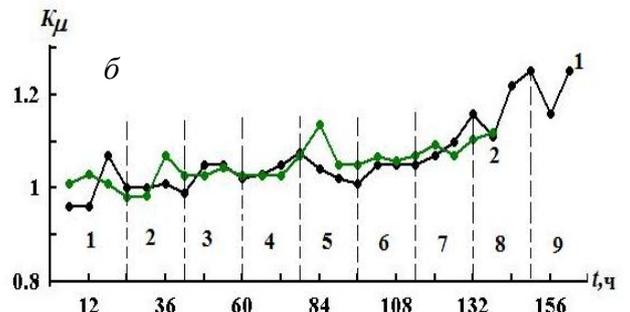
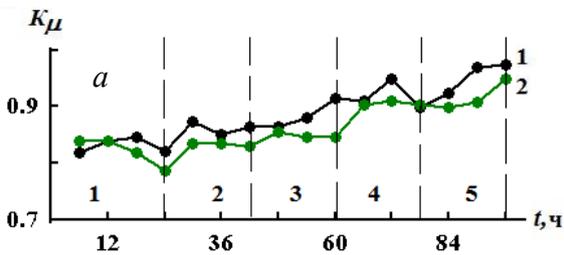


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента относительной вязкости K_{μ} от времени испытания при циклическом изменении температуры (Усл. обозн. см. на рисунке 1).

Летучесть минерального (рисунок 3а) и частично синтетического масел (рисунок 3б) превышает показатели летучести масел подверженных испытанию со сталью, что объясняется влиянием поверхностной энергии стали на молекулярную связь, увеличивающую энергию необходимую для парообразования. Летучесть синтетического масла (рисунок 3в) со сталью в начальный период до 144 часов ниже, чем при проведении испытания масла без стали. Дальнейший ход испытаний показал, что масло с присутствием стали

подвержено испарению в большей степени и следовательно протекающие процессы парообразования ускоряются.

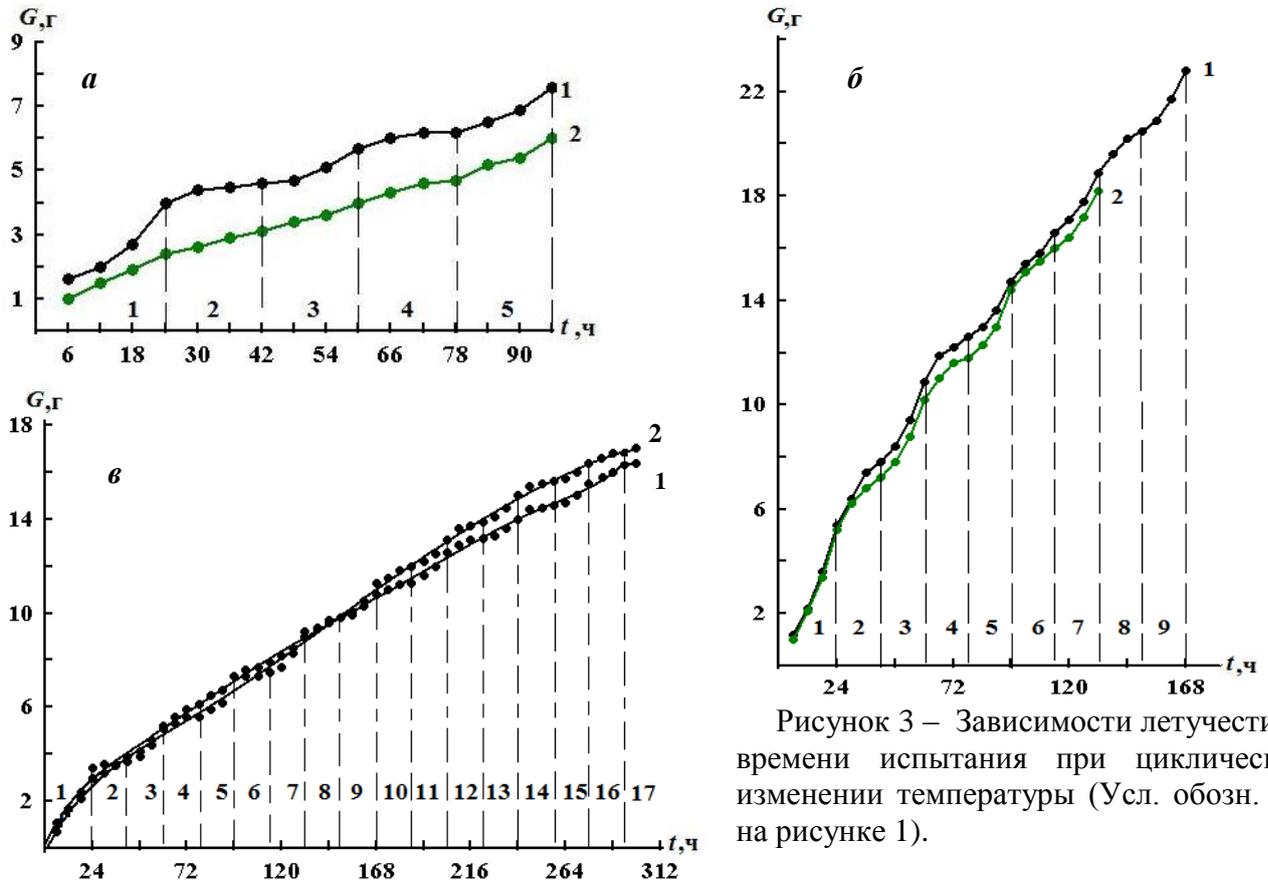


Рисунок 3 – Зависимости летучести от времени испытания при циклическом изменении температуры (Усл. обозн. см. на рисунке 1).

