

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

БЕРКО АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Ковальский Б.И.

Томск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МОТОРНЫМ МАСЛАМ.....	11
1.1 Базовое масло как основа функциональных показателей моторных масел.....	11
1.2 Требования к моторным маслам.....	14
1.3 Классификация моторных масел в Российской Федерации и зарубежом..	17
1.4 Факторы, влияющие на ресурс моторных масел.....	22
1.5 Современные методы контроля термоокислительной стабильности моторных масел.....	26
1.6 Основы теорий процессов окисления моторных масел.....	36
1.7 Выводы по первой главе.....	40
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ.....	41
2.1 Моторное масло - как объект исследования	41
2.2 Выбор моторных масел для исследования.....	43
2.3 Средства измерения.....	46
2.3.1 Фотометрическое устройство.....	47
2.3.2 Малообъемный вискозиметр.....	48
2.3.3 Вспомогательные средства измерения.....	50
2.4 Средства испытания.....	50
2.4.1 Прибор для определения термоокислительной стабильности.....	50
2.4.2 Трёхшариковая машина трения.....	52
2.5 Методика контроля моторных масел на термоокислительную стабильность.....	54
2.6 Методика контроля противоизносных свойств термоокисленных масел..	55
2.7 Методика обработки результатов исследования.....	56

2.8 Выводы по второй главе.....	58
3 РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ.....	60
3.1 Результаты исследования минеральных моторных масел.....	60
3.2 Результаты исследования частично синтетических моторных масел.....	78
3.3 Результаты исследования синтетических моторных масел.....	94
3.4 Оценка влияния базовой основы на процессы окисления моторных масел.....	109
3.5 Оценка влияния продуктов окисления моторных масел различных базовых основ на противоизносные свойства.....	113
3.6 Выводы по третьей главе.....	120
4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО КОНТРОЛЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ.....	124
4.1 Технология определения термоокислительной стабильности смазочных масел.....	124
4.2 Технология определения концентрации воды и легких фракций в товарном масле.....	127
4.3 Технология определения температурной области работоспособности смазочных масел.....	128
4.4 Рекомендации по определению противоизносных свойств окисленных масел и процессов, протекающих на фрикционном контакте.....	133
4.5 Рекомендации по идентификации и классификации моторных масел...	136
4.6 Выводы по четвертой главе.....	138
ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	139
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акты внедрения.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Диаграммы записей тока.....	154

ВВЕДЕНИЕ

Надежность современных машин, механизмов и технологического оборудования определяется процессами, протекающими в трибологических системах, которые можно представить как «материалы пары трения – смазочный материал» (МПТ-СМ). Данные системы могут характеризоваться коэффициентом трения, прирабатываемостью, износостойкостью, приспособляемостью и самоорганизацией. Поэтому разработка средств и методов контроля состояния системы и процессов, происходящих в ней, является актуальной задачей, решение которой позволит создать теоретические и практические разработки, направленные на повышение надежности механических систем.

В настоящее время повышение надежности механических систем решается путем выбора износостойких конструкционных материалов и подбор к ним смазочных масел. Если вопросы применения износостойких материалов изучались более интенсивно и в этой области достигнуты значительные успехи при проектировании техники, то выбор смазочного материала для различных машин и механизмов, работающих в большом интервале температур, нагрузок и скоростей, относятся к более сложным задачам. Это вызвано тем, что часто в одном механизме применяется одно масло, а узлы трения выполнены из конструкционных материалов с широким диапазоном механических свойств. Кроме того, на рынке существует большое количество масел, применение которых для разных механизмов практически не обосновано. Ресурс работы масел на минеральной, синтетической и смешанной основах принят постоянным и регламентируется заводами – изготовителями по наработке часов или километрам пробега для автотранспорта. Эти параметры не учитывают режимы и условия эксплуатации, техническое состояние узлов трения, состояние системы фильтрации масла и его свойства.

Процессы, происходящие в трибосистемах, в значительной мере зависят от свойств смазочного материала, которые задаются с помощью их легирования функциональными присадками или их комплектом. Однако при эксплуатации

техники, свойства смазочного материала (вязкостные, окислительные, фрикционные, диспергирующие и др.) изменяются вследствие протекания окислительных процессов, температурной и механической деструкций, химических реакций материалов деталей машин с продуктами, образующимися при старении масел.

Процессы, происходящие в системе «МППТ-СМ», в большей мере зависят от степени окисления смазочного материала, а если учесть, что они более интенсивно протекают на поверхностях трения, за счет более высоких температур и каталитического влияния материалов пар трения, то становится понятным, насколько весома связь и взаимовлияние элементов этой системы на ее надежность.

Окислительные процессы, протекающие в смазочном масле, оцениваются по кислотному числу и для некоторых сортов масел стандартизированы. Однако анализ патентной и научно-технической литературы показал, что существует большое разнообразие инженерных методов и устройств для оценки термоокислительной стабильности. В качестве показателей предлагаются: величина изменения вязкости, период осадкообразования, склонность к лако- и нагарообразованию, электропроводность, количество отложений на деталях, содержание растворимого кислорода в масле, удельная мощность диэлектрических потерь в присутствии и отсутствии катализатора, коэффициент поглощения светового потока, оптическая плотность, концентрация нерастворимых продуктов загрязнения, массовые доли рабочей фракции и лака, испаряемость, коррозионные свойства и др. Большинство перечисленных показателей не нашло практического применения в виду отсутствия промышленных стандартизированных средств контроля, а часть показателей требует использования дорогостоящего оборудования и применяется только в лабораторных условиях. Однако необходимо отметить, что термоокислительная стабильность и основные индивидуальные свойства масел недостаточно изучены в области их влияния на противоизносные свойства. В этой связи практическое и научное значение представляют исследования: механизма окисления масел и влияние его на ресурс; изменение противоизносных свойств в зависимости от продолжительности применения масел; процессов, протекающих на фрикционном контакте при изменении свойств масел; механизма формирования ад-

сорбционных, хемосорбционных и модифицированных слоев при трении.

При проектировании новых машин и агрегатов вопросы выбора смазочных масел являются проблематичными, т.к. существующая классификация по группам эксплуатационных свойств не дает полной информации о поведении их при номинальных режимах эксплуатации, кроме того, отсутствуют критерии оценки ресурса, данные по противоизносным, противозадирным и антикоррозионным свойствам, которые в основном определяют долговечность узлов трения. Поэтому поиск новых методов контроля состояния товарных и работающих масел является актуальной задачей.

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. Непогодьеv, 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. Матвееvский, 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 противоизносных 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, противоизносных 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 формиро-

вания 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.

Автор выражает благодарность за помощь и поддержку научному руководителю, д-ру техн. наук, профессору Б.И. Ковальскому, д-ру техн. наук, профессору, зав. кафедрой «Топливообеспечение и ГСМ» Ю.Н. Безбородову и сотрудникам кафедры.

1 КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МОТОРНЫМ МАСЛАМ

1.1 Базовое масло как основа функциональных показателей моторных масел

Все современные моторные масла состоят из базовых масел и присадок, улучшающих их эксплуатационные показатели. Промышленностью выпускаются моторные масла на синтетической и нефтяной основах и их смеси. Наибольшее распространение получили масла на нефтяной основе. Недостатками минеральных масел на нефтяной основе являются плохие низкотемпературные характеристики, низкая окислительная стабильность. У синтетических масел данные показатели значительно лучше. Преимуществом минеральных масел перед синтетическими являются хорошая растворяющая способность по отношению к присадкам и совместимость с материалами уплотнений.

Получение необходимых эксплуатационных свойств масел обеспечивается введением композиций присадок – антиокислительных, противоизносных, антикоррозионных, диспергирующих, депрессорных и др.

В процессе эксплуатации моторные масла выполняют следующие основные функции:

- обеспечение минимального износа и чистоты узлов трения в широком интервале температур;
- предотвращение коррозии деталей в процессе эксплуатации;
- отвод тепла от трущихся поверхностей и удаление продуктов износа из зоны трения в систему фильтрации.

Базовые масла классифицируют по физико-химическим свойствам, сырьевой природе масла (масла парафинового и нефтяного основания) и способу производства (дистиллятные, остаточные, компаундированные). Дистиллятные масла вырабатываются из вакуумных дистиллятов, остаточные - из остатков перегонки нефти – гудронов, компаундированные являются смесью дистиллятных и

остаточных базовых масел.

Синтетические базовые масла изготавливаются в основном из полиальфаолефинов (ПАО), эстеров (сложных эфиров), эфиров фосфорной кислоты и полиорганосилоксанов, либо их смеси.

Сырьем для изготовления полиальфаолефинов служат нефтяные газы – бутен и этилен. Масла на их основе имеют высокую термическую стабильность и низкую температуру застывания, совместимость с нефтяными маслами и хорошую приемственность к присадкам, применяемым при производстве нефтяных масел.

Эстеры представляют собой сложные эфиры – продукты нейтрализации карбоновых кислот спиртами и обладают рядом преимуществ перед всеми другими известными основами:

- молекулы эстеров полярны, что обеспечивает «прилипание» молекулы к металлу;

- вязкость эстеров можно программировать еще на этапе производства основы: чем более тяжелые спирты используются, тем большей получается вязкость, что позволяет исключить применение загущающих присадок, которые «выгорают» в ходе работы в двигателе, приводя к ускоренному старению масла;

- на основе эстеров современная технология позволяет создавать полностью биологически разлагаемые масла, так как эстеры являются экологически чистыми продуктами и легко утилизируются;

- высокие термические и термоокислительные свойства.

К недостаткам моторных масел на эстеровой основе можно отнести стоимость производства, которая в 5...10 раз дороже минеральной, поэтому они нашли широкое применение в качестве основ и компонентов авиационных синтетических масел, гидравлических и тормозных жидкостей, работающих при температурах от плюс 200°С до минус 60°С. Содержание эстеров в моторных маслах для автомобилей обычно ограничено 3-5%.

Эфиры фосфорной кислоты обладают высокими термоокислительной стабильностью, смазочными свойствами, вязкостно-температурными характери-

ками и способностью к растворению неметаллических материалов.

Полиорганосилоксаны отличаются низкой температурой застывания, пологой вязкостно-температурной зависимостью, высокими термоокислительной и термической стабильностью.

Масла так же различаются по способу очистки: серной кислотой, адсорбционным, селективным и гидрокаталитическим методами.

Основная классификация базовых масел производится по вязкости. Масла разделяются по уровню вязкости условно на маловязкие (3 – 4 сСт), средневязкие (4 – 6 сСт) и вязкие (8 – 9сСт и выше). В виду отсутствия единой нормативно-технической документации на базовые масла на нефтеперерабатывающих предприятиях России они выпускаются по внутривзаводским стандартам и техническим условиям.

Физико-химические свойства масел определяются вязкостью, индексом вязкости, температурами застывания и вспышки, цветом и коксуемостью. Перечисленные показатели характеризуют базовую основу масла и являются косвенными. От углеводородного состава базового масла зависят: вязкость, окислительная стабильность, поверхностная активность, растворяющая способность, фракционный состав.

Для придания базовым маслам определенных эксплуатационных свойств их легируют присадками, которые подразделяются на следующие основные типы:

- антиокислительные, повышающие антиокислительную устойчивость масел;
- антикоррозионные, защищающие металлические поверхности от коррозионного воздействия кислорода, серы и влаги;
- моюще-диспергирующие, способствующие снижению отложений продуктов окисления на металлических поверхностях;
- улучшающие смазочные свойства (противоизносные, противозадирные, антифрикционные);
- депрессорные, понижающие температуру застывания масел;
- вязкостные (загущающие), улучшающие вязкостно-температурные свой-

ства масел;

- антипенные, предотвращающие вспенивание масел.

В процессе использования масла длительное время основным показателем качества становится базовая основа, поскольку присадки за это время меняют свои свойства.

Изготовитель техники определяет срок замены масла в агрегатах без учета его эксплуатационных характеристик, вида базовой основы и легирующих присадок. Критерием установления сроков замены служит наработка (ч) или пробег (км), что не учитывает фактическое состояние смазочного материала, поэтому ресурс работы масла не используется максимально эффективно, результатом чего является перерасход смазочного материала или поломка агрегата.

1.2. Требования к моторным маслам

Моторное масло является одним из важных элементов конструкции двигателя и может длительно и надежно выполнять свои функции, обеспечивая заданные характеристики трибосопряжений, только при определенном соответствии его свойств тем термическим, механическим и химическим воздействиям, которым оно подвергается в масляной системе двигателя и на поверхностях трения работающих деталей. Все современные масла состоят из базовых масел и, улучшающих их эксплуатационные свойства, присадок. По температурным пределам работоспособности они подразделяются на летние, зимние и всесезонные.

Моторные масла должны отвечать многим требованиям, основными из которых являются [1]:

- высокие моющие, диспергирующе – стабилизирующие способности, обеспечивающие чистоту деталей двигателя;
- высокие термическая и термоокислительная стабильности, позволяющие повысить предельную допустимую температуру нагрева масла в двигателе и увеличить срок его замены;

- достаточные противоизносные свойства, обеспечиваемые прочностью масляной пленки при высокой температуре и градиенте скорости сдвига, способностью модифицировать поверхности трения при граничной смазке и нейтрализовать кислоты, образующиеся при окислении масла и сгорании топлива;
- отсутствие коррозионного воздействия на материалы деталей двигателя;
- стойкость к старению, способность противостоять внешним воздействиям с минимальным ухудшением свойств;
- пологость вязкостно – температурной характеристики, обеспечение холодного пуска, прокачиваемости при холодном пуске и надежного смазывания в экстремальных условиях;
- совместимость с материалами уплотнений, совместимость с катализаторами системы нейтрализации отработанных газов;
- высокая стабильность при транспортировании и хранении;
- малая вспениваемость при высокой и низкой температурах;
- малая летучесть, низкий расход на угар.

Моюще-диспергирующие свойства характеризуют способность масла обеспечивать необходимую чистоту деталей двигателя за счет поддержания продуктов окисления и загрязнения во взвешенном состоянии. Улучшение этих свойств позволяет увеличить количество нерастворимых веществ, удерживаемых в масле без выпадения их в осадок, что снижает лако - и нагарообразование на горячих деталях и повышает допустимую рабочую температуру двигателя (степень форсирования).

Антиокислительные свойства масел определяются их стойкостью к старению. Окисление масел вызывает рост вязкости и коррозионности, повышает интенсивность процесса образования отложений, загрязняющих масляные фильтры и ухудшающих подачу масла к узлам трения. Моторные масла работают в наиболее жестких условиях по сравнению с другими смазками, поэтому для замедления интенсивности процесса окисления необходимо соответствующая очистка базовой основы, использование синтетических базовых компонентов, применение эф-

фективных антиокислительных присадок и конструктивные улучшения двигателя, направленные на обеспечение более эффективного охлаждения масла в процессе эксплуатации.

Противоизносные свойства моторных масел зависят от базовой основы, состава композиции присадок и вязкостно-температурной характеристики масла с присадками, которая является определяющей при выборе температурных пределов его применения. Важными показателями для масла являются: вязкость при температуре 130-180°C, зависимость вязкости от давления, свойства граничных слоев и способность химически модифицировать поверхности трения.

Важной характеристикой моторных масел является их способность предотвращать коррозионный износ поршневых колец и цилиндров при использовании топлив с высоким содержанием серы, показателем чего в нормативной документации является щелочное число. Антикоррозионные свойства моторных масел зависят от базовой основы, концентрации и эффективности антикоррозионных, антиокислительных присадок и деактиваторов металлов. В процессе эксплуатации коррозионность моторных масел возрастает за счет образования окисленных органических кислот, взаимодействующих с материалами деталей двигателя. Антикоррозионные присадки создают на поверхностях трения защитные пленки, а антиокислители препятствуют появлению агрессивных кислот. Введенные в масла присадки-деактиваторы для образования хелатных соединений с медью предохраняют поверхности от коррозионного разрушения.

Вязкостно-температурные свойства моторных масел определяют температурным диапазоном окружающей среды, при котором данное масло обеспечивает пуск двигателя без предварительного прогрева, прокачивание насосами по масляной системе, надежное смазывание и охлаждение деталей двигателя при допустимых нагрузках и температурах. Характеристиками вязкостно-температурных свойств служат кинематическая вязкость, динамическая вязкость и индекс вязкости, рассчитываемый по значениям кинематической вязкости масла, измеренной при 40 и 100 °C (ГОСТ 25371-82).

Наибольшим температурным диапазоном работоспособности обладают

масла на синтетической базовой основе, имеющие индекс вязкости 120-150.

Низкотемпературные характеристики масел определяют температуры застывания, при которых они теряют текучесть.

