

На правах рукописи

БЕРКО АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ

**МЕТОД КОНТРОЛЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПО ПАРАМЕТРАМ
ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2015

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: **Данилевич Сергей Борисович**
доктор технических наук, профессор, Новосибирский филиал ФГАОУ дополнительного профессионального образования «Академия стандартизации, метрологии и сертификации», профессор кафедры «Системы сбора и обработки данных»

Чухланцева Марина Михайловна
кандидат технических наук, доцент, ФБУ Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний «Томский ЦСМ», директор

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

Защита состоится «24» ноября 2015г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д212.269.09 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 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «09» октября 2015г.

Ученый секретарь совета Д 212.269.09
кандидат технических наук



Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований. Проблема повышения эффективности использования моторных масел относится к одной из сложных научно технических задач трибологии, материаловедения и химмотологии. Как элемент сложной трибосистемы моторные масла являются индикатором режимов и условий эксплуатации двигателя, его технического состояния и поэтому от его качества зависит надежность самого двигателя. Однако ресурс моторных масел в разы уступает трибоэлементам двигателя и устанавливается заводами-изготовителями двигателей в километрах пробега или наработке в моточасах. Такая система замены масел наряду со своей простотой не обеспечивает эффективного их использования, т.к. не учитывает индивидуальных особенностей режимов и условий эксплуатации двигателя, его технического состояния, качества топлива, производительность систем фильтрации и охлаждения, влияние процессов, происходящих в камере сгорания, на процессы старения. Кроме того, отсутствует научное обоснование сроков службы масел различной базовой основы и их выбора для двигателей различной степени нагруженности. Значительные трудности, возникающие при разработке теории определения предельного состояния, связаны с большим количеством факторов, влияющих на качество моторных масел при эксплуатации двигателей. Кроме того, основные процессы окисления, механической и температурной деструкции масел протекают на поверхностях трения в тонких граничных слоях. Поэтому разработка методов и средств контроля состояния моторных масел на стадии их обоснованного выбора для двигателей различной степени нагруженности является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность их применения.

Степень разработанности темы. Термоокислительная стабильность моторных масел является одним из важных эксплуатационных показателей, т.к. определяет температурную область применения и классификацию по группам эксплуатационных свойств. Существуют стандартные методы определения термоокислительной стабильности и множество инженерных методов, однако их применение на эксплуатационных предприятиях ограничено в виду отсутствия средств контроля.

Существенный вклад в изучение процессов окисления смазочных материалов внесли: Л.А. Кондаков, С.Е. Крейн, А.В. Непогодьева, К.К. Папок, А.Б. Виппер, М.А. Григорьев, Н.И. Черножуков, Г.И. Шор и др., однако в их работах не учитываются влияние продуктов окисления на противоизносные свойства масел и процессы, протекающие на поверхностях трения в условиях граничного трения скольжения. На основании анализа исследований в данном направлении в настоящей работе предложен комплексный критерий оценки термоокислительной стабильности, учитывающий количество поглощенной тепловой энергии продуктами окисления и испарения.

Изучением триботехнических свойств смазочных материалов занимались: И.В. Крагельский, О.Б. Айнбиндер, И.А. Буяновский, Р.М. Матвеевский, В.Г. Виноградов, С.В. Венцель, В.П. Лашхи и др. Их работы содержат основы молекулярно-механической теории трения, на основании которой в настоящей работе

предложен электрометрический метод исследования процессов, протекающих на фрикционном контакте, позволивший обосновать интегральный критерий противозносных свойств и разработать физическую модель оценки электрических свойств граничного слоя, разделяющего поверхности трения.

Объект исследования – моторные масла различной базовой основы.

Предмет исследования – процессы окисления и влияние продуктов этих процессов на триботехнические характеристики моторных масел.

Цель диссертационной работы. Разработка методов контроля процессов, протекающих в моторных маслах при окислении и на фрикционном контакте при граничном трении скольжения, обоснование критериев оценки.

Задачи исследования:

1. Разработка метода контроля термоокислительной стабильности и триботехнических характеристик моторных масел различной базовой основы.

2. Разработка метода контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте, и исследование влияния продуктов окисления на триботехнические характеристики моторных масел, обоснование критериев оценки.

3. Проведение сравнительной оценки влияния процессов окисления моторных масел различной базовой основы на показатели термоокислительной стабильности и триботехнические характеристики.

4. Разработка практических рекомендаций по обоснованному выбору моторных масел для квалификационных испытаний.

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

При выполнении работы применялись стандартные и специально разработанные приборы, а при обработке экспериментальных результатов 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 получены с использованием положений трибологии, оптики, теплотехники и физических методов исследования, выводы подтверждены большим объемом проведенных экспериментальных исследований, их воспроизводимостью, сопоставимостью с результатами других авторов, использованием оборудования с достаточной точностью измерения и результатами математической обработки с использованием сертифицированных программ.

На защиту выносятся:

1. Метод контроля термоокислительной стабильности моторных масел различной базовой основы и результаты оценки влияния продуктов окисления на триботехнические характеристики.

2. Результаты исследования термоокислительной стабильности, противозносных свойств моторных масел и критерии их оценки, а так же влияния продуктов окисления на электрические свойства граничных слоев при трении скольжения.

3. Имитационная модель процессов, протекающих на фрикционном контакте, учитывающая их влияние на электропроводность, концентрацию продуктов окисления в граничном слое, разделяющем поверхности трения, и критерии оценки.

4. Практические рекомендации по выбору моторных масел для двигателей различной степени форсирования.

Научная новизна наиболее существенных результатов, полученных автором:

1. Разработан метод контроля термоокислительной стабильности товарных моторных масел, определяемой по оптическим свойствам, вязкости, испаряемости и потенциальному ресурсу при статической температуре испытаний, а также триботехническим характеристикам.