Суммарная энергия, затрачиваемая на образование продуктов окисления и испарения, характеризует термоокислительную стабильность масла, которую предложено оценивать коэффициентом термоокислительной стабильности $E_{\text{ТОС}}$ (рисунок 4) определяемым суммой коэффициентов поглощения светового потока и летучести:

$$E_{\text{ТОС}} = K_{\text{п}} + K_G, \quad (1)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент поглощения светового потока; K_G – коэффициент летучести.

$$K_G = m/M, \quad (2)$$

где m и M – соответственно масса испарившегося масла и масса пробы до испытания, г.

Оценку влияния стали ШХ15 на процессы окисления предложено оценивать коэффициентом каталитического влияния $K_{\text{КВ}}$, определяемого отношением

$$K_{\text{КВ}} = E_{\text{ТОС}}^{\text{М}} / E_{\text{ТОС}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{ТОС}}^{\text{М}}$ и $E_{\text{ТОС}}$ – соответственно коэффициенты термоокислительной стабильности масел испытанных со сталью и без стали.

Термоокислительная стабильность минерального масла (рисунок 4а) изменяется в зависимости от циклов повышения и понижения температуры испытания. Во втором цикле сталь ШХ15 понижает значения коэффициента

термоокислительной стабильности из-за снижения летучести. Для частично синтетического (рисунок 4 б) сталь ШХ15 оказывает влияние с третьего цикла и увеличивает термоокислительную стабильность максимально на 10,7% по сравнению с результатами испытания масла без стали ШХ15. Синтетическое масло (рисунок 4 в) при испытании со сталью увеличивает скорость окисления и испарения после 48 часов, а при 132 часах испытания без стали она составляет 0,288, со сталью 0,379, то есть сталь ускоряет процесс окисления и испарения на 13,2%.

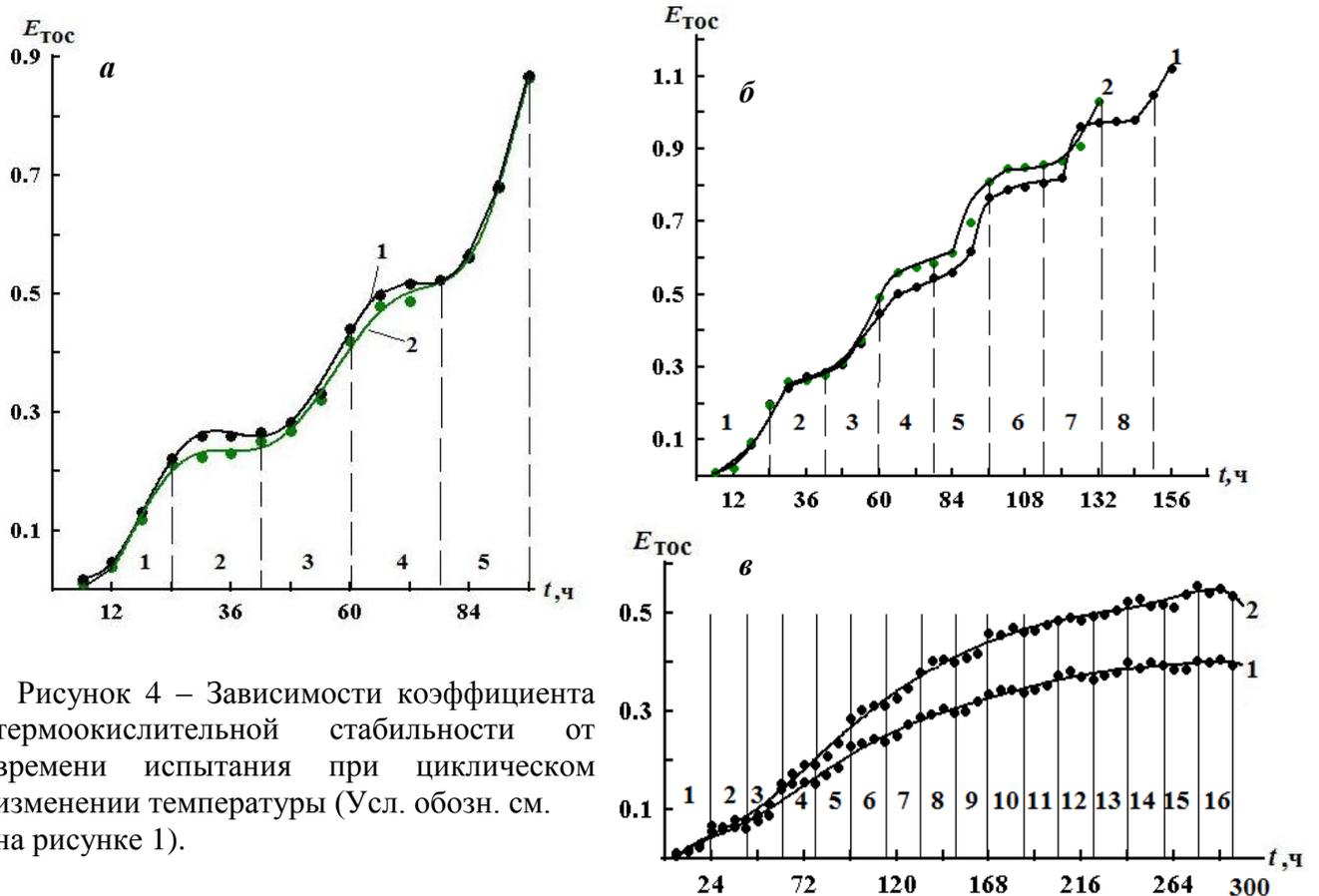


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания при циклическом изменении температуры (Усл. обозн. см. на рисунке 1).