1.3. Классификация моторных масел в Российской Федерации и за рубежом

Классификация моторных масел определяется их свойствами, к которым относятся:

- моющее – диспергирующие – характеризующая способность масла обеспечивать необходимую чистоту деталей двигателя, поддерживать продукты окисления и загрязнения во взвешенном состоянии;
- антиокислительные свойства, определяющие стойкость масла к старению;
- противоизносные свойства, зависящие от химического состава базового масла, состава композиции присадок и вязкостно – температурной характеристики масла;
- антикоррозионные свойства, зависящие от состава базовых компонентов, концентрации и эффективности антикоррозионных, антиокислительных присадок и деактиваторов металлов;
- вязкостно – температурные свойства, от которых зависит температурный диапазон окружающей среды, в котором данное масло обеспечивает пуск двигателя без предварительного подогрева.

Классификация моторных масел согласно ГОСТ 17479.1 – 85 подразделяет их на классы по вязкости и группы по назначению и уровням эксплуатационных свойств. Стандартом предусмотрено обозначение моторных масел, представляющее потребителю основную информацию об их свойствах и области применения. Стандартная марка включает следующие знаки: букву М (моторные), цифру или дробь, указывающую класс или классы вязкости (последнее для всесезонных масел), одну или две из первых шести букв русского алфавита, обозначающих уро-

вень эксплуатационных свойств и область применения данного масла. Универсальные масла обозначают буквой без индекса или двумя разными буквами с разными индексами. Индекс 1 присваивают маслам для бензиновых двигателей, индекс 2 – дизельным маслам [2].

Общепринятой в международном масштабе стала классификация моторных масел по вязкости Американского общества автомобильных инженеров – SAE J 300. Она позволяет более объективно судить о реологических свойствах масел, зависящих от температуры, скорости сдвига и давления (таблица 1.1) [1].

Таблица 1.1 – Требования классификации SAEJ 300.

Степень вязкости SAE	Вязкость (сП), проворачивания при низкой температуре	Вязкость (сП), прокачивания при низкой температуре	Кинематическая вязкость, (сСт), при 100 °С, и малой скорости сдвига		Вязкость (сП), при высокой скорости сдвига при 150°С
			мин	макс	
0w	6 200 при - 35 °С	60 000 при - 40 °С	3,8	-	-
5w	6 600 при - 30 °С	60 000 при - 35 °С	3,8	-	-
10w	7 000 при - 25 °С	60 000 при - 30 °С	4,1	-	-
15w	7 000 при - 20 °С	60 000 при - 25 °С	5,6	-	-
20w	9 500 при - 15 °С	60 000 при - 20 °С	5,6	-	-
25w	13 000 при - 10 °С	60 000 при - 15 °С	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	< 12,6	2,9
40	-	-	12,6	< 16,3	2,9
40	-	-	12,6	< 16,3	3,7
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

Кинематическая вязкость характеризует принадлежность масел к тому или иному классу вязкости и определяется при 100°С и невысоких скоростях сдвига (от 20 до 100с⁻¹).

Пусковые свойства характеризует показатель сопротивления при пуске холодного двигателя и возможность достижения пусковых оборотов, определяемый при температурах от минус 10 до плюс 35°С в зависимости от класса вязкости и высоких скоростях сдвига (105 с^{-1}).

Прокачиваемость характеризует скорость поступления масла к узлам трения при холодном пуске и определяется при температурах от минус 15 до плюс 40 °С (в зависимости от класса вязкости) и низких скоростях сдвига (10 с^{-1}).

Показатель вязкости при высоких температурах (130-180 °С) характеризует вязкость при летней эксплуатации двигателей и противоизносные свойства масел.

Уровень эксплуатационных свойств и область применения зарубежные производители моторных масел указывают по классификации API (Американский институт нефти), которая подразделяет их на две категории: “S”(Service) – масла для бензиновых двигателей и “C” (Commercial) – масла для дизелей. Универсальные масла обозначают классами обеих категорий. Классы в категориях указывают буквы латинского алфавита, стоящие после буквы, обозначающей категорию (например: SF, SH, CC, CD или SF/CC, CG/CD, CF – 4/SH для универсальных масел).

Выбор моторных масел для определенных конструкций двигателей осуществляется на специальных одноцилиндровых установках и полноразмерных, особым образом подготовленных, двигателях, причем, чем выше группа по уровню эксплуатационных свойств, тем жестче условия испытания.

Кроме американской системы классификации API и российского стандарта ГОСТ 17479.1 – 85 существует европейская CCMC (старая) и ACEA (новая). С 1998 г. Российская Ассоциация автомобильных инженеров (ААИ) создала собственный стандарт СТО ААИ 003 – 98, в котором отражен минимальный уровень требований автомобилестроителей к моторным маслам.

Классификация ACEA введена в 1996 г. и включает три категории масел по назначению: А – для бензиновых двигателей; В – для дизелей легковых автомобилей; Е – для дизелей. Числа, следующие за буквой, определяют уровень эксплуатационных свойств:

1– энергосберегающие (обеспечивающие экономию топлива) масла для современных автомобилей (А1,В1,Е1);

2– масла того же эксплуатационного уровня, но не сертифицированы как энергосберегающие;

3– перспективные требования к маслам.

Классификация ААИ предусматривает индексацию, аналогичную европейской (АСЕА). Назначение и уровень эксплуатационных характеристик масла определяет буквенно-цифровой индекс. Масла для бензиновых двигателей обозначаются буквой Б, а для дизельных – буквой Д. Группа эксплуатационных свойств определяется цифрой, указываемой за буквой (таблица 1.2)

Таблица 1.2 – Уровень эксплуатационных свойств по ААИ.

Классификация масел для бензиновых двигателей	
Категория	Расшифровка
Б1	Бензиновые двигатели грузовых автомобилей
Б2	Бензиновые двигатели легковых автомобилей выпуска до 1996 года
Б3	Бензиновые двигатели легковых автомобилей выпуска после 1996 года
Б4	Бензиновые двигатели, отвечающие требованиям Евро-2
Б5	Перспективные бензиновые двигатели с улучшенными экологическими показателями
Б6	Бензиновые двигатели, отвечающие требованиям Евро-4
Классификация масел для дизельных двигателей	
Категория	Расшифровка
Д1	Дизели грузовых автомобилей без наддува
Д2	Дизели грузовых автомобилей с наддувом, дизели грузовых автомобилей без наддува, работающие в тяжелых условиях
Д3	Дизели грузовых автомобилей с наддувом, работающие в тяжелых условиях и имеющие повышенные экологические показатели
Д4	Дизели грузовых автомобилей с наддувом, работающие в тяжелых условиях и отвечающие требованиям Евро-2 по выбросам токсичных компонентов
Д5	Дизели грузовых автомобилей с наддувом, работающие в тяжелых условиях и отвечающие требованиям Евро-3 по выбросам токсичных компонентов

Требования к маслам и методы их испытаний по API, ACEA, ГОСТ и ААИ различны и определяются различиями конструкций двигателей, производимых в России, Европе и США, а также условиями из эксплуатации. Наибольшие различия в требованиях к маслам дизелей.

Моторные масла, относящиеся к одному и тому же классу API, но производимые разными фирмами, могут существенно отличаться по составу базовых масел, типам используемых присадок. Поэтому при выборе аналога по области применения и уровню эксплуатационных свойств необходимо учитывать специальные требования к моторному маслу со стороны изготовителя техники. В этой связи необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют ускоренные методики предварительного выбора моторных масел для двигателей различной степени нагруженности, позволившие значительно сократить трудоемкость приемочных и квалификационных испытаний.

Приемочные испытания подразделяют на:

- лабораторно–стендовые, предназначенные для оценки физико–химических и эксплуатационных характеристик нефтепродукта и соответствие его нормативной документации или техническим условиям;
- стендовые, предназначенные для оценки надежности работы двигателей, агрегатов, узлов, систем и механизмов на новом продукте;
- полигонные, контрольно–летные, предназначенные для подтверждения тактико-технических характеристик на новом нефтепродукте;
- эксплуатационные, или эксплуатацию под наблюдением, предназначенные для выявления особенностей использования нового нефтепродукта в условиях эксплуатации техники, установления периодичности ее технического обслуживания.

Поэтому при эксплуатации двигателей необходимо придерживаться рекомендаций заводов – изготовителей по применению моторных масел и соблюдать регламентные сроки по их замене. Однако существующая система замены масел по пробегу не учитывает фактического состояния моторного масла, так как оно зависит от режимов и условий эксплуатации, технического состояния двигателя и системы фильтрации. Поэтому поиск новых методов контроля и выбора мотор-

ных масел является актуальной задачей, решение которой особенно важно в связи с появлением на российском рынке как отечественных, так и зарубежных масел.

1.4. Факторы, влияющие на ресурс моторных масел

Ресурс моторных масел является важным эксплуатационным показателем, так как оказывает основное влияние на надежность двигателей внутреннего сгорания и зависит от их конструктивных особенностей, степени форсирования, технического состояния цилиндропоршневой группы, режимов работы, состояния системы фильтрации, герметичности масляной системы и от качества самого масла [3-12].

Сроки замены моторного масла при ТО устанавливаются заводами-изготовителями на основе полигонных и моторных испытаний и регламентируются в километрах пробега или моточасах. Использование такой системы не требует применения специальных средств контроля моторных масел в процессе эксплуатации двигателей, но не обеспечивает эффективного их применения, так как, например, на ресурс моторных масел оказывают влияние доливки, вызванные его угаром, а также герметичность масляной системы. При частых доливках масло восстанавливает свои свойства, а значит, ресурс его должен быть увеличен, однако существующая система технического обслуживания этого фактора не учитывает.

Еще одним фактором необходимости определения ресурса моторных масел является появление большого количества минеральных, синтетических и частично синтетических масел. Применение импортных масел без установления их ресурса для конкретных двигателей в существующей системе техобслуживания неэффективно и приводит к увеличению эксплуатационных затрат, так как они не вырабатывают свой ресурс.

Важное влияние на ресурс моторных масел оказывают условия работы, которые характеризуются эксплуатационными и внешними параметрами:

- частыми пусками и прогревом двигателей при эксплуатации в холодное время;
- переменными нагрузочными, скоростными и температурными режимами;
- вибрациями, колебаниями и ударами однократного и многократного действия;
- отклонениями от нормального теплового режима работы.

Нагрузочный режим работы двигателей устанавливается в зависимости от запроектированных температурных параметров и условий эксплуатации транспортных средств. В этом случае сохраняется оптимальный расход ресурса как машины в целом, так и смазывающего материала в частности. Увеличенные интенсивности эксплуатации приводят к значительным нагрузкам на силовую установку, что в свою очередь ведет к повышению температурных режимов ее работы, снижению технического и эксплуатационного ресурса механических систем и смазочного материала. Температурный режим работы двигателей является определяющим параметром, влияющим на ресурс применяемого смазочного материала, и оценивается по температуре охлаждающей жидкости и масла на выходе из двигателя. Оценка по тепловому параметру масла производится не на всех транспортных средствах, машинах и механизмах. Вследствие этого основным параметром оценки остается температура охлаждающей жидкости.

Системы смазки пар трения в двигателях по способу подачи масла к трущимся деталям могут быть с подачей масла разбрызгиванием, с непрерывной подачей масла под давлением и комбинированным способом.

При эксплуатации в системе смазки происходят изменения, приводящие к нарушению работоспособности системы. Основными признаками неисправности являются перегрев двигателя, низкое давление в системе смазки, загрязненность смазочного материала и его высокий расход на угар. Нарушение работоспособности системы смазки снижает ресурс смазочного материала и является основной причиной аварийного выхода техники из строя с дальнейшей длительной невозможностью ее эксплуатации. Снижение давления масла в системе смазки двигателя может быть вызвано недостаточным его количеством, перегрузкой или из-

ношенностью деталей цилиндропоршневой группы, загрязненностью масляных радиаторов, нарушающих теплоотвод, неисправностью редукционных клапанов масляных насосов. В период запуска двигателя в холодный период масло при низкой температуре плохо прокачивается в системе, дольше задерживается в зазорах сопряженных деталей, что приводит к повышенному износу деталей вследствие отсутствия масляной пленки на их поверхностях. Как показывают результаты исследований [13,14], предельное значение температуры масла в подшипниках ограничивается рабочей температурой его антифрикционного слоя, которая составляет 140°C (рисунок 1.1). Следовательно, такой режим обеспечивается, при температуре выходящего масла от 30 до 110°C . Система смазки надежно работает при температуре масла $55\text{--}110^{\circ}\text{C}$. Этот диапазон температур соответствует минимальному нагреву масла в подшипниках. Резкое увеличение температуры масла в подшипниках, когда температура масла на выходе из двигателя превышает 90°C , объясняется ухудшением теплоотвода от подшипников.

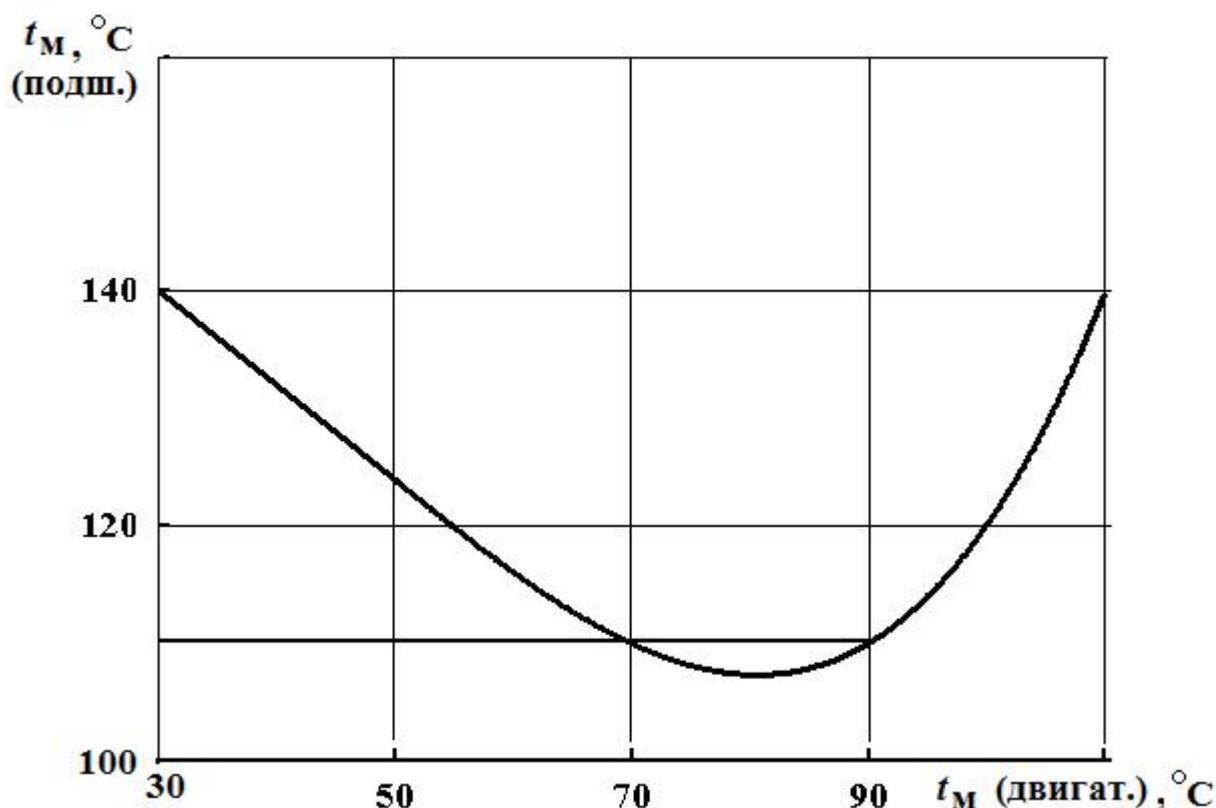


Рисунок 1.1 – Зависимость температуры масла в подшипниках от температуры масла на выходе из двигателя.

Продолжительная эксплуатация масла в системе смазки приводит к изменению его состава и прежде всего с разжижением масла топливом, как следствие нарушение тепловых режимов работы двигателя и значительным его износом, а также загрязнению продуктами окисления, продуктами сгорания топлива (сажей), частицами износа трущихся деталей и другими эксплуатационными примесями. Кроме того, происходит уменьшение количества смазочного материала в системе вследствие испарения и угара. Все эти показатели ухудшают физико-химические свойства масел и, как следствие, снижают его эксплуатационный ресурс.