2. Разработан метод контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте, позволяющий оценить влияние продуктов окисления моторных масел различной базовой основы на противоизносные свойства, продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций и обосновать критерий противоизносных свойств.

3. Предложена имитационная модель процессов, протекающих на фрикционном контакте, установлен интегральный критерий смазывающих свойств, позволяющий оценивать влияние продуктов окисления моторных масел различной базовой основы на электропроводность граничного слоя.

4. Предложена оценка триботехнических характеристик окисленных масел по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа, времени формирования фрикционного контакта и критерию смазывающих свойств.

Практическая значимость работы. На базе теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации, включающие технологии: определения термоокислительной стабильности и потенциального ресурса; оценки противоизносных свойств; определения электропроводности граничного смазочного слоя, разделяющего поверхности трения, а также рекомендации по выбору моторных масел для двигателей различной степени форсирования.

Реализация результатов работы. Результаты исследований использованы в учебном процессе института нефти и газа Сибирского федерального университета и на предприятиях г. Красноярска: ООО «Строительно-монтажная компания», ООО «Сибавтотранс».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международной научно-технической конференции Интерстроймех-2009 (Бишкек, 2009) и научно-технических семинарах кафедры «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы» института нефти и газа Сибирского федерального университета (Красноярск, 2010-2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 6 работ в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, получено 4 патента РФ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 123 страницы машинописного текста, включая 59 рисунков и 18 таблиц. Работа состоит из вве-

дения, 4 глав, основных выводов, библиографического списка из 109 наименований и двух приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ требований, предъявляемых к моторным маслам, их классификация, рассмотрены факторы, влияющие на ресурс и современные методы контроля термоокислительной стабильности, а также основы теории процессов окисления, обоснована необходимость разработки метода контроля товарных масел с целью предварительного выбора для двигателей, работающих при различных температурных условиях и нагрузках.

Моторные масла являются важным элементом конструкции двигателей внутреннего сгорания. Они могут обеспечить надежную работу двигателей только при соответствии его свойств тем термическим, механическим и химическим воздействия, которым они подвергаются в масляной системе и на поверхностях трения. Выбор масел только по классификационным показателям, к которым относятся класс вязкости и группа эксплуатационных свойств, недостаточен, а справочные данные по характеристикам масел отражают требования к их производству и являются контролирующими показателями. Однако, по этим показателям не ясно, как будут вести себя моторные масла при термостатировании, и как влияют продукты окисления на противоизносные свойства масел и процессы, протекающие на фрикционном контакте, так как они определяют надежность трибосопряжений. Поэтому разработка метода контроля качества товарных масел, позволяющего оценивать их по дополнительным показателям, характеризующим их в условиях эксплуатации, является актуальной задачей, решение которой направлено на обоснованный их выбор для проведения квалификационных испытаний или применения в двигателях различной степени форсирования.

Вторая глава посвящена разработке методики контроля товарных моторных масел различной базовой основы по показателям термоокислительной стабильности и триботехническим характеристикам окисленных масел, обоснованию выбора масел для исследования и средств измерения и испытания, с краткой технической характеристикой, технологиям проведения контроля и обработки экспериментальных данных.

Методика контроля товарных моторных масел предусматривала применение следующих средств измерения: фотометрического устройства, малообъемного вискозиметра, электронных весов и оптического микроскопа «Альтами МЕТ 1М» и средств испытания: прибора для термостатирования масел, трехшариковой машины трения.

Термоокислительная стабильность моторных масел различной базовой основы определялась при температуре 180°C с перемешиванием пробы постоянной массы (100±0,1г) в стеклянном стакане стеклянной мешалкой с частотой вращения 300об/мин. После каждых 8-ми часов термостатирования стакан с окислен-

ным маслом взвешивался, определялась масса испарившегося масла, отбирались пробы для измерения вязкости и определения коэффициента поглощения светового потока K_{Π} при прямом фотометрировании. Температура термостатирования поддерживалась автоматически с помощью терморегулятора ТРМ-200. Испытания продолжались до достижения коэффициента K_{Π} значений равных (0,75-0,8) ед. Противоизносные свойства окисленных масел определялись на трехшариковой машине трения. Параметры трения составляли: нагрузка 13Н; скорость скольжения 0,68м/с; температура масла в объеме 80°С; время испытания – 2 часа. Для исследования процессов, протекающих на фрикционном контакте, через один из шаров пропускался постоянный ток (100мкА) от внешнего стабилизированного источника напряжением 3В, устанавливаемого при статическом положении шара и цилиндра. Величина тока, протекающего через зону трения, с помощью преобразователя RS-485 записывалась на жесткий диск компьютера. Обработка экспериментальных данных производилась с использованием сертифицированной программы «Advanced Grapher».

Термоокислительная стабильность определялась по изменению оптических свойств окисленных масел, кинематической вязкости, испаряемости и потенциальному ресурсу, а противоизносные свойства по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трех шарах из двух параллельных опытов, продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформаций и электропроводности граничного слоя, разделяющего поверхности трения. По полученным данным строились графические зависимости, по которым производился поиск критериев термоокислительной стабильности и противоизносных свойств, используемых для сравнения масел различной базовой основы.

Схема контроля товарных масел представлена на рисунке 1.

В третьей главе приведены результаты исследования товарных моторных масел различной базовой основы на термоокислительную стабильность при температуре термостатирования 180°С, оценено влияние продуктов окисления различной концентрации на противоизносные свойства и электропроводность граничного слоя при трении скольжения, определены критерии противоизносных и смазывающих свойств.

Процессы окисления моторных масел различной базовой основы оценивались коэффициентом поглощения светового потока K_{Π} при температуре 180°С. Установлено, что при окислении образуется два вида продуктов различной оптической плотности (рисунок 2), а зависимости коэффициента K_{Π} от времени окисления описываются кусочно-линейными уравнениями

$$K_{\Pi} = a(t - t_{\text{H}}), \quad (1)$$

где a – коэффициент, характеризующий среднюю скорость образования первичных или вторичных продуктов окисления, ч⁻¹; t – время окисления, ч; t_{H} – время начала процесса окисления или начала образования вторичных продуктов, ч.