Анализ зависимостей коэффициента $K_{\text{КВ}}$ от времени окисления моторных масел (рисунок 5) показал, что сталь ШХ15 является ингибитором для минерального масла (рисунок 5а), для частично синтетического (рисунок 5б) оказывает каталитическое влияние при высоких температурах и ингибиторное при низких (150-160°C) и является катализатором окисления синтетического масла во всем температурном диапазоне испытания (рисунок 5в).

Изменение потенциального ресурса моторных масел различной базовой основы представлены на рисунке 6 в виде гистограммы. Для минеральных и частично синтетических масел он оценивался при коэффициенте $E_{\text{ТОС}} = 0,7$, а синтетических при $E_{\text{ТОС}} = 0,3$. Из гистограммы видно, что для минеральных масел ресурс одинаковый со сталью ШХ15 и без нее, у частично синтетических сталь снижает ресурс для Лукойл Супер 15W-40 CD/SF на 3,2%, Chevron Supreme 10W-40 SJ/CF на 9,5% и у синтетических Chevron Supreme 5W-30 SJ/CF на 44%; Shell Helix 0W-40 SL/CF на 37%.

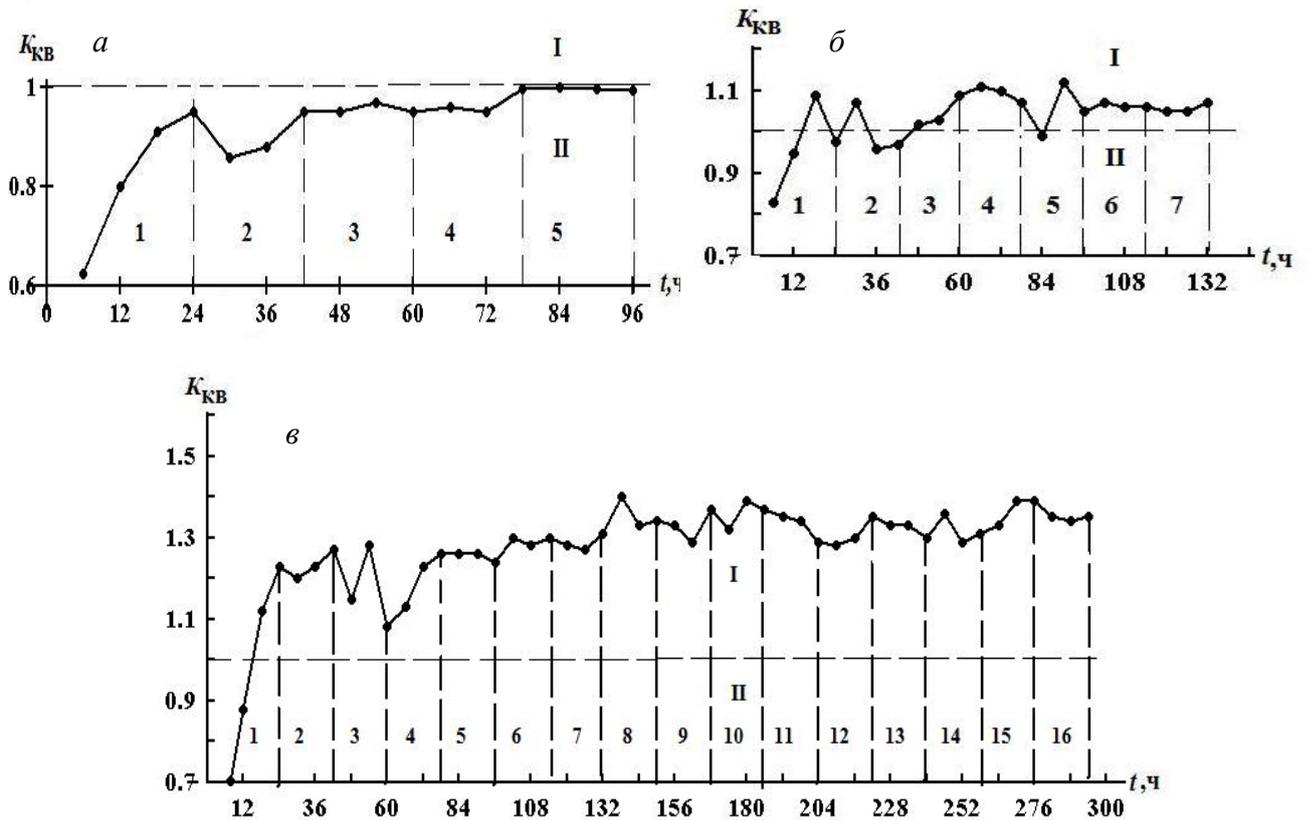


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента влияния стали на процессы окисления при испытании минерального моторного масла М-10Г₂к (а), частично синтетического Chevron Supreme 10W-40 SJ/CF (б) и синтетического Shell Helix 0W-40 SL/CF (e): 1, 3, 5 - циклы повышения температуры; 2, 4 - циклы понижения температуры; I – область каталитического влияния стали; II – область ингибиторного влияния стали.