Воздействие внешней среды на ресурс смазочного материала оценивается запыленностью воздуха, влажностью, резкими перепадами температур, характерными для многих районов, в которых эксплуатируется техника. Степень запыленности оценивается содержанием пыли в единице объема воздуха. Пыль является причиной интенсивного износа трущихся деталей, а попадая в смазочный материал является основным компонентом его загрязнения. Работа двигателей в условиях запыленности приводит к повышению тепловых режимов эксплуатации. Процесс теплоотвода нарушается вследствие оседания пыли на агрегатах, узлах и механизмах.

Поддержание работы смазочной системы в заданных параметрах предусматривает необходимость проводить в процессе эксплуатации непрерывное удаление из масла вредных примесей. Очистка масла в системе производится фильтрацией, центрифугированием и отстаиванием. Степень очистки масла зависит от конструкции системы фильтрации и предусматривает периодичность ее технического обслуживания.

На определение установленных ресурсов смазочных материалов влияют периодичность технического обслуживания систем смазки, качество и чистота применяемых масел, герметичность систем и отсутствие подсоса неочищенного воздуха, своевременная промывка фильтров, правильная регулировка топливной аппаратуры и карбюраторов, контроль паровоздушных клапанов систем охлаждения. На основе проведенного анализа установлено, что ресурс моторных масел зависит от их сопротивляемости механическим, температурным и химическим воз-

действиям, герметичности масляной системы, частоты доливов, степени износа цилиндропоршневой группы, производительности системы фильтрации.

Основным направлением для увеличения ресурса и надёжности двигателей является организация проведения периодического контроля состояния моторного масла. Особого внимания заслуживают разработки методов и средств контроля термоокислительной стабильности и противоизносных свойств смазочных материалов, которые по сравнению с другими более перспективны и позволяют получить дополнительную информацию об их работоспособности в конкретных условиях эксплуатации техники. Кроме того, термоокислительная стабильность может служить исходным показателем при разработке математических моделей определения ресурса любых смазочных материалов. Поэтому основным направлением для увеличения ресурса и надёжности двигателей является организация периодического контроля состояния моторного масла.

1.5. Современные методы контроля термоокислительной стабильности моторных масел

Термоокислительная стабильность является важным интегральным эксплуатационным показателем моторных масел, так как образующиеся при окислении продукты влияют на коррозионные, противоизносные и вязкостные свойства.

Главным фактором, оказывающим влияние на скорость окислительных процессов, является температура, которая генерируется на поверхностях трения. Кроме того, металлические поверхности пар трения оказывают каталитическое влияние на окислительные процессы, протекающие в маслах, при повышенных температурах. Однако влияние продуктов окисления на фрикционные свойства масел изучены недостаточно, так как сам механизм их образования также недостаточно изучен.

Стойкость смазочных масел к окислению повышают путем их легирования антиокислительными присадками, но активность присадок при длительной работе двигателей внутреннего сгорания падает, поэтому важно иметь приборное обес-

печение для оценки термоокислительной стабильности в течение всего срока эксплуатации.

Основные методы и средства контроля термоокислительной стабильности рассмотрены в обзоре [5] и монографии [15].

Метод [16] позволяет оценивать лакообразующие свойства масел и влияние на них присадок. В этой связи предложен коэффициент лакообразования, который можно использовать для определения степени окисления масла. Метод реализуется с помощью стандартного лакообразователя.

Метод определения стабильности присадок в маслах [17] заключается в измерении электропроводности испытываемых образцов, изменяющейся в зависимости от их состояния (высаживание присадки, превращение раствора в коллоидный, изменение химических свойств присадки). По характеру зависимости силы тока, проходящего через образец, от времени испытания судят о влиянии различных факторов на стабильность растворов присадок в маслах.

При определении термической стабильности масел графическую зависимость строят в координатах: температура-сила тока, проходящего через образец, а температурную область взаимодействия присадок с металлами пар трения определяют с помощью электродов, изготовленных из соответствующего металла.

Метод определения свойств моторного масла [18] заключается в отборе проб масла, прошедшего испытания в двигателе, выдерживании его в присутствии 1-5 мас. % воды или водного раствора электролита при 70-150°C. Количество выпавшего сухого осадка является показателем стойкости к шлакообразованию. Термоокислительную стабильность отобранной пробы масла определяют по приросту вязкости. Результаты исследования термоокислительной стабильности и шлакообразования согласуются с данными длительных стендовых и эксплуатационных испытаний.

Прибор для оценки термоокислительной стабильности масел [19] состоит из узлов предварительного окисления масла в объеме и окисления в тонком слое. Предварительное окисление производится при температуре и подаче окислителя (воздух) в масло через перфорированное кольцо. Стабильность масла оценивается

по изменению его физико-химических и эксплуатационных свойств, а также по количеству отложений и испаряемости.

Метод контроля термоокислительной стабильности низкомолекулярных нефтепродуктов [20] заключается в определении разности удельной мощности диэлектрических потерь в присутствии катализатора и без него, которая определяется по формуле:

$$P = \varepsilon \times \varepsilon_0 \times \omega \times \operatorname{tg} \delta \times \frac{E^2}{2}, \quad (1.7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость нефтепродукта; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ω – угловая частота; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; E – напряженность электрического поля, кВ/м.

В ходе определения $\operatorname{tg} \delta$ каждый исследуемый нефтепродукт нагревают от комнатной температуры до появления максимума $\operatorname{tg} \delta$, при этом скорость нагрева должна составлять 2,2-2,4 град/мин. По максимуму $\operatorname{tg} \delta$ определяют удельную мощность при наличии и отсутствии катализатора по формуле:

$$P_1 = \varepsilon_1 \times \varepsilon_0 \times 2\pi f \times \operatorname{tg} \delta_1 \times \frac{E^2}{2}, \quad (1.8)$$

$$P_2 = \varepsilon_2 \times \varepsilon_0 \times 2\pi f \times \operatorname{tg} \delta_2 \times \frac{E^2}{2}, \quad (1.9)$$

где f – частота переменного тока, которая соответствует $\operatorname{tg} \delta$.

Термоокислительную стабильность определяют по величине разности удельной мощности потерь.

Метод определения термоокислительной стабильности [21] предусматривает нагревание и перемешивание пробы масла при испытании, определение температуры начала окисления и скорости окисления, которая принята за критерий, характеризующий склонность смазочного материала к образованию растворимых и нерастворимых продуктов окисления, определяемый по зависимости оптической плотности от времени испытания.

Метод [22] позволяет определить степень загрязненности работавшего моторного масла путем измерения физических параметров исходного и работавшего масел. В качестве параметров определяют плотности исходного и работавшего масел и плотность нерастворимых в масле загрязнений. Степень загрязненности χ определяют по формуле:

$$\chi = \frac{\rho(\rho_{см} - \rho_2)}{\rho_{см}(\rho_1 - \rho_2)}, \quad (1.10)$$

где $\rho_{см}$, ρ_2 , ρ_1 – соответственно плотности работавшего масла, исходного и нерастворимых в масле загрязнений.

Метод [23] может быть использован при определении качества масла, работающего в двигателях внутреннего сгорания. Он заключается в определении отношения разности плотностей работающего и товарного масел к плотности товарного масла ($\Delta\rho_M/\rho_0$), а о качестве масла судят по заданной зависимости между этим соотношением и щелочным числом.

Устройство и метод для определения термической стабильности смазочных масел газотурбинных и поршневых двигателей [24] предусматривают прокачку масла под давлением через жиклер с последующим его нагревом до температуры 250 – 300°C. Многократное тепловое нагружение масла, подаваемого в жиклер, вызывает закоксовываемость отверстия жиклера, в результате прокачиваемость снижается и по ее зависимости от числа термоциклирования судят о термической стабильности масла.

ГОСТ 20457-75 [25] предусматривает проведение испытаний на установке ИКМ в течение 40 ч и последующей оценки антиокислительных свойств по изменению вязкости масла и отложениям на поршне.

Изменение вязкости за время испытания Y_B в процентах определяют по формуле:

$$Y_B = \frac{\Delta v_{50}}{v_{50}} \times 100, \quad (1.11)$$

где Δv_{50} – прирост вязкости за время испытания, сСт, равный

$$v'_{50} - v_{50}, \quad (1.12)$$

где v'_{50} – кинематическая вязкость масла при температуре 50°C после 40 ч испытания, сСт; v_{50} – кинематическая вязкость масла при температуре 50°C до испытания, сСт.

Общее количество отложений на поршне O_0 в граммах определяется по формуле:

$$O_0 = (m_1 - m_0) + m_k, \quad (1.13)$$

где m_1 – масса поршня в комплекте с кольцами после испытания, г; m_0 – масса поршня в комплекте с кольцами до испытания, г; m_k – суммарный износ поршневых колец за время испытания, г, равный $m_2 - m_3$, где m_2 – масса колец до испытания, г; m_3 – масса чистых колец после проведения испытания, г.

ГОСТ 23175 – 78 [26] предусматривает определение моторных свойств и термоокислительной стабильности. Способ заключается в нагревании тонкого слоя масла на металлической поверхности, испарении легких фракций, содержащихся в масле и образующихся при разложении, с последующим разделением остатка на рабочую фракцию и лак, и определении термоокислительной стабильности по испаряемости, массовым долям рабочей фракции масла и лака.

ГОСТ 11063 – 77 [27] устанавливает способ определения термоокислительной стабильности по индукционному периоду осадкообразования моторных масел с присадками. Сущность метода заключается в окислении масла при 200 °С в приборе ДК – НАМИ с последующим определением осадка и вязкости испытываемого образца.

Вязкость исследуемого масла определяют при 50 и 100°C, а прирост вязкости в результате окисления определяют по формулам (1.11 и 1.12).

Массовую долю осадка в окисленном масле (χ_0) в процентах вычисляют по формуле:

$$\chi = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100, \quad (1.14)$$

где m – масса навески окисленного масла, г; m_1 – масса бюксы с чистым фильтром, г; m_2 – масса бюксы с фильтром и осадком, г.

ГОСТ 981–71 [28] предусматривает определение термоокислительной стабильности с помощью прибора ВТИ в присутствии кислорода и катализаторов при повышенной температуре. Стабильность масла характеризуется кислотным числом, количеством летучих низкомолекулярных кислот и осадка, образующихся при окислении.

ГОСТ 20944–75 [29] предусматривает окисление жидкости в контакте с металлами и воздухом при нагреве до 200°С или техническим азотом при нагреве до 300°С. Термоокислительную стабильность оценивают по изменению внешнего вида образца, кислотного числа и вязкости, а коррозионную активность – по изменению массы металлических пластин (катализаторов).

ГОСТ 18136–72 [30] предусматривает определение термоокислительной стабильности по кислотному числу, числу омыления, вязкости, коксуемости, содержанию смол, количеству нерастворимого осадка, тангенсу угла диэлектрических потерь, удельному электрическому объемному сопротивлению, цвету и массе катализатора, внешнему виду, цвету и массе конденсата.

Метод, регламентированный ГОСТ 23797–79 [31], предусматривает оценку термоокислительной стабильности по количеству образовавшегося осадка, нерастворимого в изооктане, изменению вязкости, кислотному числу, наличию отложений в реакционном сосуде, а также коррозионности масла, определяемого по изменению массы пластинок – катализаторов. Испытания проводят при температуре 300 – 400°С.

Экспресс-методом оценки окислительной устойчивости минеральных масел и тестирования присадок по их влиянию на окислительную устойчивость является метод хемилюминесценции [32]. В синей области видимого спектра при окислении масел выделяется квант света, интенсивность свечения которого определяется скоростью протекания окислительных процессов.

Метод [33] при помощи прибора обеспечивает более благоприятные условия контактирования масла с кислородом воздуха за счет превращения его в аэрозоль с помощью диффузора. Для окисления масла применяют катализаторы, выполненные из медной пластины и стальной пружины. Применение катализаторов и превращение масла в мелкие капли увеличивает поверхность контакта и продолжительность взаимодействия с кислородом, что повышает скорость окислительных процессов. Прибор позволяет проводить окисление при температуре до 200°C.

Метод превращения масла в аэрозоль с помощью прибора для оценки эксплуатационных свойств моторных масел предложен в работе [34]. Прибор включает рабочую камеру с подогревом, разбрызгиватель, трубки для подвода воздуха и масла, а также холодильник для конденсации летучих продуктов окисления, трубки для возврата конденсата и контактный термометр.

Термоокислительную стабильность масел по изменению вязкости, индукционному периоду осадкообразования и испаряемости можно определить на устройстве, предложенном в работе [35]. Оно включает основание, на котором установлен под углом 70° к горизонту корпус, электродвигатель со встроенным редуктором, понижающим частоту вращения вала до 30 мин⁻¹, и кассету, изготовленную из нержавеющей стали с 12 гнездами для кювет, выполненных из стали Ст3. Обогрев кассет осуществляется электронагревателем, а контроль и регулирование температуры обеспечивается потенциометром с термопарой.

Прибор работает следующим образом: в кюветы помещают образцы испытываемых масел по $18 \pm 0,02$ г, которые затем устанавливают в гнезда кассеты, нагретой до 200°C, и включают электродвигатель, который вращает кассету в наклонной плоскости, при этом масла в кюветах интенсивно перемешиваются и вследствие высокой температуры, контакта с воздухом и каталитического действия металла окисляются и испаряются. После испытания кюветы взвешивают, определяют кинематическую вязкость окисленных масел при 50 и 100°C и количество осадков.

Для определения коррозионности в кюветы с исследуемыми маслами устанавливаются в специальных держателях свинцовые пластины, которые при вращении кассеты попеременно контактируют с маслом и воздухом. Испытания проводятся при температуре $140 \pm 1^\circ\text{C}$ и по потере массы пластин делают выводы о коррозионности исследуемых масел.

Оценки масел по нагаро – и лакообразующей способности и коррозионным свойствам можно проводить на установке, описанной в работе [36]. Работа установки заключается в том, что на нагретый цилиндр с градиентом температуры по его длине наносится пленка масла с помощью подвижного кольцевого элемента, выполненного с возможностью возвратно – поступательного движения.

В результате контакта тонкой масляной пленки с нагретыми до различных температур участками цилиндра масло окисляется, подвергается термической полимеризации и в зависимости от качества образует на поверхности нагаро – и лакоотложения с различными качественными и количественными характеристиками, соответствующими температурным зонам цилиндра.

Для оценки эксплуатационных свойств масел по таким параметрам, как температурная область работоспособности, скорость окисления, коррозионная активность и лако – нагарообразование, разработан прибор [37], содержащий три блока, герметично соединенных между собой (рис. 1.2). В нижнем блоке размещена рабочая камера для исследуемого масла, выполненная в виде цилиндрического съемного стакана 1, установленного соосно в корпусе 2 электронагревателя 3, изолированного от внешней среды термоизоляцией 4 и герметично фиксируемого поджимным устройством 5. На верхней части стакана 1 установлена съемная втулка 6, изготавливаемая из алюминия, а для определения коррозионной активности масел и ускорения процесса окисления – из стали, меди и ее сплавов.

Стакан 1 вынимается из корпуса 2 электронагревателя с помощью ручки 7 при отжиме устройства 5. Внутри стакана 1 соосно установлен разбрызгиватель 8 в виде полого конуса с отверстием 9 на вершине, которая погружена в исследуемое масло. Основание разбрызгивателя 8 выполнено с отверстием 10 для распыления масла на съемную втулку 6. Под разбрызгивателем 8, исполняющим роль

мешалки, для обеспечения постоянной температуры в объеме исследуемого масла установлены барботажная трубка 11 для подачи окислителя (воздух) и термопара 12.

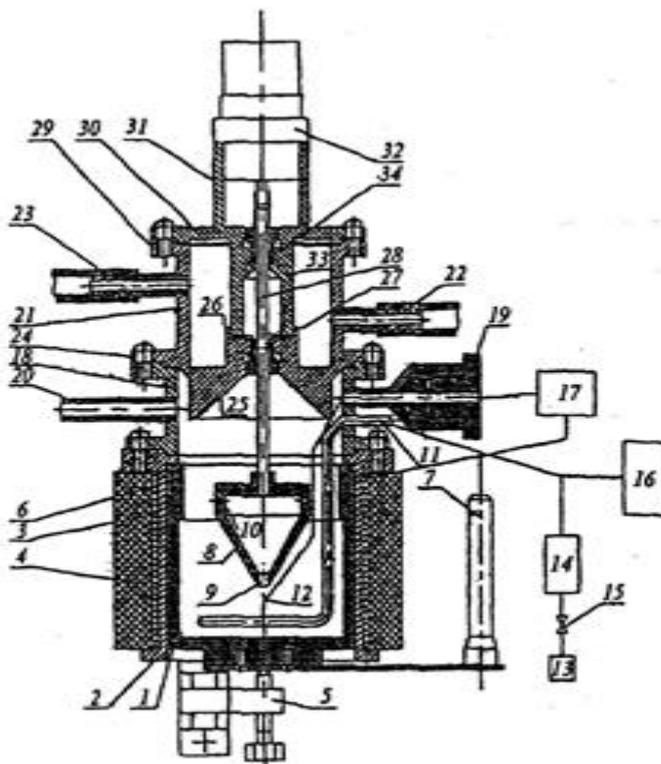


Рисунок 1.2 – Общий вид прибора для оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов: 1-стакан; 2-корпус; 3-нагреватель; 4-термоизоляция; 5-фиксирующее устройство; 6-штулка съемная; 7-ручка; 8-разбрызгиватель; 9-10-отверстия; 11-трубка барботажная; 12-термопара; 13-компрессор; 14-расходомер; 15-регулятор подачи окислителя; 16-устройство отбора пробы, 17-блок регулирования температуры; 18,21-цилиндр; 19-герметичный ввод; 20-трубка вывода воздуха; 22-23-штуцер; 24,29-фланец; 25-коническая поверхность; 26,31,33-штулка; 27,34-подшипник; 28-вал; 30-крышка; 32-электропривод.