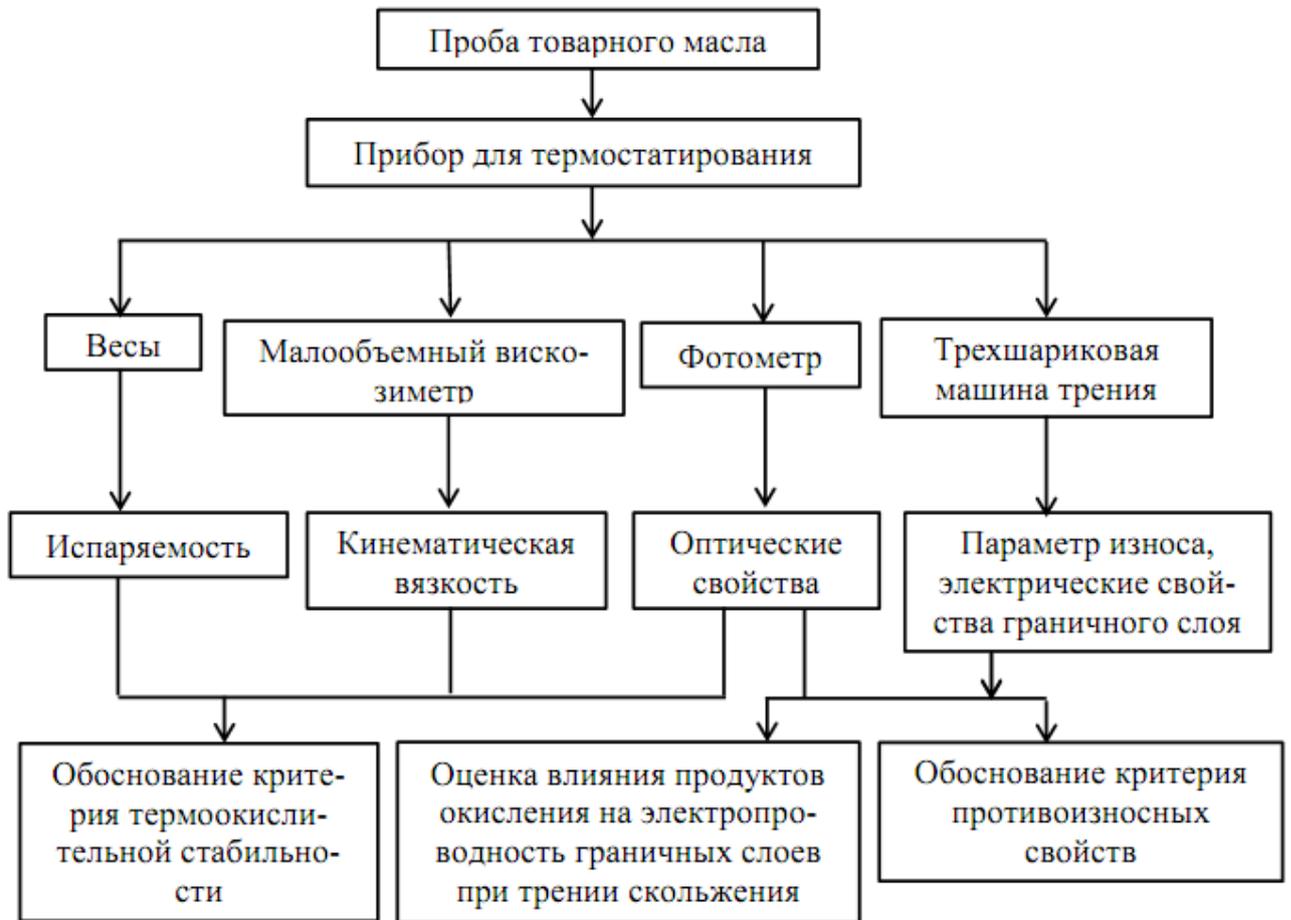


Рисунок 1 – Схема технологий контроля термоокислительной стабильности и триботехнических характеристик моторных масел.

Наличие двух видов продуктов окисления вызывает изгиб зависимостей коэффициента K_{II} от времени окисления, поэтому масла различной базовой основы могут сравниваться по средним скоростям окисления и началу образования первичных и вторичных продуктов окисления, что важно при их выборе для техники различной степени нагруженности. Выбор более термостойких масел предложено оценивать по потенциальному ресурсу, определяемому по времени достижения коэффициента K_{II} установленного значения.

Испаряемость G моторных масел при термостатировании независимо от базовой основы описывается полиномом второго порядка

$$G = -at^2 + bt + c, \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты, характеризующие соответственно ускорения процесса испарения и его среднюю скорость, $г/ч^2$; $г/ч$; c – коэффициент, характеризующий концентрацию легких фракций и воды в товарном масле, $г$.

Данный параметр также применяется для сравнения и оценки влияния базовой основы на испаряемость моторных масел.

Сравнением зависимостей коэффициента K_{II} и испаряемости G от времени окисления установлено, что скорость испарения замедляется в период образова-

ния вторичных продуктов окисления ($K_{\Pi} > 0,3 \text{ ед}$).