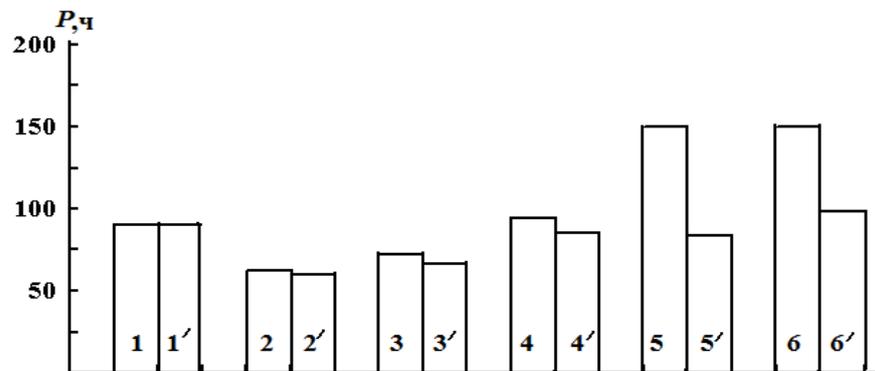


Рисунок 6 – Гистограмма изменение потенциального ресурса от базовой основы масел: минеральные М-10Г₂к 1 – без стали, 1' – со сталью; Spectrol Super Universal 15W-40 2 – без стали, 2' – со сталью; частично синтетические Лукойл Супер 15W-40 3 – без стали, 3' – со сталью; Chevron Supreme 10W-40 4 – без стали, 4' – со сталью; синтетические Chevron Supreme 5W-30 5 – без стали, 5' – со сталью; Shell Helix 0W-40 6 – без стали, 6' – со сталью.

Данные по исследуемым маслам сведены в таблицу, согласно которым отличительными особенностями влияния стали на моторные масла являются различия в количестве циклов температурного нагружения, интенсивности процессов окисления и испарения в зависимости от температуры испытания.

Таблица – Результаты исследования влияния стали ШХ15 на процессы окисления моторных масел различных базовых основ.

Марка моторных масел	Основные показатели термоокислительной стабильности при температурах 180 и 150°C в течение 6 ч, в четвертом цикле понижения температуры испытаний												Количество циклов испытаний	
	коэффициент поглощения светового потока, K_d		коэффициент относительной вязкости, K_v		коэффициент летучести, G, г		коэффициент термоокислительной стабильности, E_{TOS}		коэффициент каталитического влияния стали K_{KB}				без ШХ15	с ШХ15
	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15			
	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	без ШХ15	с ШХ15	
Минеральные: М-10Г2К	0,38	0,36	0,915	0,847	5,7	4	0,44	0,42	0,95			5	5	
	0,457	0,473	0,898	0,903	6,2	4,7	0,523	0,522	0,998					
Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC.	0,643	0,643	0,94	0,91	7,6	8,5	0,725	0,736	1,01			5	4	
	0,647	0,673	0,92	0,93	9,3	10	0,75	0,784	1,04					
Частично синтетические: Лукойл Супер15W-40 CD/SF	0,4	0,473	0,899	0,86	6,9	7,9	0,474	0,559	1,18			5	4,5	
	0,6	0,66	0,882	0,865	7,8	9,1	0,685	0,76	1,1					
Chevron Supreme 10W-40SJ/CF	0,327	0,377	1,02	1,027	10,9	10,2	0,449	0,491	1,1			9	7	
	0,4	0,453	1,076	1,071	12,6	11,8	0,544	0,587	1,08					
Синтетические: Chevron Supreme 5W-30SJ/CF	0,067	0,12	0,949	0,87	4,4	7,4	0,113	0,2	1,76			16	13,5	
	0,09	0,173	0,949	0,87	5,2	8,6	0,145	0,267	1,84					
Shell Helix 0W-40 SL/CF	0,087	0,1	0,969	0,88	5,2	5,1	0,142	0,154	1,084			16,5	16,5	
	0,087	0,133	0,942	0,822	6,1	5,6	0,152	0,192	1,26					

На основании проведенных исследований для оценки влияния стали ШХ15 на процессы окисления моторных масел различных базовых основ предложены такие показатели как коэффициенты поглощения светового потока, относительной вязкости, термоокислительной стабильности и летучести, что позволяет обоснованно осуществлять выбор масел при проектировании подшипниковых узлов машин и агрегатов.

В четвертом разделе приведены результаты исследования влияния стали ШХ15 на противоизносные свойства моторных масел различных базовых основ.

Для исследования выбраны: минеральное масло Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC, частично синтетическое Mobil Super 10W-40 SJ/CF и синтетическое VISCO 5000 5W-40SJ/CF.

Масла испытывались при температуре 180°C со сталью и без стали. При достижении значений коэффициента K_{Π} равного 0,1;0,2;0,3...0,8 дополнительно отбиралась проба окисленного масла 15г. для испытания на машине трения.

Влияние стали и продуктов окисления на противоизносные свойства масел оценивалось по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трех шарах (рисунок 7а). Показано, что с увеличением коэффициента поглощения светового потока сталь ШХ15 повышает противоизносные свойства окисленных минеральных масел при $K_{\Pi} > 0,2$.