Барботажная трубка 11 соединена с компрессором 13, расходомером 14, регулятором подачи окислителя 15 и устройством отбора пробы исследуемого масла в процессе испытания 16.

Термопара 12 соединена с блоком регулирования температуры 17, включающим: датчик температуры, схемы сравнения, регистрации и индикации, которые соединены с нагревателем 3. Блок 17 обеспечивает дискретное задание необходимой температуры и ее автоматическое поддержание в течение времени испытания исследуемого масла.

Средний блок прибора выполнен в виде полого цилиндра 18 с отверстиями для ввода барботажной трубки 11, герметичного ввода 19, термопары 12 и трубки вывода воздуха.

Верхний блок – холодильник представляет собой полый цилиндр 21 с входным 22 и выходным 23 штуцерами для подвода и отвода хладагента (вода) и двух фланцев, нижний из которых 24 имеет коническую поверхность 25, вершина которой направлена внутрь цилиндра 21. Такая конструкция нижнего фланца 24 обеспечивает конденсацию паров масел и слив конденсата в рабочую камеру 1. На цилиндрической втулке 26, выполненной соосно с фланцем 24, установлен подшипник 27 вала 28 разбрызгивателя 8.

Верхний фланец 29 цилиндра 21 герметично закрыт крышкой 30 с верхней втулкой 31, в которой установлен электропривод 32, и нижняя втулка 33 с подшипником 34 вала 28 разбрызгивателя 8. Втулки 26 и 33 герметично соединены, и тем самым исключают попадание хладагента в рабочую камеру 1 и обеспечивают нормальный температурный режим работы подшипников 27 и 34.

Для определения температурной области работоспособности исследуемого масла испытания проводят в диапазоне температур от 50 до 180°C с интервалом 10 - 20°C в течение 6 ч для каждой температуры. До и после испытания масло фотометрируют. Испытания проводят до времени начала изменения оптических показателей плотности масла. Данная температура является началом окисления исследуемого масла. Окисление масел проводят при температуре на 5 - 10°C выше температуры начала окисления или при температуре, указанной в технических условиях.

Испытания масел на склонность к лако – и нагарообразованию проводят в диапазоне температур от 180 до 350°C, при этом начальную температуру задают 180°C и увеличивают ее значение с интервалом 10 – 20°C. Лако – нагарообразование определяют по разности массы втулки 6 до и после испытания, а также визуально по окраске поверхности. Для выявления коррозионной активности исследуемого масла применяют съемную втулку 6 из стали, меди и ее сплавов. Данные

съемные втулки используют как катализаторы для ускорения процесса окисления масла.

Прибор позволяет исследовать как чистые, так и работавшие масла, с катализатором и без него и оценивать эксплуатационные свойства масел, что дает возможность отбирать образцы масел, соответствующие требуемым условиям применения.

Проведенный анализ методов контроля термоокислительной стабильности масел показал, что методическая база и приборное обеспечение позволяют исследовать термоокислительную стабильность, лако – и нагарообразования, изменение вязкости, кислотности и коррозионной стойкости. Некоторые разработки могут быть универсальными, так как на их основе можно оценивать качество широкого ассортимента нефтепродуктов. Из результатов анализа видно, что оценка термоокислительной стабильности должна быть комплексной и учитывать зависимости вышеперечисленных показателей от противоположных и противозадирных свойств окисленных масел.

1.6. Основы теорий процессов окисления моторных масел

Старение моторного масла является результатом процессов окисления, разложения и полимеризации углеводородов, которые сопровождаются в процессе хранения и эксплуатации загрязнением различными примесями, такими как: нагар, пыль, металлические и неметаллические частицы износа, вода, топливо и т.д. Процессы, являющиеся причиной старения, существенно изменяют физико-химические свойства моторного масла, приводят к появлению в нем разнообразных продуктов, что существенно изменяет его эксплуатационные показатели.

Наиболее характерным процессом при нормальной эксплуатации моторного масла является процесс окисления. Различают следующие виды окисления масла в двигателях: в толстом слое (поддон картера или масляный бак), в тонком слое (поверхности сопряжения трущихся пар), в туманообразном состоянии (картер, клапанная коробка). Окисление масла в толстом слое дает осадки в виде шлама, а

в тонком – в виде лака.

Нагар образуют твердые углеродистые вещества, откладывающиеся во время работы на внутренних поверхностях двигателя. Интенсивность и количество отложений в виде нагара зависят главным образом от температурных условий и различаются у двигателей одинаковой конструкции и при аналогичном составе топливной смеси. Нагар оказывает существенное влияние на протекание процесса сгорания топливовоздушной смеси в двигателе и на долговечность его работы. Появление нагара на поверхностях деталей камеры сгорания является следствием нарушения нормального процесса воспламенения и горения топлива в цилиндре двигателя (детонационное сгорание, калильное воспламенение).

Лак образуется в результате окисления тонких масляных пленок на деталях цилиндропоршневой группы двигателя под воздействием высоких температур. Наибольший вред наносит лакообразование в зоне поршневых колец, вызывая процессы их закоксовывания (залегания с потерей подвижности). Лаки, откладываясь на поверхностях поршня, контактирующих с маслом, нарушают теплопередачу через поршень, ухудшая теплоотвод от него.

Окисление углеводов обосновывается теорией перекисей А.Н. Баха и К.О. Энглера, дополненной П.Н. Черножуковым и С.Э. Крейном [38], и может идти по двум основным направлениям, представленным на схеме (рисунок 1.3).

При этом результатом окисления по первому направлению являются кислые продукты (кислоты, оксикислоты, эстолиды и асфальтогенные кислоты), образующие осадки при пониженных температурах; результатом окисления по второму направлению являются нейтральные продукты (карбены, карбоиды, асфальтены и смолы), из которых образуются при повышенных температурах, характерных для камеры сгорания, лаки или нагары.

Предложенная А. Н. Бахом и К. Энглером теория окисления была названа перекисной, так как согласно этой теории первыми продуктами окисления являются пероксиды и гидропероксиды. Органические пероксиды обычно рассматривают как производные пероксида водорода H—O—O—H , в котором один или два атома водорода замещены органическими радикалами H—O—O—R . Если в пе-

роксида водорода один атом водорода замещен радикалом, такие оксидные соединения называются гидропероксидами $K-O-O-H$.

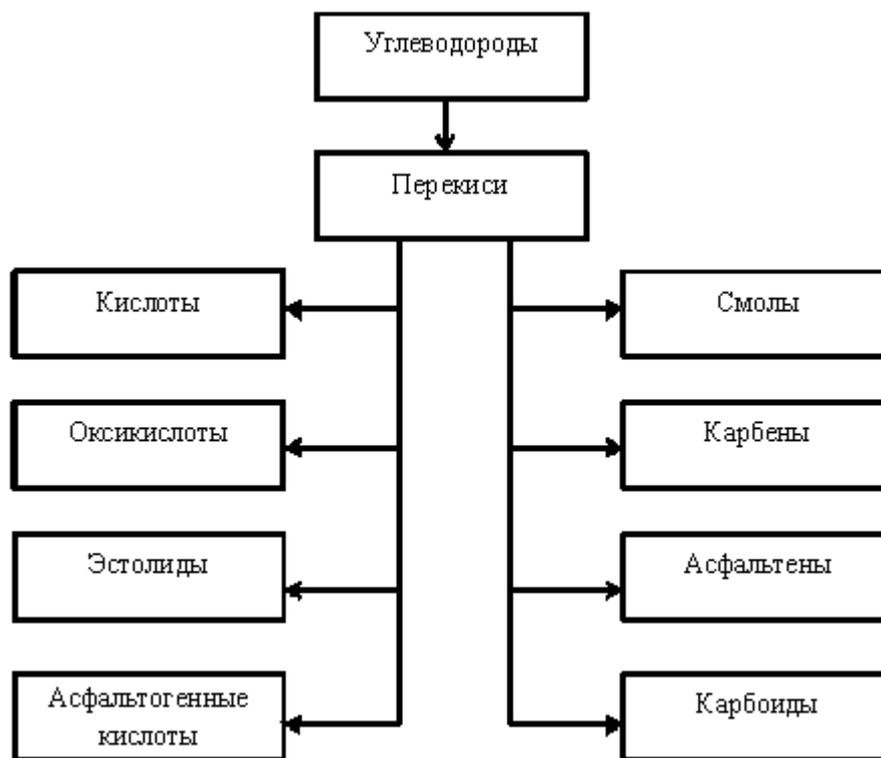


Рисунок 1.3 – Схема окисления углеводородов в ДВС

Согласно перекисной теории окисления, активация кислорода происходит в результате разрыва одной связи между атомами в молекуле кислорода, на что требуется меньше энергии (343,6 кДж/моль), чем на полную диссоциацию молекулы кислорода (488,3 кДж/моль).

Активная молекула кислорода легко вступает в соединение с горючими веществами, не распадаясь на атомы: $CH_4 + -O-O- \rightarrow CH_3-O-O-H$ - гидропероксид метила, $CH_3-CH_3 + -O-O- \rightarrow CH_3-O-O-CH_3$ - пероксид диметила.

Энергия разрыва связи $-O-O-$ в пероксидах и гидропероксидах значительно ниже (125—167 кДж/моль), чем в молекуле кислорода O_2 , поэтому они весьма реакционноспособны и малоустойчивы. При нагревании и механических воздействиях они легко распадаются с образованием новых веществ или ради-

калов. Образующиеся при распаде пероксидов радикалы являются активными центрами реакций окисления.

Однако перекисная теория окисления не в состоянии объяснить существование индукционного периода, предшествующего видимой реакции, резкое действие следов примесей на скорость процесса и др. Это было объяснено учением о цепных реакциях.

Цепными называются реакции, идущие через ряд стадий (через ряд промежуточных реакций), в которых образуются промежуточные соединения со свободными валентностями, так называемые активные центры, являющиеся зародышами последующих быстропротекающих стадий процесса.

Цепные реакции могут быть разветвляющиеся и неразветвляющиеся. В разветвляющейся цепной реакции каждый активный центр зарождает два или более новых активных центра. Один из новых центров будет продолжать цепь, а второй начинает новую.

Основное отличие современного представления о механизме окисления от перекисной теории состоит в том, что начальной фазой процесса является не активация молекул кислорода, а активация молекул окисляющегося вещества.

Первую теорию действия антиоксидантов предложил Х. Бекстрем (1927 г.); он основывался на цепной теории, согласно которой антиоксидант взаимодействует с активными центрами, ведущими цепь. При этом молекулы антиоксиданта претерпевают химические превращения, т. е. антиоксидант расходуется на обрыв цепи. Значительно позднее (1942 г.) Дж. Болланд и П. Теи Хейв выяснили химическую природу элементарного акта обрыва цепи реальными антиоксидантами, которые, реагируя с радикалами ROO, образуют гидроперекись.

В нашей стране систематическое исследование антиоксидантов было начато С. Э. Крейном и П. И. Черножуковым, которые обнаружили, что фенольные антиоксиданты при малых концентрациях не тормозят окисления. Н. Н. Семенов, создавший теорию разветвленных цепных реакций, основываясь на опытах упомянутых авторов, еще в 1933 г. ввел понятие о критической концентрации антиоксиданта — концентрации, ниже которой антиоксидант не тормозит окисления,

и дал качественное объяснение этого явления.

До последнего времени теория действия антиоксидантов только объясняла факт торможения процесса окисления и некоторые отдельные закономерности этого явления. Подбор антиоксидантов для конкретных материалов до сих пор производится эмпирически и остается чрезвычайно трудоемким.

1.7. Выводы по первой главе

1. Современные методы классификации моторных масел по классам вязкости и группам эксплуатационных свойств характеризуются недостаточной информативностью о температурной области работоспособности и склонности к старению из-за конструктивных особенностей двигателей внутреннего сгорания, режимов и условий эксплуатации, степени форсирования и технического состояния. Поэтому при их выборе требуются стендовые или натурные испытания для обоснования ресурса.

2. Квалификационные методы испытания могут использоваться при контроле производства смазочных материалов и обосновании области их применения. Ввиду большой трудоемкости большинство из них не применяется при контроле состояния масел в процессе эксплуатации техники.

3. Современные методы оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов требуют оптимизации с целью обоснования методов пригодных для практического применения на производственных предприятиях с минимальными затратами и создания автоматизированной системы обработки диагностических параметров.

4. Для повышения надежности механических систем предлагается система контроля смазочных материалов в процессе эксплуатации техники на основе фотометрического метода определения термоокислительной стабильности и противозносных свойств.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

2.1 Моторное масло – как объект исследования

Влияние смазочного материала, как элемента трибосистемы, на ее надежность весьма существенно и определяется обоснованным выбором в соответствии с температурными и нагрузочными режимами. Основным функциональным назначением смазочного материала является снижение коэффициента трения посредством формирования на поверхностях трения граничных защитных адсорбционных, хемосорбционных и модифицированных слоев, поглощение и отвод тепловой энергии, выделяемой в процессе работы, унос частиц износа из зоны контакта, что в конечном итоге способствует уменьшению износа узлов трения [39,40].

Все современные моторные масла состоят из базовой основы и присадок, улучшающих их свойства. По температурным пределам работоспособности они подразделяются на летние, зимние и всесезонные. В качестве базовых масел используют дистиллятные, остаточные компоненты и их смеси, а также синтетические продукты, поэтому по составу базового масла моторные масла делят на минеральные, синтетические и частично синтетические.

Основными требованиями, предъявляемыми к моторным маслам, являются: высокие моющие и диспергирующе-стабилизирующие свойства, отсутствие коррозионного воздействия на материалы деталей двигателя, стойкость к старению, пологость вязкостно-температурной характеристики, совместимость с материалами уплотнений, стабильность при транспортировании и хранении, малая вспениваемость при высоких и низких температурах, малая летучесть и низкий расход на угар [1].

В процессе работы двигателя внутреннего сгорания масла подвергаются интенсивному перемешиванию, что способствует их контакту с кислородом воздуха

и транспортированию его к поверхностям трения. Под воздействием высоких температур на поверхностях трения в присутствии кислорода воздуха масла разлагаются, окисляются и полимеризуются. Механизм окисления минеральных масел исследовался Н.И. Черножуковым и С.Е. Крейном [38, 41]. Авторами установлено, что окисление масел происходит по двум направлениям с образованием кислых и нейтральных продуктов. Кислые продукты усиливают коррозию металлов и интенсифицируют коррозионно-механическое изнашивание, а нейтральные загрязняют масляную систему и фильтры, нарушая режим смазки. Кроме того, образующиеся при сгорании топлива оксиды серы и азота взаимодействуют с металлами и ускоряют нагарообразование. Интенсивность этого процесса зависит не только от качества масла, но и воспламеняемости, вязкости и фракционного состава топлива.

Основное влияние на процесс образования нерастворимых продуктов старения оказывают условия работы двигателя, особенно температура, определяющая скорость окисления масла. При низких температурах процесс окисления замедляется, однако количество отложений на деталях увеличивается за счет продуктов неполного сгорания топлива. При высоких температурах хладагента двигателя топливо и вода испаряются интенсивнее, поэтому количество продуктов старения уменьшается, однако ускоряются процессы окисления.