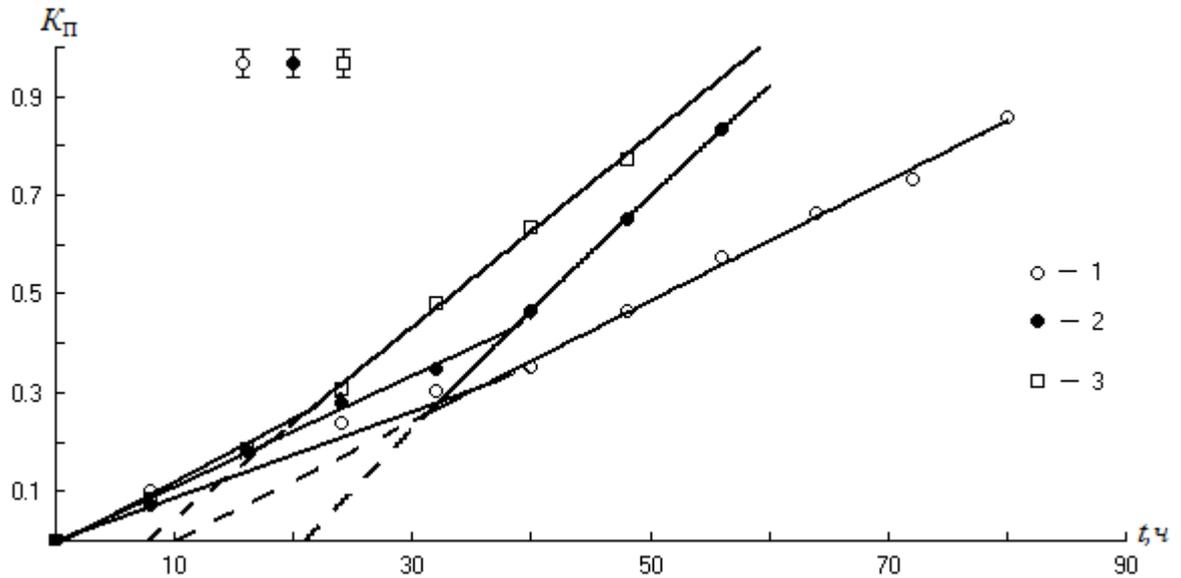


Рисунок 2 - Зависимости коэффициента поглощения светового потока (K_{Π}) от времени испытания (t) моторных масел: 1-минеральное М-8Г₂, 2- частично синтетическое Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 3- синтетическое Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF.

На основании проведенных исследований установлено, что термоокислительная стабильность товарных масел $E_{\text{ТОС}}$ должна определяться суммой коэффициентов поглощения светового потока K_{Π} и испарения K_G .

$$E_{\text{ТОС}} = K_{\Pi} + K_G, \quad (3)$$

$$K_G = m / M, \quad (4)$$

где m и M – соответственно масса испарившегося масла и оставшаяся после окисления за данный промежуток времени испытания, г.

Физический смысл коэффициента $E_{\text{ТОС}}$ заключается в том, что он характеризует количество избыточной тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения, поэтому, чем меньше значение этого показателя, тем выше термоокислительная стабильность данного смазочного масла при заданной температуре и времени испытания.

Зависимости коэффициента $E_{\text{ТОС}}$ от времени окисления описываются кусочно-линейными уравнениями (см. формулу 1).

Результаты оценки влияния базовой основы моторных масел на процессы окисления сведены в таблицу 1, согласно которым из числа минеральных масел наиболее термостойкими являются дизельные масла М-8Г₂ и М-10Г₂к, из числа частично синтетических Ravenol TSI 10W-40 SM/CF, а из числа синтетических - Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

На основании полученных экспериментальных данных (таблица 1) осуществляется контроль над соответствием классификации масел производителями.

Оценка влияния базовой основы на противоизносные свойства окисленных моторных масел проводились на трехшариковой машине трения со схемой «шар-цилиндр».

Таблица 1 – Сравнительные данные по показателям процессов окисления моторных масел различной базовой основы.

Марка моторного масла	Потенциальный ресурс,		Испаряемость после 40 часов испытания, г	Коэффициент вязкости после 40 часов испытания, ч ⁻¹	Скорость образования вторичных продуктов окисления, ч	Скорость образования вторичных продуктов окисления, ч ⁻¹		
	по КД час	по ЕТОС						
Минеральные	М-8Г ₂	75	66,9	6,3	1,1	0,009	10,0	0,012
	М-10Г ₂ к	67,1	61,3	4,2	1,44	0,01	10,0	0,04
	Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC	57,5	48,1	9,6	0,91	0,01	17,5	0,02
Частично синтетические	Utech navigator 15W-40 SG/CD	44,5	36,3	9,6	0,85	0,016	4,5	0,02
	Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	54,3	49,4	8,9	1,0	0,01	19,5	0,023
	Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	33,3	33,8	8,9	0,92	0,016	7,3	0,03
Синтетические	ТНК Супер 5W-40 SL/CF	53,5	46,3	9,3	0,62	0,012	13,0	0,02
	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	73	70	4,7	1,16	0,009	11,89	0,013
	Agip Tec sint 5W-30 SJ/CF	48,9	43,4	9,5	1,05	0,013	7,65	0,02
Синтетические	Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	50,5	44,9	8,5	0,95	0,01	3,1	0,017
	Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	53,4	51,3	5,2	0,93	0,003	23,9	0,03

При изнашивании величина тока изменялась в зависимости от вида деформации (пластической, упругопластической или упругой) и механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте. Величина тока посредством преобразователя RS-485 записывалась на компьютере в виде диаграммы, используемой для определения времени формирования контакта и электропроводности граничного слоя, разделяющего поверхности трения.

Противоизносные свойства окисленных масел оценивались как среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах из двух опытов, измеренное с помощью оптического микроскопа «Альтами МЕТ 1М». Анализ зависимостей диаметра пятна износа от коэффициента K_{Π} показал, что для большинства масел, независимо от базовой основы, противоизносные свойства понижаются в начальный период окисления, когда происходит процесс образования первичных продуктов окисления, а при появлении вторичных - повышаются.