Для оценки противоизносных свойств окисленных масел и влияние стали на эти свойства применен критерий противоизносных свойств Π , определяемый эмпирическим уравнением

$$\Pi = K_{\Pi} / U, \quad (4)$$

где K_{Π} – коэффициент поглощения светового потока, U – параметр износа, мм.

Данный критерий характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта и имеет линейную зависимость от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 7 б).

Регрессионные уравнения зависимостей критерия Π от коэффициента K_{Π} имеют вид для окисленных масел:

$$\text{без стали} \quad \Pi = 4,02 K_{\Pi} \quad (5)$$

$$\text{со сталью} \quad \Pi = 3,47 K_{\Pi} \quad (6)$$

Коэффициент корреляции равен 0,995.

Коэффициенты 4,02 и 3,47 характеризуют скорость изменения критерия Π в зависимости от коэффициента поглощения светового потока. В этой связи для оценки влияния стали ШХ на противоизносные свойства предложен коэффициент $K_{\text{ВСП}}$, определяемый отношением

$$K_{\text{ВСП}} = \frac{V_{\Pi} - V_{\text{ПС}}}{V_{\Pi}} \cdot 100\% \quad (7)$$

где V_{Π} и $V_{\text{ПС}}$ – соответственно скорости изменения критерия противоизносных свойств масел, окисленных без стали и со сталью ШХ15.

Коэффициент влияния стали ШХ15 на противоизносные свойства показывает, насколько процентов понизились противоизносные свойства окисленных масел со сталью по сравнению с окисленным маслом без стали. Для минерального масла Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC понижения составило 13,7 %.

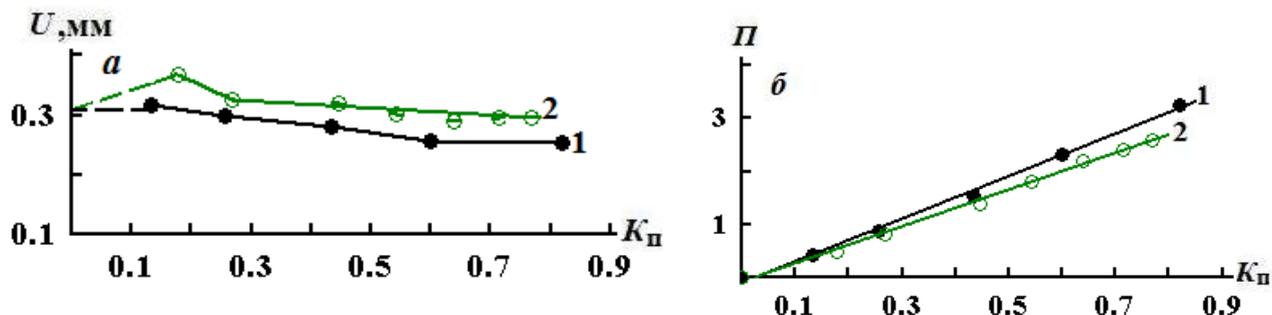


Рисунок 7 – Зависимости диаметра пятна износа $U(a)$ и критерия противоизносных свойств $\Pi(b)$ от коэффициента поглощения светового потока при испытании минерального моторного масла Spectrol Super Universal 15W-40 SF/CC : 1 – масло без стали; 2 – масло со сталью ШХ15.

На рисунке 8 представлены зависимости диаметра пятна износа и критерия противоизносных свойств частично синтетического моторного масла Mobil Super 10W-40 SJ/CF. Установлено, что противоизносные свойства масла понижаются при малых значениях коэффициента $K_{\Pi} < 0,2$ независимо от наличия в масле стали, а затем повышаются, однако сталь ШХ15 в целом понижает противоизносные свойства частично синтетического масла (рисунок 8б, кривая 2).

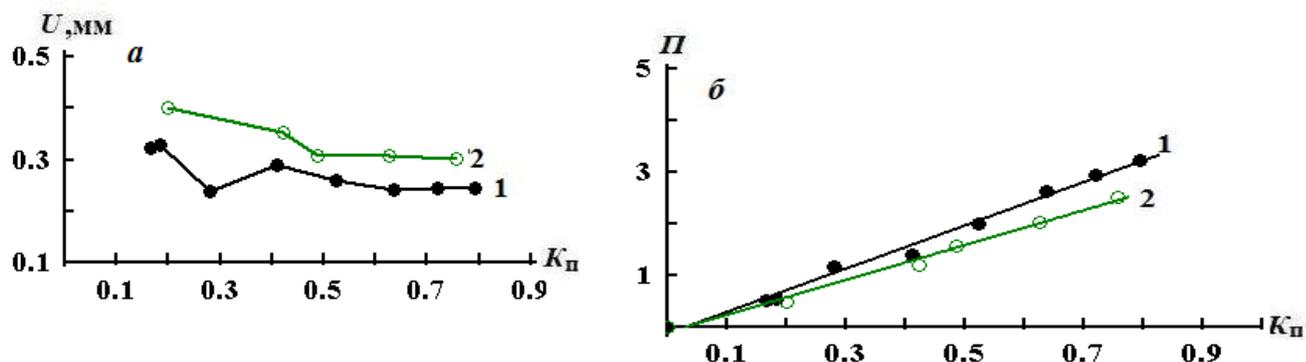


Рисунок 8 – Зависимости диаметра пятна износа $U(a)$ и критерия противоизносных свойств $\Pi(b)$ от коэффициента поглощения светового потока при окислении частично синтетического моторного масла Mobil Super 10W-40 SJ/CF: 1 – масло без стали; 2 – масло со сталью ШХ15.