Трибологические характеристики многих моторных масел нормированы стандартами и техническими условиями, предусматривающими испытание на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75. Однако оценка противоизносных и противозадирных свойств на машине трения не всегда адекватна фактическим свойствам в реальных условиях применения. Обычно противоизносные свойства оценивают по потере массы поршневых колец, задиру и питтингу кулачков и толкателей, линейному износу этих деталей и состоянию поверхностей трения. Поэтому в качестве объекта исследования выбраны моторные масла, как самые распространенные и работающие при высоких температурах сгорания топлива, в результате чего интенсивность окислительных процессов велика по сравнению со смазочными материалами, работающими в других агрегатах. Как эле-

мент конструкции двигателя моторное масло должно длительно и надежно выполнять свои функции, обеспечивая заданный ресурс двигателя при различных режимах нагрузки, соответствовать по своим свойствам термическим, механическим и химическим воздействиям, которым оно подвергается в смазочной системе и на поверхностях трения [42,43,44].

Однако влияние продуктов старения моторных масел при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания на их противоизносные свойства недостаточно изучены, более того, их влиянию на процессы, протекающие на площади фрикционного контакта, вообще мало уделялось внимания. Кроме того, предельное состояние работающих моторных масел, установленное по пробегу или наработке моточасов, недостаточно обоснованно. Ввиду отсутствия средств контроля не осуществляется периодическое наблюдение за состоянием эксплуатируемых масел, отсутствуют научно обоснованные критерии процессов окисления и триботехнических свойств. В этой связи разработка метода контроля процессов окисления и влияния их продуктов на противоизносные свойства является актуальной задачей, позволяющей сравнивать моторные масла по сопротивляемости окислению и изменению триботехнических свойств в зависимости от степени окисления, и тем самым повысить эффективность их использования.

2.2 Выбор моторных масел для исследования

Для проведения испытаний по контролю состояния товарных моторных масел в зависимости от степени окисления, влияния первичных и вторичных продуктов окисления на противоизносные свойства и соответствие заявленному производителем качеству, были выбраны моторные масла на минеральной, синтетической и смешанной основах, различных классов вязкости и групп эксплуатационных свойств, а именно:

- минеральные М-8Г₂, М-10Г_{2к}, Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, Utech navigator 15W-40 SG/CD;
- частично синтетические Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, Лукойл Люкс 5W-40

SJ/CF, THK Супер 5W-40 SL/CF, Ravenol TSI 10W-40 SM/CF;

- синтетические Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life.

Масла М-8Г₂ и М-10Г₂к изготавливаются на основе минеральных базовых масел с добавлением эффективной композиции присадок, предназначены для зимнего (М-8Г₂) и летнего (М-10Г₂к) применения в дизелях без наддува или с невысоким наддувом. Эксплуатационный класс по API: СС, класс вязкости по SAE: М-8Г₂-20; М-10Г₂к-30 [1].

Масло моторное Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC - всесезонное минеральное, предназначенное для применения в умеренной климатической зоне на всех типах бензиновых и безнаддувных дизельных двигателях легковых автомобилей, микроавтобусов и легких грузовиков[45].

Utech navigator 15W-40 SG/CD – масло на основе минерального базового масла высокой степени очистки. Предназначено для всесезонной эксплуатации в высокофорсированных бензиновых двигателях без наддува и в безнаддувных дизелях [46].

Моторное масло Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF является частично синтетическим маслом высшего класса, всесезонным, многофункциональным, разработано для бензиновых и дизельных двигателей, обладает исключительной текучестью при очень низких температурах окружающей среды. Предупреждает образования нагара, обладает высокими антиокислительными и вязкостными свойствами. Оптимизировано для работы при высоких нагрузках, обладает высокими моющими свойствами. Имеет термоокислительную стабильность, которая не даёт образоваться отложениям и шлаку в двигателе автомобиля и обеспечивает его надёжную работу [47].

Масло Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF представляет всесезонное моторное масло на частично синтетической основе с высокими эксплуатационными характеристиками [45]. Соответствует последним требованиям к моторным маслам ведущих производителей автомобилей. Рекомендуются к применению в форсированных бензиновых двигателях с турбонаддувом и дизелях последнего поколения для за-

рубежных легковых автомобилей и легких грузовиков выпуска после 1993г. Обеспечивает высокий ресурс и чистоту двигателей любых современных моделей российского и зарубежного производства. Рекомендуется в качестве основного сорта масел для двигателей иномарок, собираемых в России.

ТНК Супер 5W-40 SL/CF заявлено производителем как частично синтетическое моторное масло, предназначенное для бензиновых и дизельных двигателей всех современных легковых отечественных и большинства зарубежных автомобилей [48]. Изготавливается на основе смеси минеральных и синтетических базовых основ с использованием патентованных импортных технологий и компонентов.

Ravenol TSI 10W-40 SM/CF, в соответствии с данными производителя [49], полусинтетическое моторное масло высшего качества, изготовленное в Германии, на основе высокоиндексного гидрокрекингового базового масла с добавлением полиальфаолефинов. Содержание синтетических компонентов менее 30%. Надёжно защищает двигатель при экстремально тяжёлых условиях эксплуатации, включая эксплуатацию автотранспорта в городском цикле «старт-стоп». Вязкостный интервал 10W-40 позволяет применять полусинтетическое моторное масло Ravenol TSI 10W-40 круглогодично, включая холодный период. Предназначено для современных многоклапанных с гидрокомпенсаторами бензиновых и дизельных двигателей (включая турбированные) легковых автомобилей и микроавтобусов.

Agip TECSINT 5W-30 SJ/CF - полностью синтетическое всесезонное моторное масло последнего поколения, специально разработанное для новейших моделей бензиновых и дизельных двигателей (многоклапанных, оборудованных турбонаддувом и катализатором). Масло создано на основе высококачественных синтетических полиальфаолефиновых базовых масел, повышающих моющие свойства, что позволяет удерживать во взвешенном состоянии продукты сгорания и окисления до очередной замены, не позволяя им превращаться во вредные отложения внутри двигателя, и специально подобранного высокотехнологичного пакета присадок последнего поколения. Благодаря использованию высококаче-

ственных синтетических базовых масел Agip TECSINT 5W-30 SJ/CF имеет очень низкую испаряемость [50].

Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF представляет собой синтетическое моторное масло, обеспечивающее длительный срок службы двигателей в автомобилях различных типов и годов выпуска, а также повышенный уровень их защиты в широком диапазоне температур. Масло Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF разработано таким образом, чтобы предоставить дополнительный уровень защиты по сравнению с минеральными и полусинтетическими маслами. Производитель рекомендует применять Mobil Super 3000 5W-40 тогда, когда регулярно возникают сложные условия вождения, чтобы предотвратить повреждения от интенсивных и частых нагрузок.

Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life производится на основе фирменной смеси «ultra high performance synthetic» и тщательно сбалансированного пакета присадок. Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life предназначено для сведения к минимуму износа, защите внутренних деталей двигателя от образования шлама и лака в условиях высокой нагрузки. Масло работает при экстремальных температурах и помогает держать двигатель в идеальном состоянии. Это моторное масло рекомендуется использовать для современных автомобилей [47].

Самую низкую группу эксплуатационных свойств по классификации API для бензиновых двигателей имеет масло Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, самую высокую Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Испытания моторных масел позволят оценить объективность производителей данных масел при назначении групп эксплуатационных свойств, определить потенциальный ресурс и зависимость противоизносных свойств от степени их окисления.

2.3. Средства измерения

К средствам измерения относятся: фотометрическое устройство и малообъ-

емный вискозиметр.

2.3.1 Фотометрическое устройство

Фотометрическое устройство предназначено для оценки загрязненности гидравлических, промышленных, моторных и трансмиссионных масел. [51]. Показателем оценки масел является коэффициент поглощения светового потока.

Фотометрическое устройство состоит из оптического 1 и измерительного 2 блоков (рисунок 2.1). Оптический блок предназначен для прямого фотометрирования масел различной прозрачности. Фотометрическая кювета предназначена для создания фотометрируемого слоя масла заданной толщины. В таблице 2.1 приведена техническая характеристика фотометра.

Прибор пропускает стабилизированный монохроматический световой поток через слой исследуемого масла на фотоприемник. В зависимости от концентрации механических примесей и продуктов окисления масла на фотоприемник падают различные световые потоки, пропорциональные концентрации. Чем больше примесей, тем ниже показания прибора.



Рисунок 2.1 – Фотометрическое устройство: 1 – блок измерения; 2 - фотометрическая кювета.

Степень окисления моторных масел оценивалась по коэффициенту поглощения монохроматического светового потока K_{Π}

$$K_{\Pi} = \frac{300 - \Pi}{300}, \quad (2.1)$$

где Π – показания фотометра, регистрирующего световой поток, прошедший через заданную толщину масляного слоя, мкА; 300 – показания фотометра при отсутствии в кювете масляного слоя, мкА.

Таблица 2.1 – Техническая характеристика фотометрического устройства

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
Диапазон измерения	мкА	0...300
Фотоэлемент	-	Сф 2-1А
Погрешность измерения	%	±2,0
Время одного измерения с учетом вспомогательного	мин	3,0±0,1
Время непосредственного измерения	с	5,0±0,1
Толщина фотометрируемого слоя при фотометрировании моторных масел	мм	0,03-0,15
Габаритные размеры, (Д x Ш x В) мм		225x40x105
Масса, кг		1,2

Браковочные показатели по механическим примесям устанавливаются экспериментально для каждого сорта масла и типа двигателя.

2.3.2 Малообъемный вискозиметр

Вискозиметр (рисунок 2.2) предназначен для измерения вязкости малых объемов нефтепродуктов при 100 и 50°C. Работа прибора заключается в измерении времени погружения плоского диска в нефтепродукт при заданной его температуре на заданную глубину под собственным весом. Измерительная схема прибора предусматривает за 1°C до заданной температуры отключение нагревателя и включение с помощью электромагнитной системы коромысла с диском для перемешивания жидкости в стакане. Перемешивание осуществляется до тех пор, пока температура жидкости максимально не приблизится к заданной, после чего коромысло фиксируется в верхнем положении, а при достижении заданной температу-

ры (100 или 50°C) электромагнитная система обесточивается, и диск под собственным весом опускается. Время его опускания зависит от вязкости жидкости.

Вискозиметр состоит из механического и электронного блоков расположенных соответственно в верхней и нижней частях модуля.



Рисунок 2.2 – Вискозиметр

Техническая характеристика представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Техническая характеристика вискозиметра

Наименования параметров	Единицы измерения	Значения параметров
Напряжение питания	В	12±0,5/220
Максимальная мощность нагревателя	Вт	42±1,0
Погрешность измерения	%	±2
Объем испытываемого масла	мл	8,5±0,1
Температура измерения вязкости: моторных и трансмиссионных масел гидравлических и промышленных масел	°С	100 50
Время одного измерения	мин	5±1
Габариты прибора	мм	100*160*260±2
Масса прибора	кг	3,0±0,1

Кинематическая вязкость определяется по формуле

$$\eta = \frac{(I - K)}{C}, \quad (2.2)$$

где η - вязкость исследуемой жидкости, мм²/с (сСт); I - время опускания измерительного диска; K и C - постоянные коэффициенты, зависящие от конструктивных особенностей прибора (диаметр диска, глубина погружения диска, диаметр стакана), которые устанавливаются экспериментально при тарировке.

2.3.3 Вспомогательные средства измерения

В качестве вспомогательных средств измерения используются электронные весы, оптический микроскоп «Альтами МЕТ 1М» и стандартная центрифуга (8000 об/мин).

2.4. Средства испытания

2.4.1 Прибор для определения термоокислительной стабильности

Прибор для определения термоокислительной стабильности (рисунок 2.3) состоит из механического и измерительного блоков. Механический блок состоит из стеклянного стакана, на котором установлен нагреватель, изолированный от внешней среды теплоизоляцией и установленный в корпусе, выполненным с ручкой. Вывод нагревателя через штекер соединен с измерительным блоком. Стакан с испытываемым образцом устанавливается на платформе, выполненной на шарнирах с возможностью его снятия. В верхнем положении платформа фиксируется стопором, при этом в стакан погружается термopара и стеклянная мешалка, соединенная с микродвигателем.

Измерительный блок состоит из терморегулятора ТРМ-200, источников питания нагревателя и микродвигателя.



Рисунок 2.3 –Прибор для определения термоокислительной стабильности смазочных масел.

Техническая характеристика прибора представлена в таблице 2.3

Таблица 2.3 – Техническая характеристика прибора для определения термоокислительной стабильности смазочных материалов

Наименования параметров	Единицы измерения	Значения параметров
Напряжение питания	В	Переменные 220±10%
Потребляемая мощность	ВА	300±2%
Диапазон рабочих температур	°С	до 200±1%
Датчик измерения температуры	-	Хромель-копель
Скорость вращения мешалки	об/мин	Регулируемая до 300±5%
Масса испытуемого масла	грамм	100±0,1
Погрешность измерения	%	±2,0
Габариты: д×ш×в	мм	450×300×200
Масса	кг	5,5

На передней панели измерительного блока установлены органы управления: задания температуры испытания, частоты вращения мешалки и кнопки контроля этих параметров. Температура испытуемого масла измеряется с помощью тер-

мопары хромель-копель. Необходимая температура задается дискретно и поддерживается автоматически.

2.4.2 Трёхшариковая машина трения

Трёхшариковая машина трения (рисунок 2.4) предназначена для исследования противоизносных свойств трущихся материалов и масел [52]. Техническая характеристика машины трения представлена в таблице 2.4.

Данная машина трения (рисунок 2.5) состоит из станины 1 и установленной на ней вертикально плиты 2.



Рисунок 2.4 – Трёхшариковая машина трения

На плите шарнирно установлены три кронштейна 3, в которых установлены съемные держатели 4 контрообразцов (шаров) 5, и узлы нагружения 6, выполненные с горизонтальными платформами для установки нагрузки. Центральный контрообразец установлен вертикально, а боковые под углом 45° и выполнены со смещением, так, чтобы каждый контрообразец контактировал с образцом (цилиндром) 10 по индивидуальной дорожке трения. Машина трения снабжена ванночкой 7 для испытываемого масла, которая размещена в термостате 8, соединенным

с блоком 9 установки и автоматического поддержания температуры испытания. Стабилизированное напряжение подводится к испытываемому образцу 10, установленному на приводе вращения, соединенного через центральный контрообразец с блоком питания, и устройству регистрации тока, протекающего через испытываемый образец и граничный слой смазочного материала.

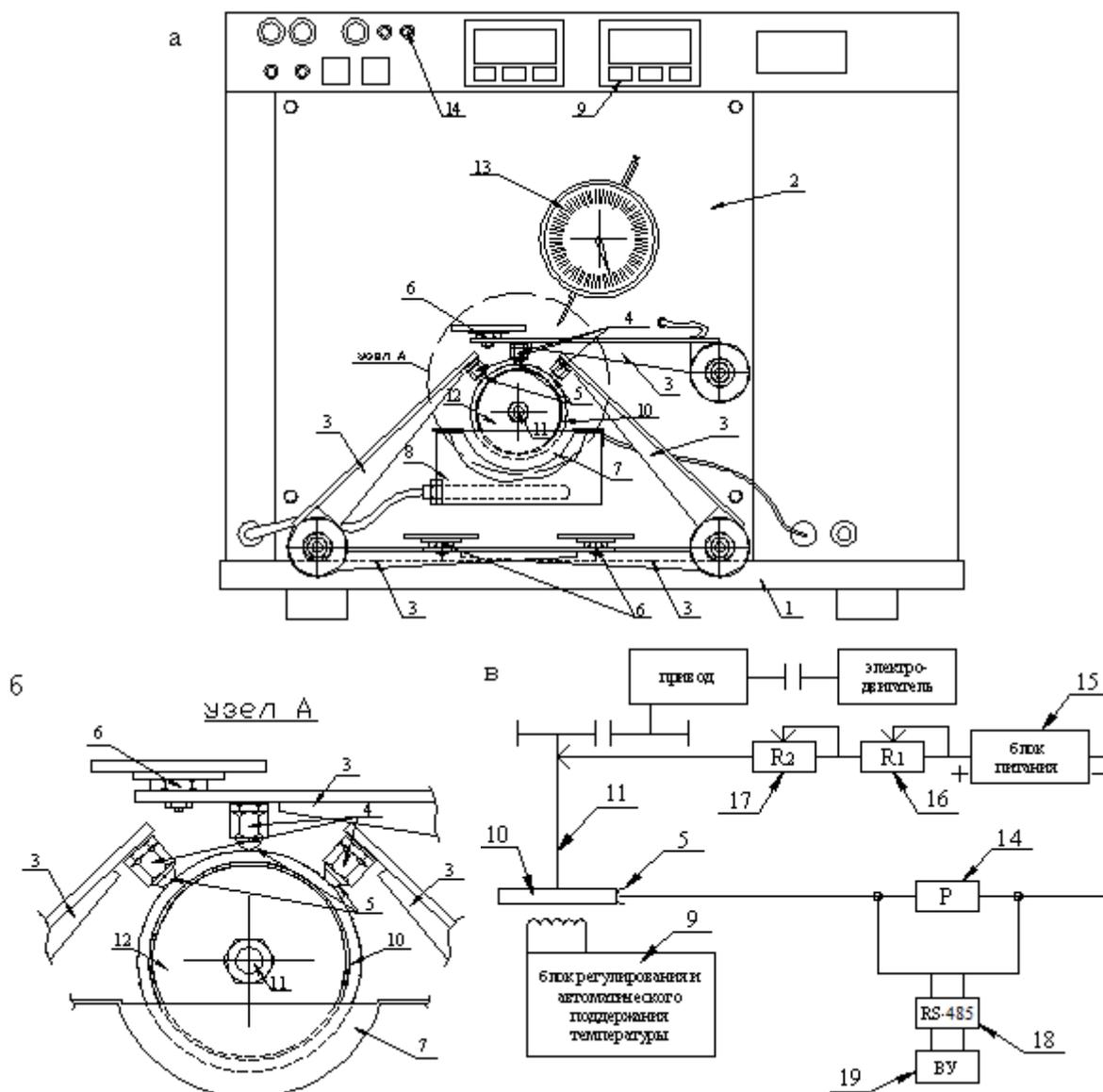


Рисунок 2.5– Трехшариковая машина трения со схемой трения «шар-цилиндр»: а - общий вид; б – детализировка трибосопряжения; в – электрическая схема

Устройство работает следующим образом. На вал 11 электродвигателя в держатель 12 закрепляют образец 10 и с помощью микрометра 13 контролируют радиальное биение, в держателях 4 (рисунок 2.5, б) устанавливают контрообразцы 5,

и величину тока подаваемого через центральный кронштейн 3 на контробразец 5 с помощью регулятора величины тока 14 (рисунок 2.5, в), и заливают испытываемое масло в ванночку 7, включают привод вращения образца 10 и при наборе установленной температуры масла кронштейны 3 опускают на образец 10 и прикладывают нагрузку. Во время трения от блока питания 15, через потенциометры 16 (R1) и 17 (R2) и центральный кронштейн 3 с контробразцом 5 на образец 10 подается ток, величина которого через блок 18 регистрации преобразуется (RS-485) и записывается в виде диаграммы изменения тока на вычислительном устройстве 19 (ВУ).