Противоизносные свойства предложено оценивать эмпирическим критерием Π , определяемым отношением:

$$\Pi = K_{\Pi}/И, \quad (5)$$

где K_{Π} - коэффициент поглощения светового потока; $И$ – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа, мм.

Зависимость данного критерия от коэффициента K_{Π} (рисунок 3) описывается линейным уравнением

$$\Pi = a_n K_{\Pi}, \quad (6)$$

где a_n – коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия противоизносных свойств, мм^{-1} .

Данный критерий характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади контакта.

Поэтому, чем больше значение критерия Π , тем выше противоизносные свойства испытуемого масла, а это позволяет сравнивать различные масла.

Результаты влияния базовой основы на изменение скорости критерия Π от концентрации продуктов окисления представлены в таблице 2, из которых видно, что наивысшими противоизносными свойствами характеризуются частично синтетические масла Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF и Ravenol TSI 10W-40 SM/CF, а более низкими минеральное Utech navigator 15W-40 SG/CD, частично синтетическое Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF и синтетическое Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF.

Результаты влияния продуктов окисления на противоизносные свойства моторных масел исследовано при значениях коэффициента поглощения светового потока равного 0,2 и 0,7ед., что соответствует, в первом случае, наличию в окисленном масле первичных продуктов, а во втором – вторичных.

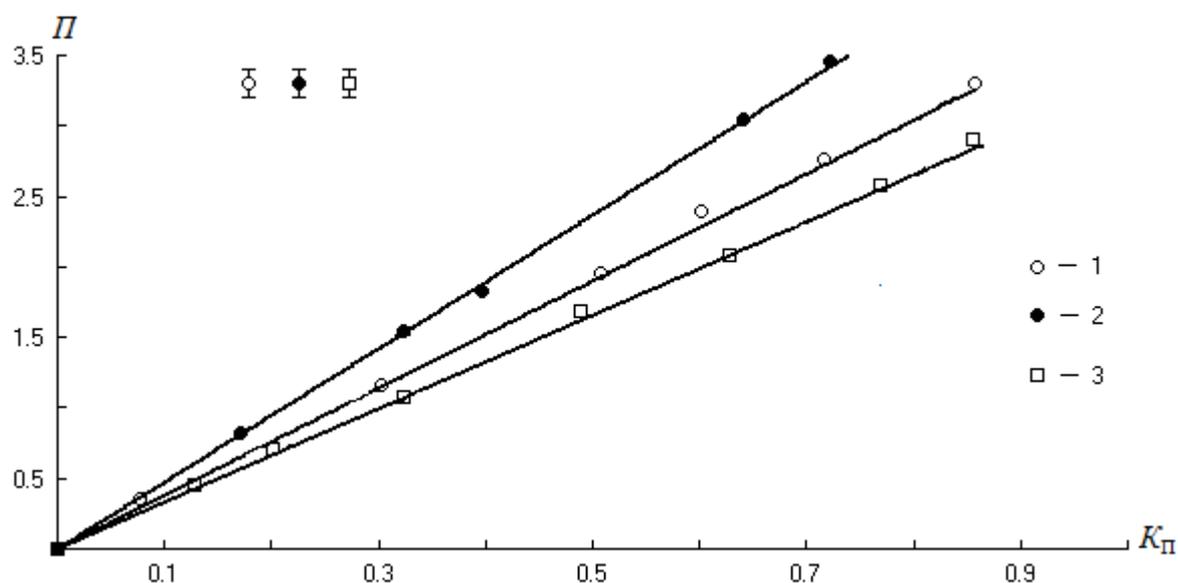


Рисунок 3 - Зависимости критерия противоизносных свойств (Π) от коэффициента поглощения светового (K_{Π}) потока моторных масел: 1-минеральное М-8Г₂, 2- частично синтетическое Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 3- синтетическое Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF.

Таблица 2 – Результаты влияния базовой основы на скорость изменения критерия противоизносных свойств.

Марка моторного масла		Скорость изменения критерия противоизносных свойств, мм ⁻¹
Минеральные	М-8Г ₂	3,79
	М-10Г ₂ к	3,87
	Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC	3,86
	Utech navigator 15W-40 SG/CD	2,54
Частично синтетические	Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	4,73
	Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	2,79
	ТНК Супер 5W-40 SL/CF	3,27
	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	4,56
Синтетические	Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF	3,31
	Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	2,61
	Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	3,23

Результаты исследования представлены в таблице 3, из которой следует, что для всех исследованных масел, кроме М-10Г₂к и Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, первичные продукты окисления понижают противоизносные свойства, по сравнению с товарными маслами, а вторичные продукты их повышают для всех частично синтетических масел и синтетического масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF по сравнению с первичными продуктами.

Таблица 3 – Результаты исследования влияния продуктов окисления на противоизносные свойства моторных масел.

Марка моторного масла		Противоизносные свойства товарных масел, мм	Влияние продуктов окисления на износ, мм	
			первичные	вторичные
Минеральные	М-8Г ₂	0,293	0,33	0,34
	М-10Г ₂ к	0,253	0,198	0,23
	Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC	0,28	0,28	0,295
	Utech navigator 15W-40 SG/CD	0,287	0,307	0,41
Частично синтетические	Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	0,273	0,318	0,291
	Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	0,293	0,355	0,346
	ТНК Супер 5W-40 SL/CF	0,28	0,355	0,309
	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	0,26	0,291	0,227
Синтетические	Agip Tec sint 5W-30 SJ/CF	0,253	0,362	0,346
	Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	0,287	0,346	0,393
	Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	0,275	0,285	0,462

На рисунке 4 представлены диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании минеральных моторных масел.