Регрессионные уравнения зависимостей критерия Π от коэффициента поглощения светового потока при окислении для окисленных масел имеют вид:

$$\text{без стали} \quad \Pi=4,18K_{\Pi} \quad (8)$$

$$\text{со сталью} \quad \Pi_{\text{C}}=3,37 K_{\Pi} \quad (9)$$

Коэффициент корреляции равен 0,995

Для частично синтетического моторного масла Mobil Super 10W-40 SJ/CF понижение противоизносных свойств составило 19,4%.

Противоизносные свойства синтетического масла VISCO 5000 5W-40 SJ/CF представлены на рисунке 9. Установлено, что критерий противоизносных окисленных масел без стали и со сталью изменяется по линейной зависимости от концентрации продуктов окисления до значения $K_{\Pi}=0,5$, а после данного значения противоизносные свойства синтетического масла со сталью повышаются, а без стали стабилизируются.

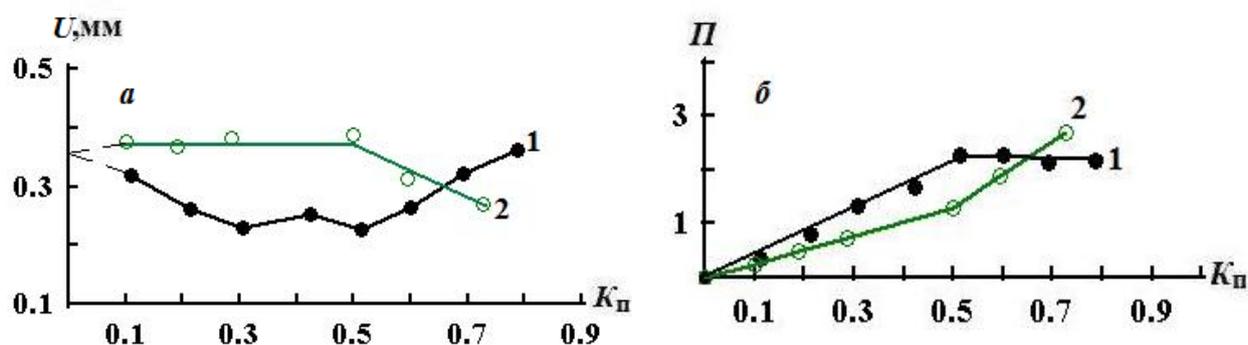


Рисунок 9 – Зависимости диаметра пятна износа U (а) и критерия противоизносных свойств Π (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении синтетического моторного масла VISCO 5000 5W-40 SJ/CF: 1 – масло без стали; 2 – масло со сталью ШХ15.

Нарушение линейности зависимости критерия Π от коэффициента поглощения светового потока K_{Π} при значении $>0,5$ вызвано увеличением вязкости за допустимые пределы (норма увеличения 30-35%). Поэтому регрессионные уравнения определены для линейных участков зависимостей $\Pi=f(K_{\Pi})$ и имеют вид для масел:

$$\text{без стали} \quad \Pi=4,38K_{\Pi} \quad (10)$$

$$\text{со сталью} \quad \Pi_{\text{C}}=2,58K_{\Pi} \quad (11)$$

Коэффициент корреляции равен 0,995.

Для синтетического моторного масла VISCO 5000 5W-40 SJ/CF понижение противоизносных свойств составило 41%.

В пятом разделе представлены практические рекомендации, включающие технологии определения: параметров влияния сталей на окислительные процессы смазочных масел; температурной области работоспособности элементов трибосистем; критериев влияния сталей на показатели термоокислительной стабильности смазочных материалов и противоизносные свойства.

Практические рекомендации позволяют создать банк данных по совместимости конструкционных сталей со смазочными материалами, что обеспечит обоснованный их выбор на стадии проектирования узлов трения.

На рисунке 10 представлена схема технологии определения влияния стали ШХ15 на окислительные процессы и противоизносные свойства смазочных материалов.