Таблица 2.4 – Техническая характеристика трехшариковой машины трения

Наименование параметров	Единицы измерения	Значение параметров
тип пары трения	-	шар-цилиндр
диаметр шарика	мм	9,5
диаметр цилиндра	мм	80
скорость вращения цилиндра	м/с	0,68
нагрузка на шарики	Н	0-40
ток фрикционного контакта	мкА	0-100
объем пробы масла	мл	15
температура масла	°С	0-100
габариты прибора д×ш×в	мм	500×460×400
масса прибора	кг	72

2.5 Методика контроля моторных масел на термоокислительную стабильность

Стойкость смазочных масел к окислению определяет их антиокислительные свойства. Высокая интенсивность окисления происходит на поверхностях, нагретых до высоких температур (100-200°С). Испытания на термоокислительную стабильность проводились на специально разработанном приборе, имитирующем процессы окисления в условиях эксплуатации моторных масел в двигателях внутреннего сгорания.

Методика исследования на термоокислительную стабильность проводилась следующим образом: проба масла массой (100±0,1г) заливалась в прибор для

определения термоокислительной стабильности, в котором она термостатировалась при температуре 180°C с перемешиванием мешалкой с частотой вращения 300 ± 2 об/мин. Для исключения влияния металлов на окислительные процессы стакан для пробы масла и мешалка изготовлены из стекла, а частота вращения мешалки оптимизирована для достижения максимальной скорости окисления не допуская при этом разбрызгивание пробы масла. Время испытания составляло 8 час, после каждых 8-ми часов проба окисленного масла взвешивалась для определения массы испарившегося масла, отбирались пробы для фотометрирования и измерения вязкости. Затем отобранные пробы сливались в прибор, и измерялась повторно масса окисленного масла, которая подвергалась повторному окислению. Фотометрирование окисленных масел проводилась прямым фотометрированием при толщине фотометрированного слоя 2мм. Продолжительность испытаний определялась временем достижения коэффициента поглощения светового потока значений, равных $0,7 \div 0,8$ ед. Затем строились графические зависимости коэффициента поглощения светового потока, вязкости и испаряемости от времени окисления, по которым сравнивались испытываемые масла и определялись более термостойкие.

2.6. Методика контроля противоизносных свойств термоокисленных масел

Продукты окисления моторных масел оказывают существенное влияние на электрические свойства фрикционного контакта и механохимические процессы, протекающие на нем. Для изучения и контроля противоизносных свойств масел необходимо выявить это влияние посредством испытания термоокисленных моторных масел на машине трения.

Для проведения испытаний отбиралась дополнительная проба окисленного масла массой 15г для исследования на машине трения, а проба масла в стакане прибора для определения термоокислительной стабильности доливалась товарным маслом до первоначальной массы ($100 \pm 0,1$ г).

Параметры трения составили: нагрузка 13Н, скорость скольжения 0,68м/с, температура масла в объеме - 80°С, время испытания - 2 часа.

В качестве образцов приняты шар диаметром 9,5мм от шарикоподшипника № 204 ГОСТ 8338 и обойма роликового подшипника 424-16 ГОСТ 8328 диаметром 80мм, материал образцов сталь ШХ15. Отличительной особенностью машины трения является контакт трех шаров с поверхностью обоймы по индивидуальным дорожкам трения, а для исследования процессов, протекающих на фрикционном контакте, через один из шаров пропускался постоянный ток от внешнего стабилизированного источника питания 3В. Ток, протекающий через фрикционный контакт, посредством преобразователя передавался на компьютер для записи в виде диаграммы. Противозносные свойства оценивались по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах. Величина тока (100мкА) задавалась при статическом положении образцов. По диаграммам записи тока определялись продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций, а по коэффициенту электропроводности время формирования защитных граничных слоев на площади фрикционного контакта. По полученным параметрам проводился поиск критериев оценки противозносных свойств исследуемого масла.

2.7. Методика обработки результатов исследования

Достоверность показаний приборов и сопоставимость экспериментальных данных по определению коэффициента поглощения светового потока, вязкости и испаряемости проводилась по трем опытам на масле Лукойл Супер Universal 10W-40 SF/CC. При этом определялась абсолютная и относительная погрешности [53-55]. Для обработки результатов исследования использовалась лицензионная программа «Advanced Grapher», предусматривающая определение среднего квадратичного отклонения, коэффициента корреляции, коэффициента регрессии и средней погрешности аппроксимации.

Средняя квадратичная ошибка для оценки величины случайной ошибки

рассчитана по формуле :

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum(\bar{X} - X_i)^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

где n – число наблюдений; \bar{X} - среднее арифметическое значение; X_i - результаты наблюдений.

Среднее значение каждого показателя определялось как среднее арифметическое из полученных результатов:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (2.4)$$

Абсолютная погрешность ΔX_i каждого прибора определялась как разность между средним арифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при измерении:

$$\Delta X_i = |\bar{X} - X_i|. \quad (2.5)$$

Относительная погрешность ε определяется как отношение:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta X_i}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (2.6)$$

Для характеристики величины случайной ошибки установим доверительный интервал и величину доверительной вероятности, которая позволит оценить степень надежности полученного результата. При измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью $\alpha=0,95$, которой соответствует доверительный интервал в долях $\omega=2,0$. Поэтому для каждого измеренного показателя при различных температурах испытания доверительный интервал $\Delta\tau_{\bar{X}}$ определяется по формуле:

$$\Delta\tau_{\bar{X}} = S_n \cdot \omega. \quad (2.7)$$

Статистические данные обработки результатов испытаний сведены в таблицу 2.5, из которой следует, что в доверительные интервалы укладываются 95% ре-

зультатов измерений.

Таблица 2.5 – Статистические данные обработки результатов испытания моторного масла Лукойл Супер Universal 10W-40 SF/CC на термоокислительную стабильность.

Параметры	Значения
Коэффициент поглощения светового потока, K_{Π}	
Опыт 1	0,643
Опыт 2	0,603
Опыт 3	0,633
Среднее арифметическое значение K_{Π} , \bar{X}	0,626
Средняя квадратичная погрешность, S_n	0,0384
Средняя относительная погрешность, %	2,7
Доверительный интервал, $\Delta\tau_{\bar{X}}$	0,077
Коэффициент корреляции	0,9994
Коэффициент испаряемости, K_G	
Опыт 1	0,082
Опыт 2	0,089
Опыт 3	0,085
Среднее арифметическое значение K_G , \bar{X}	0,0853
Средняя квадратичная погрешность, S_n	0,0035
Средняя относительная погрешность, %	2,8
Доверительный интервал, $\Delta\tau_{\bar{X}}$	0,007
Коэффициент корреляции	0,993
Коэффициент относительной вязкости, K_{μ}	
Опыт 1	0,94
Опыт 2	0,93
Опыт 3	0,94
Среднее арифметическое значение K_{μ} , \bar{X}	0,937
Средняя квадратичная погрешность, S_n	0,0058
Средняя относительная погрешность, %	0,5
Доверительный интервал, $\Delta\tau_{\bar{X}}$	0,012
Коэффициент корреляции	0,948

2.8. Выводы по второй главе

1. Разработанная комплексная методика контроля термоокислительной стабильности и противоизносных свойств смазочных масел с применением простых средств контроля позволяет сравнивать масла по таким показателям, как: коэффи-

циент поглощения светового потока, характеризующий интенсивность окислительного процесса, вязкость, диаметр пятна износа, суммарное время пластической и упругопластической деформаций и оценить влияние продуктов окисления на противоизносные свойства и процессы, протекающие на фрикционном контакте.

2. Разработанная трехшариковая машина трения, позволяет определить противоизносные свойства как товарных, так и окисленных масел различного назначения и базовых основ, получить дополнительную информацию о процессах, протекающих при формировании фрикционного контакта.

3. Определены погрешности измерительных средств, на основе которых принято решение по двукратному проведению испытаний одного и того же масла, что обеспечивало достаточную точность полученных результатов.

4. Разработанный метод контроля товарных масел различных базовых основ позволяет получить дополнительную информацию, использование которой дает возможность обосновать критерии термоокислительной стабильности и противоизносных свойств окисленных масел, осуществлять обоснованный их выбор для двигателей внутреннего сгорания различной степени форсирования и идентифицировать их соответствие группам эксплуатационных свойств.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

3.1 Результаты исследования минеральных моторных масел

Для проведения исследований механизма окисления и влияние его продуктов на противоизносные свойства минеральных моторных масел выбраны следующие масла: М-8Г₂, М-10Г₂к, Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, Utech navigator 15W-40 SG/CD, характеристики которых приведены в разделе 2.2.

Исследование масел проводилось в два этапа по методике, приведенной в разделе 2. На первом этапе определялась термоокислительная стабильность масел при температуре 180°C, на втором оценивались изменения противоизносных свойств масел при их окислении.

Термоокислительная стабильность является комплексным показателем, который определялся по коэффициенту поглощения светового потока при фотометрировании окисленного масла, испаряемости и изменению вязкости.

На рисунке 3.1 представлены зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления масел при температуре 180°C с перемешиванием мешалкой с частотой вращения 300±2 об/мин. После каждых 8 –ми часов проба окисленного масла взвешивалась, определялась масса испарившейся части масла, отбирались пробы для измерения вязкости и фотометрирования для определения коэффициента поглощения светового потока. Фотометрирование производилось при толщине фотометрируемого слоя 2мм, продолжительность испытаний определялась временем достижения коэффициентом поглощения светового потока значений $K_{\Pi}=0,7...0,8$ ед.

Согласно полученным данным (рисунок 3.1) зависимости коэффициента K_{Π} от времени испытания имеют два линейных участка, вызванных образованием продуктов различной оптической плотности [56]. Первый участок зависимости до изгиба характеризует увеличение концентрации первичных (растворимых) продуктов окисления, а второй - образование вторичных (гелеобразных) продуктов с

большей оптической плотностью.

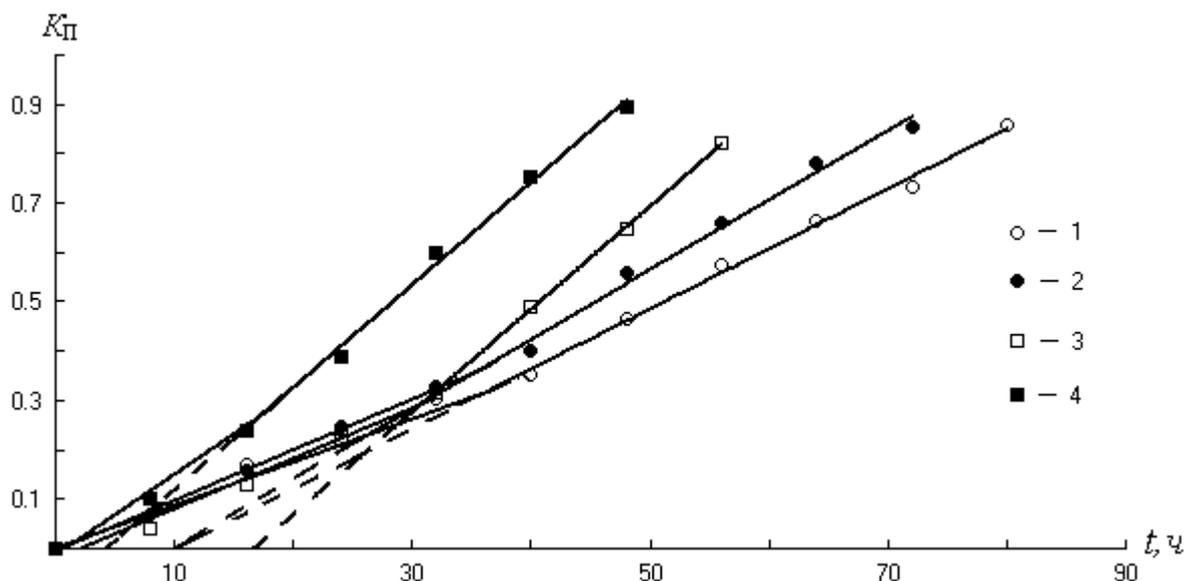


Рисунок 3.1 - Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания моторных масел: 1-М-8Г₂, 2-М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Наличие вторичных продуктов установлено центрифугированием окисленных проб при $K_{П} > 0,5$ ед. Начало образования вторичных продуктов определяется продлением второго участка зависимости $K_{П} = f(t)$ до пересечения с осью абсцисс. Время начала процесса окисления и образования вторичных продуктов с момента начала испытания приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Данные по времени начала окисления и образования вторичных продуктов.

Марка масла	Время начала окисления масел, ч	Время начала образования вторичных продуктов окисления, ч
М-8Г ₂	0,11	10,0
М-10Г ₂ к	0,5	10,0
Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC	2,0	17,5
Utech navigator 15W-40 SG/CD	0,87	4,5

По данным таблицы 3.1 видно, что наибольшая область сопротивления

окислению и образованию вторичных продуктов установлена для масла Лукойл Стандарт 10W-40 – 2,0ч и 17,5ч соответственно. В данных испытаниях масло Лукойл Стандарт 10W-40 показало наилучшие результаты по стойкости к окислению и образованию вторичных продуктов. Время достижения коэффициентом поглощения светового потока значения 0,8ед для исследованных масел составило: 75 ч – М-8Г₂; 67,1 ч – М-10Г₂к; 57,5ч - Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC и 44,5ч - Utech navigator15W-40 SG/CD, т.е. наибольший потенциальный ресурс установлен для масла М-8Г₂. Масла Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC и Utech navigator15W-40 SG/CD относятся к разным группам и различаются ресурсом, при том, что масло Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, относящееся к низшей группе SF, превосходит масло с высшей классификацией Utech navigator15W-40 SG/CD.

Процесс окисления описывается кусочно-линейными уравнениями для всех участков и масел [57]:

$$K_{\Pi} = a(t - t_{\text{H}}), \quad (3.1)$$

где a - скорость окисления, ч⁻¹; t - время испытания, ч; t_{H} - время начала процесса окисления или образования вторичных продуктов, ч.