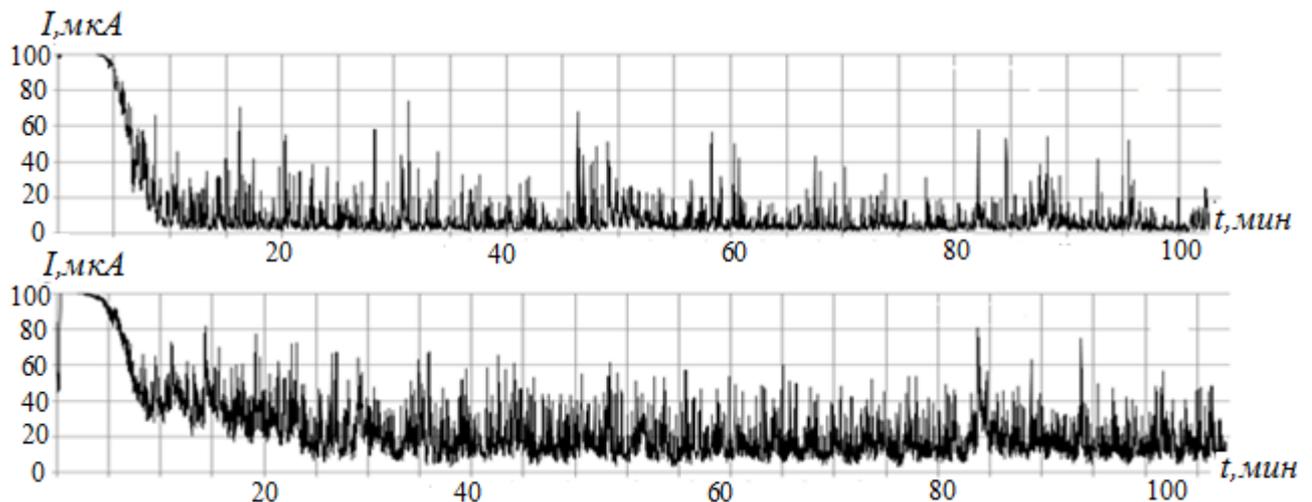


Рисунок 4 – Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании минеральных моторных масел.

Из диаграмм видны три характерных участка: 1-й участок, где ток равен заданному (100мкА), характеризует продолжительность пластической деформации; 2-й участок, где ток уменьшается до определенной величины, характеризует продолжительность упругопластической деформации, а 3-й участок - продолжительность упругой деформации, где ток принимает минимальное значение.

Значения минимального тока при установившемся изнашивании для каждого масла при разной степени окисления имеют свою величину, которая характеризует электрическое сопротивление фрикционного контакта и зависит от электропроводности граничных слоев, которые способны снижать износ при

увеличении сопротивления этих слоев. При большом сопротивлении граничного слоя, а это возможно когда на поверхностях трения образуются модифицированные слои, как результат химической реакции металлических поверхностей с органическими кислотами, образующимися при окислении масел, и изменяющие электропроводность этих слоев. Если сопротивление граничного слоя обозначить через символ R , то величина тока I , протекающего через этот слой, определяется по формуле

$$I = U_{ГС}/R, \quad (7)$$

где $U_{ГС}$ – падение напряжения на граничном слое, В.

Так как концентрация продуктов окисления в граничном слое смазочного масла, разделяющего поверхности трения, определяется отношением

$$K_{П}/I = П, \quad (8)$$

то она определяет сопротивление граничного слоя, т.е. $П$ – эквивалентно R , тогда падение напряжения на граничном слое вычисляется по формуле

$$U_{ГС} = П \cdot I = \frac{K_{П}}{I} \cdot I = K_{СС}. \quad (9)$$

В этом случае падение напряжения на граничном слое будет характеризовать смазывающие свойства окисленных масел и принято за критерий, обозначенный символом $K_{СС}$. Если изменение тока оценивать коэффициентом электропроводности $K_{Э}$, определяемого отношением тока, протекающего через фрикционный контакт к заданному (100мкА), то формула 9 примет вид:

$$K_{СС} = \frac{K_{П}}{I} \cdot K_{Э}. \quad (10)$$

Данный критерий характеризует концентрацию продуктов окисления в граничном слое и их электропроводность и является интегральным показателем. Зависимости критерия смазывающих свойств частично синтетических моторных масел от коэффициента $K_{П}$ представлены на рисунке 5.

Данные зависимости для моторных масел различной базовой основы имеют два участка, различающиеся характером изменения критерия. Первый участок зависимостей характеризуется увеличением критерия $K_{СС}$ для всех исследованных масел, но интенсивность его изменения различна. Так, чем больше значение критерия $K_{СС}$, тем больше электрическое сопротивление граничного слоя, разделяющего поверхности трения. Поэтому лучшими смазывающими свойствами характеризуются масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF (кривая 4) и ТНК Супер 5W-40 SL/CF (кривая 3).

На втором участке зависимости критерия $K_{СС}$ от коэффициента $K_{П}$, когда в маслах образуются вторичные продукты окисления и кислотность масла увели-

чивается, на поверхностях трения образуются защитные пленки, как результат химического взаимодействия органических кислот с металлической поверхностью. Эти пленки при изнашивании разрушаются и вновь формируются, поэтому электрические свойства граничного слоя периодически изменяются, вызывая колебания критерия K_{CC} для большинства масел независимо от базовой основы.