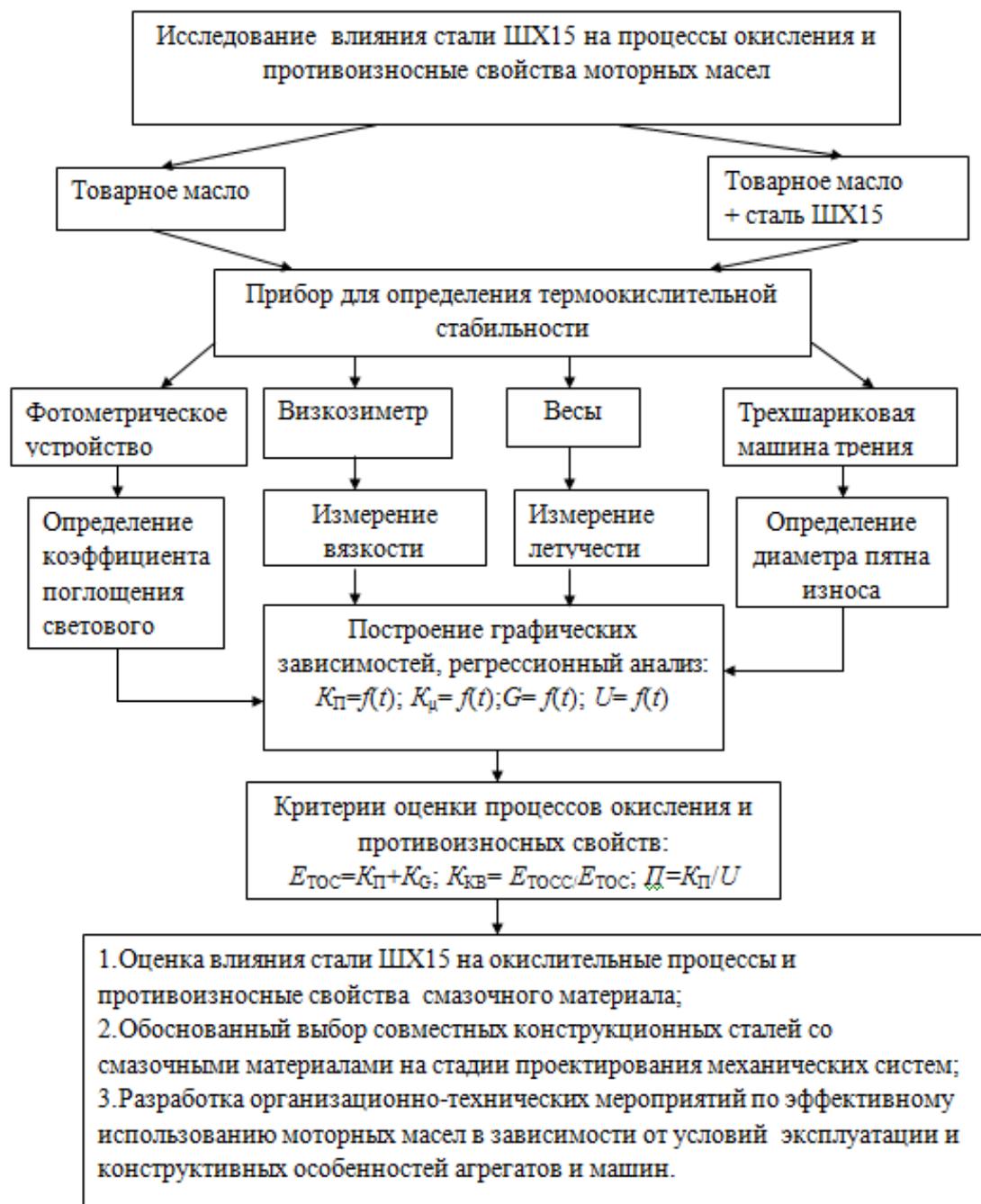


Рисунок 10 – Схема технологии определения влияния стали ШХ15 на окислительные процессы и противоизносные свойства смазочных материалов.

Разработанные технологии внедрены на предприятиях: ОАО АТП «ТЕРМИНАЛНЕФТЕГАЗ» и Индивидуального предпринимателя А.П. Сидорова, а также в учебный процесс Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

Основные выводы и результаты исследования

1. Разработан метод контроля влияния стали ШХ15 на окислительные процессы и противоизносные свойства моторных масел при статической и циклически изменяющихся температурах испытания, позволяющий установить новые критерии для оценки термоокислительной стабильности и противоизносных свойств смазочных материалов, которые расширяют информацию об их качестве и позволяют конструкторам обоснованно осуществлять их выбор на стадии проектирования машин и агрегатов.

2. Получены функциональные зависимости изменения летучести, коэффициентов относительной вязкости и поглощения светового потока от времени испытания масел различной базовой основы без стали и со сталью ШХ15, позволяющие оценить влияние стали ШХ15 на скорости окисления и испарения, а также противоизносные свойства масел.

3. Предложен критерий оценки каталитического влияния стали ШХ15 на параметры термоокислительной стабильности, определяемый отношением коэффициентов термоокислительной стабильности масел испытанных со сталью и без стали, что позволяет определить влияние базовой основы и стали на окислительные процессы и обоснованно осуществлять выбор масел для подшипниковых узлов. Установлено, что сталь ШХ15 является катализатором процессов окисления для частично синтетических и синтетических моторных масел и ингибитором для минеральных.

4. Предложен критерий оценки противоизносных свойств смазочных масел, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа, характеризующий условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, зависимость которого от коэффициента поглощения светового потока имеет линейный характер, а скорости изменения критериев для товарного масла и испытанного со сталью позволяют количественно оценить влияние стали на противоизносные свойства окисленных масел. Установлено, сталь ШХ15 понижает противоизносные свойства моторных масел независимо от базовой основы.

5. Разработаны практические рекомендации, включающие технологии определения: влияния сталей на процессы окисления, температурной области работоспособности подшипниковых опор, критериев влияния сталей на процессы окисления и противоизносные свойства смазочных масел, позволяющие повысить эффективность использования моторных масел и осуществлять обоснованный выбор в зависимости от условий эксплуатации и конструктивных особенностей агрегатов, а также создать банк данных о совместимости материалов подшипников качения и других конструкционных сталей с различными смазочными материалами, что позволяет повысить надежность машин на этапе проектирования.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Ковальский, Б. И. Изменение износостойкости стали ШХ15 при термостатировании ее в среде минерального масла М-10Г_{2К} / Б. И. Ковальский, **Е. Г. Мальцева**, Н. Н. Малышева, С. Б. Ковальский, Е. А. Вишневская // Вестник СибГАУ: Вып.2(35) – Красноярск, 2011г. – С 154 – 160.