Регрессионные уравнения процессов окисления для исследуемых масел сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Регрессионные уравнения процесса окисления:

Марка масла	Первый участок	Второй участок	Потенциальный ресурс (при $K_{\Pi} = 0,8\text{ед}$), ч
М-8Г ₂	$K_{\Pi} = 0,009(t-0,11)$	$K_{\Pi} = 0,012(t-0,10)$	75
М-10Г ₂ к	$K_{\Pi} = 0,01(t-0,5)$	$K_{\Pi} = 0,014(t-0,10)$	67,1
Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC	$K_{\Pi} = 0,01(t-2)$	$K_{\Pi} = 0,02(t-17,5)$	57,5
Utech navigator 15W-40 SG/CD	$K_{\Pi} = 0,016(t-0,87)$	$K_{\Pi} = 0,02(t-4,5)$	44,5

Вязкость окисленных минеральных масел (рисунок 3.2) оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_{μ} , определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного (исходного).

Установлено, что вязкость масла Лукойл Стандарт 10W-40 (кривая 3) максимально уменьшилась за 56 часов испытания на 10% по отношению к товарному маслу, что указывает на стабильность вязкости при окислении и хорошие пусковые свойства масла в холодный период эксплуатации двигателя.

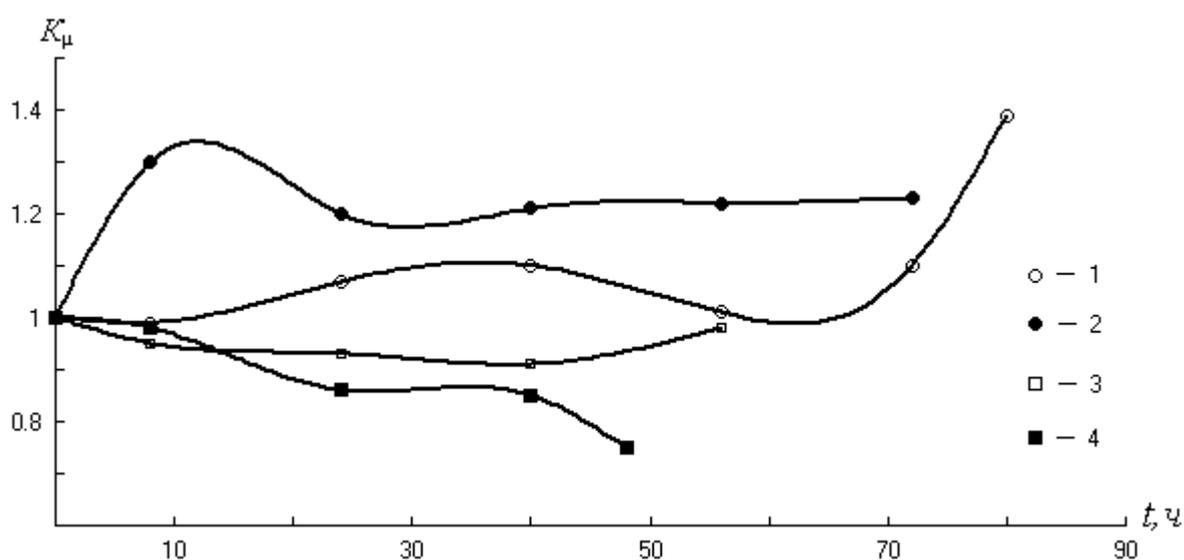


Рисунок 3.2 - Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени испытания моторных масел: 1-М-8Г₂, 2- М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Вязкость окисленного масла Utech navigator 15W-40 (кривая 4) за 48 часов испытания уменьшается на 25%, а масла М-8Г₂ (кривая 1) колеблется и за 60 часов испытания уменьшилась на 10%, а после 80 часов увеличилась на 40%, поэтому предел его работоспособности составляет 75 часов до нормативного изменения на 30%. Вязкость окисленного масла М-10Г₂к (кривая 2) изменяется по синусоидальному закону и после 72 часов испытания увеличилась на 20% по сравнению с товарным.

Испаряемость минеральных моторных масел является важным показателем эксплуатационных свойств. На рисунке 3.3 приведены результаты испытаний минеральных моторных масел. Наибольшая испаряемость установлена для масла

Utech navigator 15W-40 SG/CD (кривая 4), наименьшая для масла М-10Г₂к (кривая 2). Кроме того, точки на оси ординат указывают на начальное содержание в маслах легких фракций и воды. Так, например, после 48 часов термостатирования испаряемость масел составила: М-8Г₂ – 6,8г; М-10Г₂к – 4,8г; Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC – 10г; Utech navigator 15W-40 SG/CD – 10,5г.

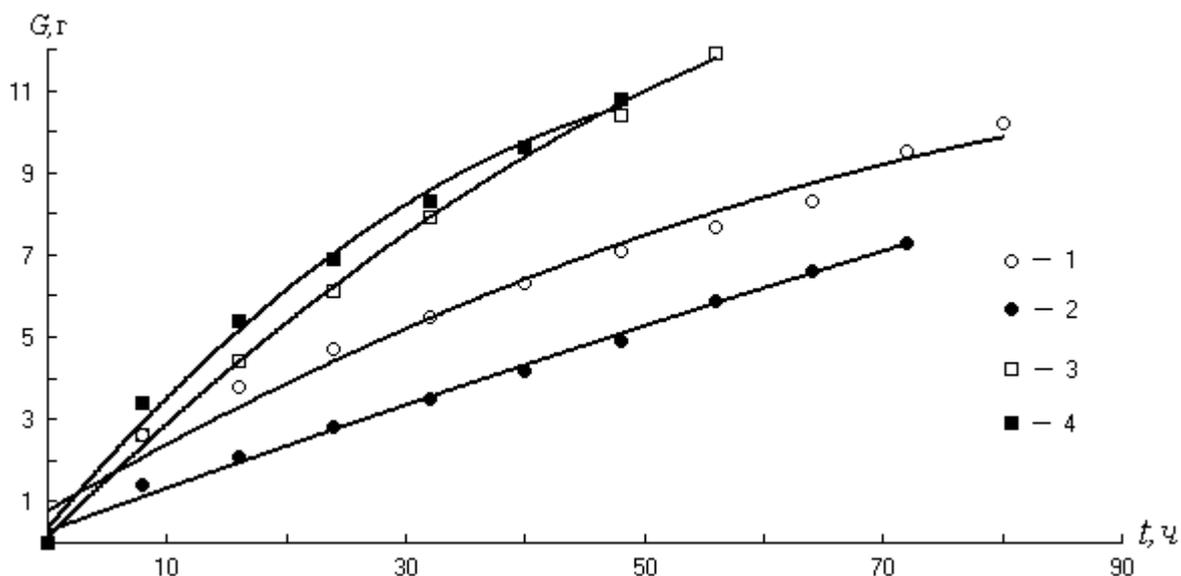


Рисунок 3.3 - Зависимости испаряемости от времени испытания моторных масел: 1-М-8Г₂, 2-М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W - 40 SF/CC, 4 - Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Зависимости испаряемости от времени окисления описываются полиномом второго порядка:

$$G = at^2 + bt + c, \quad (3.2)$$

где a и b – соответственно коэффициенты, характеризующие ускорение испаряемости и ее среднюю скорость; c – коэффициент, характеризующий концентрацию легких фракций и воды в товарном масле.

Регрессионные уравнения испаряемости для минеральных масел имеют вид:

$$\text{М-8Г}_2 \quad G = -0,068 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,17t + 0,8 \quad (3.3)$$

$$\text{М-10Г}_2\text{к} \quad G = -0,012 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,1t + 0,3 \quad (3.4)$$

$$\text{Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC} \quad G = -0,0015t^2 + 0,29t + 0,14 \quad (3.5)$$

$$\text{Utech navigator 15W-40 SG/CD} \quad G = -0,003t^2 + 0,34t + 0,36 \quad (3.6)$$

Коэффициент корреляции изменяется от 0,98 до 0,99.

Для оценки влияния продуктов окисления на вязкость и испаряемость (рисунки 3.4, 3.5) минеральных масел исследована связь этих параметров с коэффициентом поглощения светового потока. Установлено, что вязкость минеральных масел Лукойл Стандарт 10W-40 и Utech navigator 15W-40 (кривые 3 и 4) с увеличением коэффициента K_{Π} понижается, а для масла М-8Г2 и М-10Г₂к она резко увеличивается при значениях коэффициента $K_{\Pi} > 0,8$ ед (на 30%), то есть вязкость зависит от состава продуктов окисления и только от концентрации вторичных продуктов окисления.

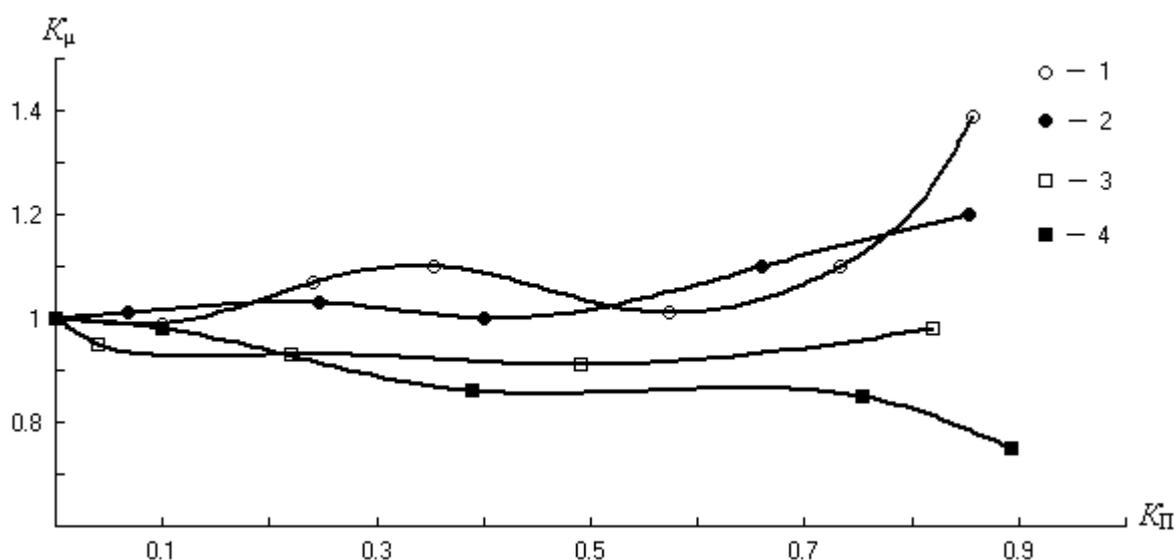


Рисунок 3.4 - Зависимости коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока моторных масел: 1-М-8Г₂, 2- М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Испаряемость масел (рисунок 3.5) в начальный период окисления увеличивается более интенсивно, чем оптические свойства. Это явление происходит в период образования первичных продуктов окисления. С появлением вторичных продуктов окисления испаряемость минеральных масел уменьшается по сравнению с изменениями коэффициента поглощения светового потока, т.е. в этот период большая часть тепловой энергии поглощается продуктами окисления – происходит перераспределение тепловой энергии.

Регрессионные уравнения зависимостей испаряемости от коэффициента

поглощения светового потока имеют вид для масел:

$$\text{M-8}\Gamma_2 \quad G = -8,98 K_{\Pi}^2 + 18,5 K_{\Pi} + 0,6 \quad (3.7)$$

$$\text{M-10}\Gamma_2\text{к} \quad G = -2,9 K_{\Pi}^2 + 10,3 K_{\Pi} + 0,4 \quad (3.8)$$

$$\text{Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC} \quad G = -16,4 K_{\Pi}^2 + 26,2 K_{\Pi} + 0,9 \quad (3.9)$$

$$\text{Utech navigator 15W-40 SG/CD} \quad G = -9,7 K_{\Pi}^2 + 19,4 K_{\Pi} + 0,8 \quad (3.10)$$

Коэффициент корреляции изменяется от 0,98 до 0,99.

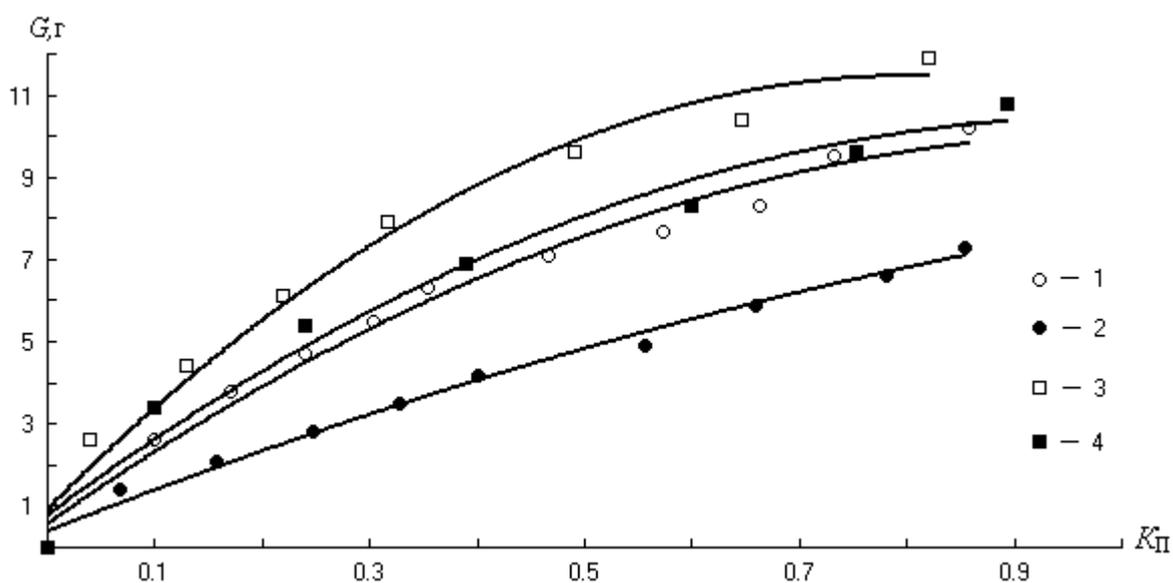


Рисунок 3.5 - Зависимости испаряемости от коэффициента поглощения светового потока моторных масел: 1-М-8 Γ_2 , 2- М-10 Γ_2 к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Сравнивая зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания (рисунок 3.1) и испаряемости от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 3.5) видно, что скорость испарения замедляется, когда образуются вторичные продукты окисления при $K_{\Pi} > 0,3$ ед. На основании исследований связи коэффициента поглощения светового потока с вязкостью и испаряемостью показано, что только испаряемость увеличивается с увеличением коэффициента поглощения светового потока, а вязкость изменяется из-за концентрации продуктов окисления. В этой связи можно утверждать, что при термостатировании минеральных моторных масел термоокислительная стабильность их должна определяться показателем оптических свойств и испаряемостью и оцениваться

коэффициентом $E_{\text{ТОС}}$, определяемым суммой коэффициентов поглощения светового потока $K_{\text{П}}$ и испаряемости $K_{\text{Г}}$ [58]:

$$E_{\text{ТОС}} = K_{\text{П}} + K_{\text{Г}}, \quad (3.11)$$

$$K_{\text{Г}} = m / M, \quad (3.12)$$

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

В этой связи физический смысл показателя термоокислительной стабильности заключается в том, что он характеризует сопротивляемость смазочного материала окислению и испарению, поэтому, чем меньше значение этого показателя, тем выше термоокислительная стабильность данного смазочного материала при заданной температуре и времени испытания.

Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности $E_{\text{ТОС}}$ от времени испытания являются кусочно-линейными функциями (рисунок 3.6), имеющими изгиб при некотором значении $E_{\text{ТОС}}$, что указывает на образование при окислении двух видов продуктов с различными оптическими свойствами и испаряемостью.

Для сравнения минеральных масел по коэффициенту термоокислительной стабильности предложен потенциальный ресурс, определяемый временем достижения коэффициента $E_{\text{ТОС}}$ значения, равного 0,9ед. Для минеральных масел он составил: М-8Г₂ – 76,7ч; М-10Г₂к – 69,3ч; Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC – 52,7ч; Utech navigator 15W-40 SG/CD – 41ч.

Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления описываются кусочно-линейными функциями:

$$E_{\text{ТОС}} = a(t - t_{\text{Н}}), \quad (3.13)$$

где a – коэффициент, характеризующий среднюю скорость образования первичных или вторичных продуктов окисления, t – время окисления, ч; $t_{\text{Н}}$ –

время начала образования первичных или вторичных продуктов окисления, ч.