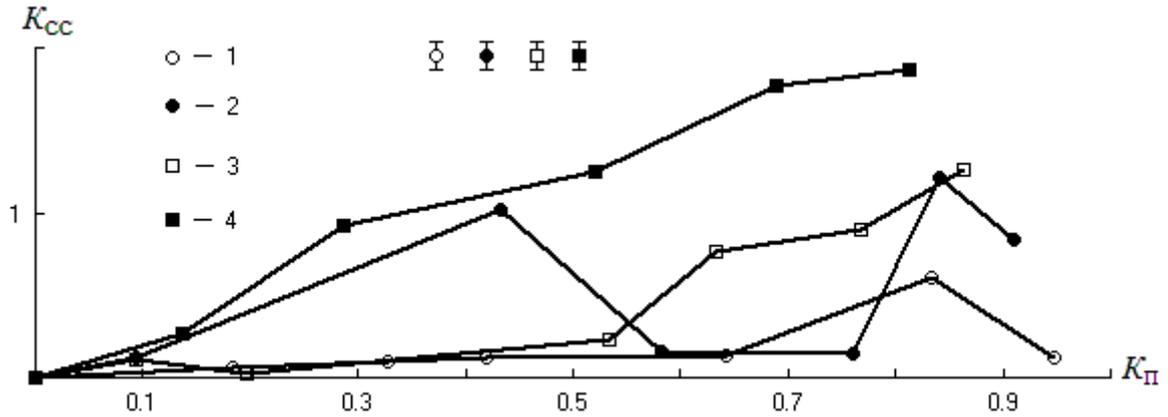


Рисунок 5 – Зависимости критерия смазывающих свойств от коэффициента поглощения светового потока частично синтетических моторных масел: 1- Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2 - Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3- ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4 - Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Результаты оценки смазывающих свойств моторных масел различной базовой основы представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики смазывающих свойств моторных масел различной базовой основы.

Марка моторного масла		Критерий смазывающих свойств		Значение коэффициента K_{II} в начале образования вторичных продуктов окисления, ед
		Первичные продукты при $K_{II}=0,3$ ед	Вторичные продукты при $K_{II}=0,8$ ед	
Минеральные	М-8Г ₂	0,67	2,0	0,51
	М-10Г ₂ к	0,33	0,94	0,54
	Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC	0,56	2,5	0,6
	Utech navigator 15W-40 SG/CD	0,06	0,33	0,63
Частично синтетические	Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	0,22	0,61	0,64
	Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	0,78	0,78	0,44
	ТНК Супер 5W-40 SL/CF	0,11	1,22	0,54
	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	1,17	2,28	-
Синтетические	Agip Tec sint 5W-30 SJ/CF	0,05	1,28	0,65
	Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	0,28	0,44	0,22
	Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	1,22	2,28	0,32

Приведенные данные в таблице 4 определялись по зависимостям критерия смазывающих свойств от коэффициента K_{Π} для всех исследованных масел в областях образования первичных продуктов окисления ($K_{\Pi} = 0,3\text{ед}$) и вторичных продуктов ($K_{\Pi} = 0,8\text{ед}$), а также в начале образования вторичных продуктов окисления.

Лучшими смазывающими свойствами в начале процесса окисления масел характеризуются: частично синтетическое Ravenol TSI 10W-40 SM/CF и синтетическое Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF. Среди минеральных масел лучшими смазывающими свойствами обладает дизельное масло М-8Г₂.

При концентрации вторичных продуктов окисления ($K_{\Pi} = 0,8\text{ед}$) лучшие смазывающие свойства установлены для масел: минеральных М-8Г₂ и Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC; частично синтетических ТНК Супер 5W-40 SL/CF и Ravenol TSI 10W-40 SM/CF и синтетических Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF. Поэтому для оценки влияния базовой основы моторных масел на смазывающую способность окисленных масел предлагается их сравнивать по величине критерия K_{CC} в областях образования первичных и вторичных продуктов окисления при постоянных значениях коэффициента K_{Π} и по значениям коэффициента K_{Π} , при котором начинается второй участок зависимости критерия K_{CC} от коэффициента K_{Π} .

Время формирования номинальной площади фрикционного контакта зависит от базовой основы и изменяется в пределах для минеральных масел от 12,7 до 41,4 мин, частично синтетических от 5,7 до 114 мин и синтетических от 10 до 109 мин.

Кроме того, характерной особенностью зависимостей времени формирования номинальной площади фрикционного контакта $t_{\text{ФК}}$ от коэффициента K_{Π} является то, что независимо от базовой основы моторных масел в начале процесса окисления время $t_{\text{ФК}}$ увеличивается по отношению к товарному маслу. Это установлено для большинства масел, т.е. первичные продукты окисления увеличивают время $t_{\text{ФК}}$. Зависимости времени формирования площади фрикционного контакта частично синтетических моторных масел от коэффициента K_{Π} представлены на рисунке 6.

Вторичные продукты окисления вызывают колебания времени $t_{\text{ФК}}$, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения независимо от базовой основы.

На основании проведенных исследований по определению влияния базовой основы моторных масел и продуктов окисления на их противоизносные свойства предложены критерий противоизносных свойств, время формирования номинальной площади фрикционного контакта и критерий смазывающих свойств, позволяющие получить объективную информацию для эффективного использования и выбора моторных масел.

В четвертой главе диссертационной работы представлены практические рекомендации по контролю эксплуатационных свойств моторных масел, включающие технологии определения: термоокислительной стабильности; концентрации легких фракций и воды в товарном масле; температурной области работоспособности смазочных масел, а также рекомендации по определению противоизносных свойств окисленных масел, идентификации и классификации.