2. Ковальский, Б. И. Влияние электрического потенциала на механохимические процессы при граничном трении скольжения / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, С. Б. Ковальский, **Е. Г. Мальцева** // Вестник СибГАУ: Вып.1(34) – Красноярск, 2011г. – С 135 – 139.

3. Ковальский, Б. И. Методика исследования противоизносных свойств товарных моторных масел и механохимических процессов при граничном трении скольжения / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, С. Б. Ковальский, Н. Н. Малышева, **Е. Г. Мальцева** // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т.316. – №2. С.42 – 46.

4. Ковальский, Б. И. Влияние стали ШХ15 на окислительные процессы моторного масла Лукойл Супер 15W-40 CD/SF / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, **Е. Г. Кравцова**, Н. Н. Малышева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – №7. С. 126 – 130.

5. Шрам, В.Г. Исследование процессов температурной деструкции моторных масел различных базовых основ / В. Г. Шрам, Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева, **Е. Г. Кравцова** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – №1. С. 117 – 121.

6. Шрам, В.Г. Исследование пятен износа моторных масел различных базовых основ / В. Г. Шрам, Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, **Е. Г. Кравцова** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – №3. С. 92 – 95.

7. Малышева, Н. Н. Каталитическое действие металлов на окислительные процессы в смазочных материалах и их температурная стойкость/ Н. Н. Малышева, А. А. Метелица, **Е. Г. Кравцова**, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012 – №4(36). С. 33 – 38.

б) монография

8. Безбородов, Ю. Н. Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных материалов по параметрам термоокислительной стабильности и температурной стойкости: монография / Ю. Н. Безбородов, Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева, А. Н. Сокольников, **Е. Г. Мальцева**. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, Красноярск: 2011. – 366с.

в) патенты РФ

9. Пат. № 2408886 Рос. Федерация: МПК G 01N 33/30 / Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б. И. Ковальский, А. В. Юдин, Н. Н. Ананьин, Ю. Н. Безбородов, **Е. Г. Мальцева**; заявитель и

патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2009141424/28; заявл. 09.11.2009; опубл. 10.01.2011 Бюл.№1.

10. Пат. № 2453832 Рос. Федерация: МПК G 01N 25/02 / Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б. И. Ковальский, **Е. Г. Мальцева**, Ю. Н. Безбородов и др.; заявитель патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2010153736/28; заявл. 27.12.2010; опубл. 20.06.2012 Бюл. № 17.

11. Пат. №2454654 Рос. Федерация: МПК G 01N 33/30 / Способ определения качества смазочных масел / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, **Е. Г. Мальцева** и др.; заявитель патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». №2011107418/28; заявл. 25.02.2011; опубл. 27.06.2012 Бюл. №18.

г) материалы конференций

12. Ковальский, Б. И. Система контроля смазочных материалов / Б. И. Ковальский, С. Б. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, **Е. Г. Мальцева** // Интерстроймех-2009: Материалы международной научно-технической конференции / Кырг.гос. ун-т строит-ва, трансп. и архит. – Б.:2009.- С. 345-349.

13. Ковальский, Б. И. Методика исследования моторных масел различных базовых основ на термоокислительную стабильность / Б. И. Ковальский, В. С. Даниленко, **Е. Г. Мальцева** // Интерстроймех-2009: Материалы международной научно-технической конференции/Кырг.гос. ун-т строит-ва, трансп. и архит. –Б.:2009. – С. 340 – 344.

14. Ковальский, Б. И. Влияние постоянного тока, пропускаемого через фрикционный контакт на противоизносные свойства смазочного материала / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, **Е. Г. Мальцева** // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университете. Т.3 – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – С 43 – 45.

15. Ковальский, Б. И. Исследование связи процессов окисления смазочных материалов с их противоизносными свойствами / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов Н. Н. Малышева, А. А. Метелица, **Е. Г. Мальцева** // Труды четвертого международного симпозиума по транспортной триботехнике «транстрибо-2010» г. Санкт-Петербург.

16. Ковальский, Б. И. Технология определения параметров температурной стойкости смазочных масел. / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов Н. Н. Малышева, О. Н. Петров, **Е. Г. Мальцева** // Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010г. – 311-312с.

17. Ковальский, Б. И. Технология определения предельного состояния работавших моторных масел / Б. И. Ковальский, В. И. Верещагин, **Е. Г. Мальцева** // Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010г. – 313с.

18. Ковальский, Б. И. Комплексный метод исследования смазочных материалов / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, **Е. Г. Мальцева** // Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010г. – 310с.

19. Ковальский, Б. И. Метод контроля влияния сталей СТ45 и ШХ15 на процессы термоокисления масла М-10Г_{2К} / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов А. Н. Сокольников, А. А. Метелица, **Е. Г. Мальцева** // Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010г. – 314с.

20. Ковальский, Б. И. Метод контроля качества смазочных масел / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, **Е. Г. Кравцова** // Материалы международной научно- практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012». Т. 5 – Одесса 2012 – С. 67–70.

Подписано в печать «__»_____2013 г.
Печать – ризография. Заказ № _____
Объем __п.л. Тираж 100 экз.

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>