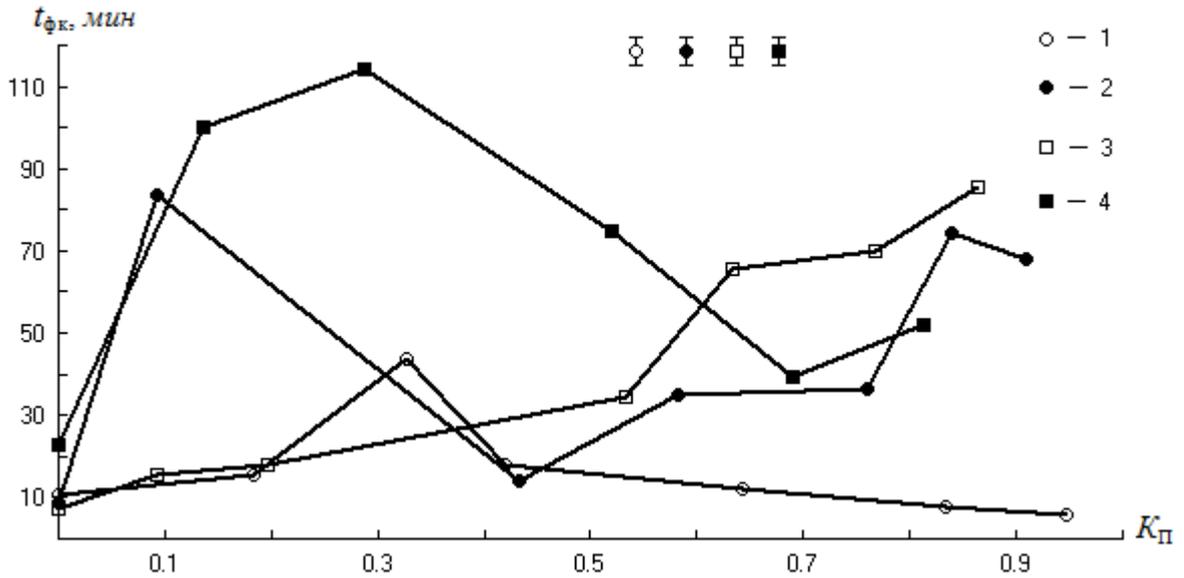


Рисунок 6 - Зависимости времени формирования фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при окислении частично синтетических моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Основные научные результаты и выводы

1. Разработан метод контроля состояния моторных масел различной базовой основы, включающий термостатирование, определение оптических свойств, кинематической вязкости, испаряемости, противоизносных свойств и интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте, позволивший установить механизм окисления и влияние продуктов этого процесса на изнашивание.

2. Установлен механизм окисления моторных масел независимо от базовой основы, заключающийся в последовательном образовании первичных продуктов окисления, которые доокисляясь, переходят во вторичные с большей оптической плотностью, вызывая изгиб зависимостей коэффициента поглощения светового потока или критерия термоокислительной стабильности от времени окисления, описываемых кусочно-линейными функциями.

3. Предложен электрометрический метод контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте, осуществляемый путем пропускания постоянного тока величиной 100мкА от внешнего стабилизированного источника напряжения, что позволило определить электропроводность контакта, продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций, установить влияние первичных и вторичных продуктов окисления на изнашивание.

4. Предложена физическая модель процессов, протекающих на фрикционном контакте, и установлен критерий смазывающих свойств окисленных масел, учитывающие электрическое сопротивление граничного слоя, разделяющего поверхности трения, и величину тока, протекающего через него, позволяющие сравнивать моторные масла различного назначения и базовой основы.

5. Разработаны практические рекомендации, включающие технологии определения: термоокислительной стабильности смазывающих масел, концентрации воды и легких фракций в товарном масле, температурной области работоспособности, рекомендации по определению противоизносных свойств окисленных масел и интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте и рекомендации по идентификации и классификации моторных масел, обеспечивающие получение дополнительной информации, позволяющей повысить эффективность использования смазочных масел, осуществлять обоснованный их выбор и совершенствовать систему классификации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:

а) статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Ковальский Б.И. Результаты испытания минерального моторного масла на температурную стойкость / Б.И. Ковальский, С.Б. Ковальский, А.В. Берко, Н.Н. Малышева // Известия Томского политехнического университета. - 2010. - Т.316. - №2.С.46- 50.
2. Ковальский Б.И. Процессы самоорганизации в частично синтетических моторных маслах при их окислении / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, А.В. Берко// Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – Вып. 3. – С. 66–69.
3. Рунда М.М. Процессы самоорганизации в минеральных моторных маслах при их окислении/М.М. Рунда, А.В. Берко, Б.И. Ковальский // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – Вып. 2. – С. 67–71.
4. Ковальский Б.И. Методика идентификации смазочных масел / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, А.В. Берко, А.В. Юдин // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2013. - №8. – С. 26–27.
5. Верещагин В.И. Влияние процессов старения моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CF на его противоизносные свойства / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, В.Г. Шрам, А.В. Берко // Вестник Кузбасского гос. техн. ун – та. – 2013 - №5(99). С. 91–97.
6. Ковальский Б.И. Исследование влияния продуктов температурной деструкции на процессы окисления минерального моторного масла / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Д.В. Агровиченко, А.В. Берко, В.Г. Шрам // Известия Тульского ГУ. – 2014. - Вып.11/2. - С. 230-237.

б) патенты РФ

7. Пат. №2406087 РФ, МПК G 01N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева, С.Б. Ковальский, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». опубли. 10.12.2010. Бюл. №34.

8. Пат. №2408866 РФ, МПК G 01N 33/56. Способ определения смазочной способности масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». –опубл. 10.01.2011. Бюл. №1.

9. Пат. №2419791 РФ, МПК G 01N 33/30;3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Б.И. Ковальский, О.Н. Петров, А.В. Кузьменко, С.Б. Ковальский, А.С. Ромащенко, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». - опубл. 27.05.2011. Бюл. №15.

10. Пат. №2454653 РФ, МПК G 01N 3/56. Способ определения противоизносных свойств масел / Б.И. Ковальский А.В. Юдин, М.М. Рунда, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». –опубл. 27.06.2012. Бюл. №1.

в) другие издания

11. Влияние степени окисления моторных масел на их противоизносные свойства /Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Ананьин, В.И. Верещагин, А.В.Берко // Интерстроймех-2009: Сб. материалов международной научно-технической конференции / Кырг. гос. ун-т строит-ва, трансп. и архит. – Бишкек: 2009.- С.338-343.

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

13. Берко А.В. Влияние термоокислительных процессов на противоизносные свойства моторного масла МТ-16П / А.В. Берко, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда //Сб. рефератов депонированных рукописей.–ЦВНИ МО РФ.–2011.–№96.–С.25.

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