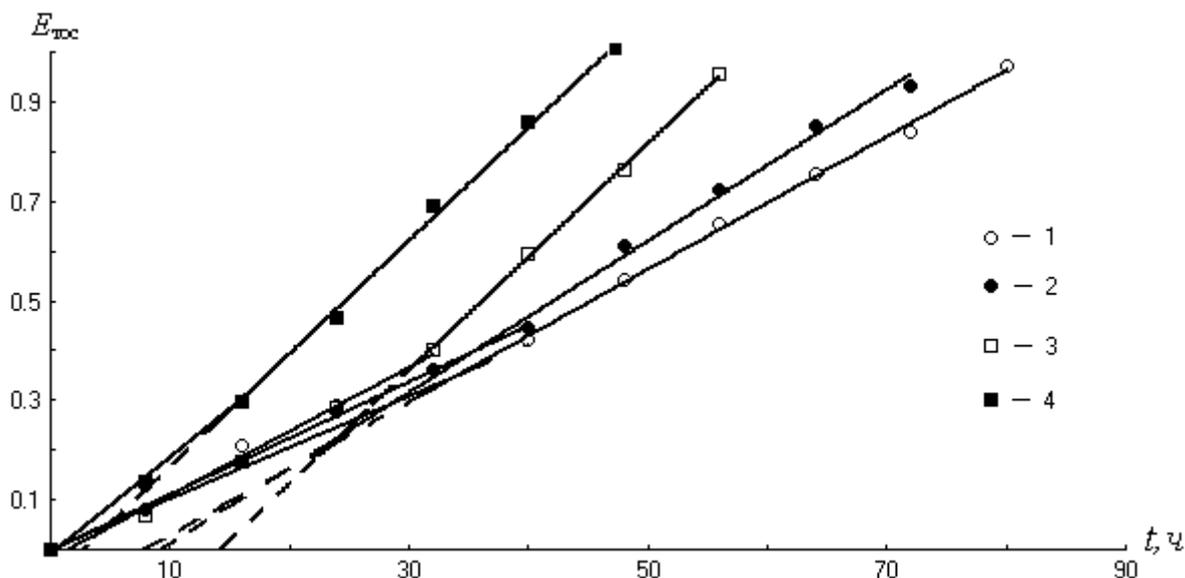


Рисунок 3.6 - Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания моторных масел: 1-М-8Г₂, 2- М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Регрессионные уравнения первого и второго участков зависимостей коэффициента термоокислительной стабильности для исследованных масел имеют вид:

	Первый участок	Второй участок	
М-8Г ₂	$E_{\text{ТОС}}=0,01(t-0,1)$	$E_{\text{ТОС}}=0,013(t-7,7)$	(3.14)

М-10Г ₂ к	$E_{\text{ТОС}}=0,011(t-0,18)$	$E_{\text{ТОС}}=0,015(t-9,3)$	(3.15)
----------------------	--------------------------------	-------------------------------	--------

Лукойл Стандарт10W-40 SF/CC	$E_{\text{ТОС}}=0,013(t-1,5)$	$E_{\text{ТОС}}=0,023(t-13,9)$	(3.16)
-----------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------

Utech navigator15W-40 SG/CD	$E_{\text{ТОС}}=0,019(t-0,47)$	$E_{\text{ТОС}}=0,023(t-2,6)$	(3.17)
-----------------------------	--------------------------------	-------------------------------	--------

Коэффициент корреляции – 0,98.

Согласно уравнений 3.14-3.17, наименьшая средняя скорость образования первичных продуктов окисления установлена для масла М-8Г₂, а наибольшая - масла Utech navigator15W-40 SG/CD. Область сопротивления окислению (начала образования первичных продуктов) наибольшая 1,5 часа установлена для масла Лукойл Стандарт10W-40 SF/CC.

Наибольшая средняя скорость образования вторичных продуктов окисления

$0,023\text{ч}^{-1}$ установлена для масел Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC и Utech navigator 15W-40 SG/CD, а наибольшее время начала их образования установлено также для масла Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC.

Для исследования противоизносных свойств окисленных минеральных моторных масел пробы отбирались при значениях коэффициента поглощения светового потока, равного 0,1; 0,2; ... 0,8 ед. Испытания проводились на трехшариковой машине трения со схемой «шар-цилиндр» [52] при постоянных параметрах: нагрузка в контакте 13Н; скорость скольжения 0,68 м/с; температура масла в объеме 80°C ; время каждого испытания 2 часа.

Через центральный шар пропускался ток от внешнего стабилизированного источника напряжения 3В величиной 100 мкА, который устанавливался при статическом положении образцов (шара и обоймы). При изнашивании величина тока изменялась вследствие пластической, упругопластической и упругой деформаций, протекающих на фрикционном контакте, а также механохимических процессов на поверхностях трения, под влиянием продуктов окисления. Величина тока посредством преобразователя RS-202-RS-485 записывалась на компьютер в виде диаграммы.

Величина износа измерялась при помощи микроскопа «Альтами МЕТ 1М» на трех шарах как среднеарифметическое значение диаметра пятна износа из двух опытов и выражалась в миллиметрах.

На рисунке 3.7 представлены зависимости параметра износа I от коэффициента поглощения светового потока K_{Π} .

Согласно данным (рис. 3.7), противоизносные свойства в начальный период окисления масел М-8Г₂ (кривая 1), М-10Г₂к (кривая 2) и Utech navigator 15W-40 (кривая 4) повышаются при значениях K_{Π} до 0,193 ед, а далее понижаются до значений товарного масла (М-10Г₂к) или превосходят его (Utech navigator 15W-40). Противоизносные свойства масла Лукойл Стандарт 10W-40 (кривая 3) наоборот, в начале окисления понижаются до значения K_{Π} равного 0,133 ед, а далее повышаются до значений, соответствующих товарному образцу (точка на ординате). Противоизносные свойства масла М-8Г₂ (кривая 1) при окислении изменяются скач-

кообразно как в сторону повышения, так и в сторону понижения относительно товарного образца. Нелинейное изменение противоизносных свойств вызвано уменьшением концентрации присадок совместно с увеличением концентрации растворимых и нерастворимых продуктов окисления.

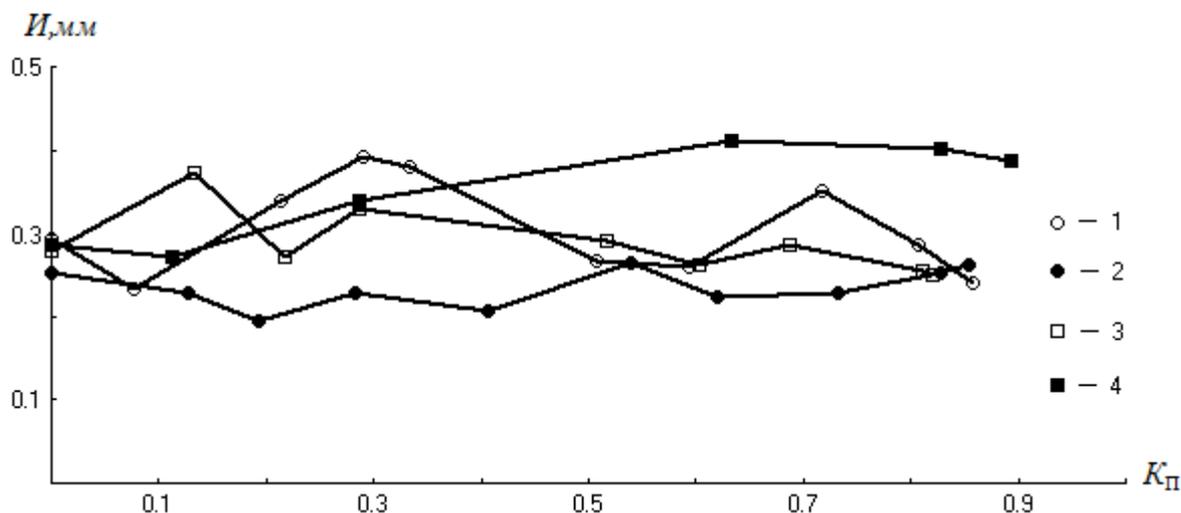


Рисунок 3.7- Зависимости диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока при испытании минеральных моторных масел: 1-М-8Г₂, 2- М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Противоизносные свойства предложено оценивать эмпирическим критерием противоизносных свойств, определяемым отношением [15, 59]:

$$П = K_{П}/И, \quad (3.18)$$

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

Данный критерий (рисунок 3.8) характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, а его зависимость от коэффициента поглощения светового потока описывается эмпирическим линейным уравнением вида $П = a_n K_{П}$ для масел:

$$\text{М-8Г}_2 \quad П = 3,79 K_{П} \quad (3.19)$$

$$\text{М-10Г}_2\text{к} \quad П = 3,87 K_{П} \quad (3.20)$$

$$\text{Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC} \quad П = 3,86 K_{П} \quad (3.21)$$

Utech navigator15W-40 SG/CD

$$\Pi = 2,54K_{\Pi}$$

(3.22)

Коэффициент корреляции изменяется от 0,95 до 0,98.

Коэффициент a_n характеризует среднюю скорость изменения критерия Π и чем она выше, тем выше противоизносные свойства исследуемого масла.

Согласно данным (уравнения 3.19-3.22) самыми низкими противоизносными свойствами характеризуется масло Utech navigator15W-40 SG/CD (кривая 4).

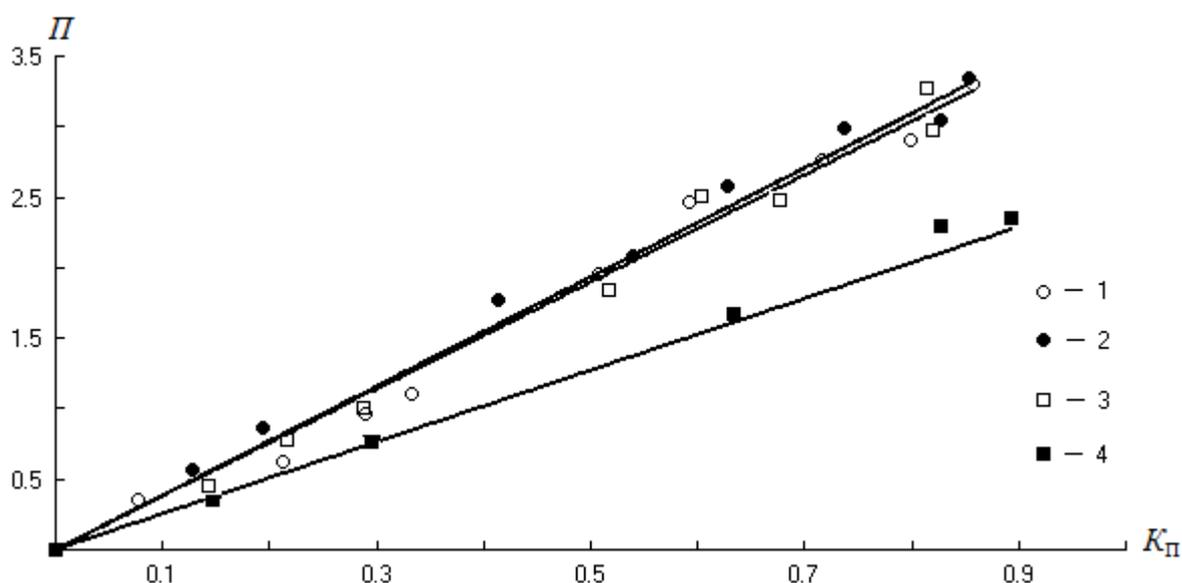


Рисунок 3.8 - Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока моторных масел: 1-М-8Г₂, 2- М-10Г₂к, 3- Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

На рисунке 3.9 представлены диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании товарных минеральных моторных масел.

Здесь видны три характерные участка: 1-й участок, где ток равен 100мкА (заданный), характеризует продолжительность пластической деформации; 2-й участок характеризует упруго-пластическую деформацию, где ток уменьшается до определенной стабильной величины; 3-участок упругой деформации, где ток колеблется около определенной величины, характеризующей формирование и разрушение хемосорбционных защитных слоев на поверхностях трения. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления см. в приложении 2.

По диаграммам (рисунок 3.9) можно судить об интенсивности процессов

деформаций на фрикционном контакте при испытании товарных масел, характеризующих электрическое сопротивление, образующихся на поверхностях трения граничных слоев. Так, максимальная продолжительность пластических деформаций (ток максимальный 100 мкА) установлена для масла М-8Г₂ (диаграмма *а*), а минимальная для масла М-10Г₂к (диаграмма *б*). Продолжительность упругопластических деформаций наименьшая установлена для масла Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC (диаграмма *в*).

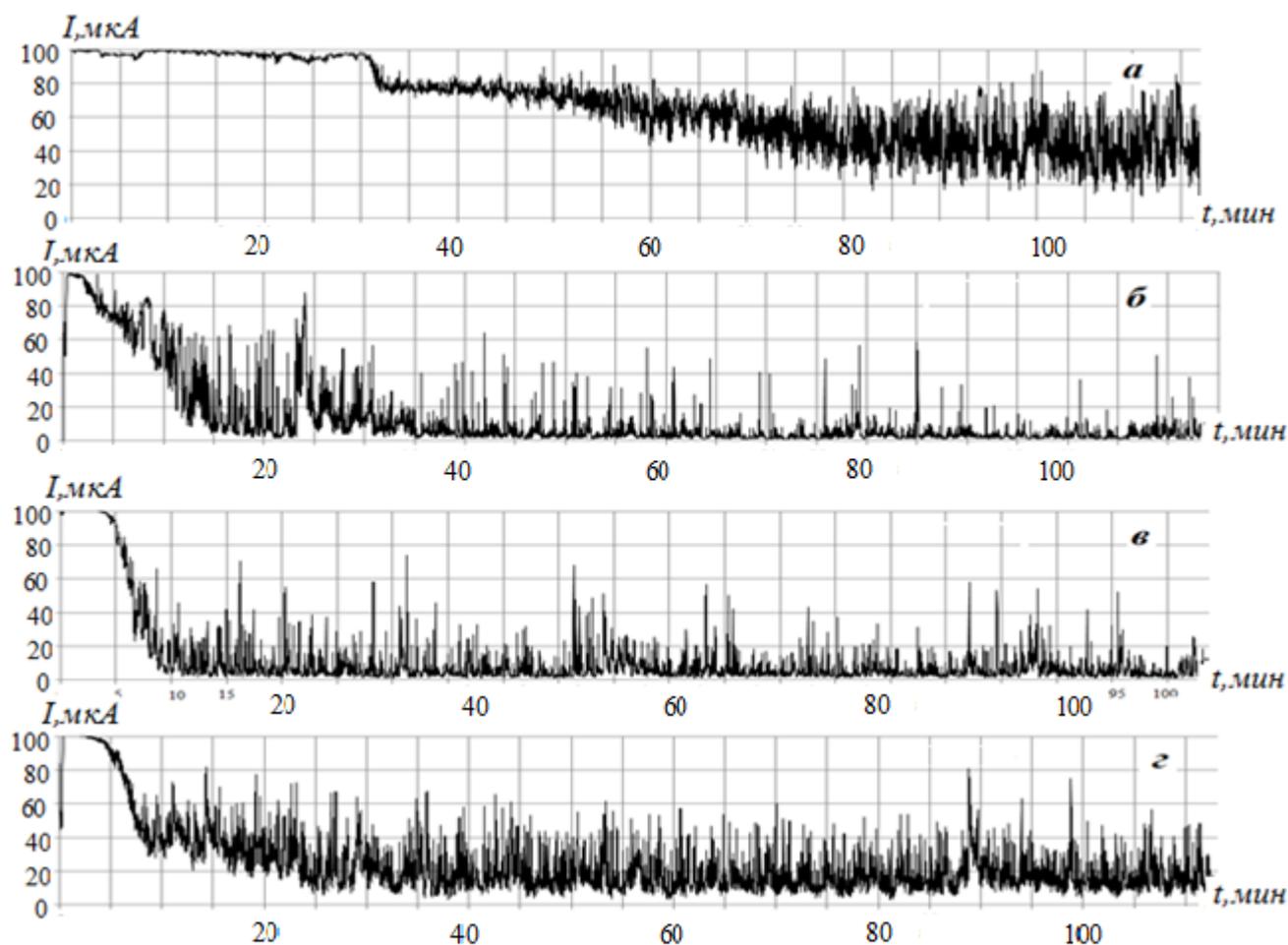


Рисунок 3.9 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании товарных минеральных моторных масел: *а* - М-8Г₂, *б* - М-10Г₂к, *в* - Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, *г* - Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Наибольшие колебания тока при упругих деформациях установлены для масел М-8Г₂ и Utech navigator 15W-40 SG/CD, что объясняется процессами формирования и разрушения хемосорбционных слоев на поверхностях трения.

По динамике изменения амплитуды тока, протекающего через фрикционный контакт товарных и окисленных масел, можно судить о времени формирова-

ния защитных граничных слоев, их разрушении и восстановлении в зависимости от степени окисления, определяемой коэффициентом поглощения светового потока $K_{\text{П}}$.

Физическая модель процессов, протекающих на фрикционном контакте, представлена на рисунке 3.10. Время начала минимального значения тока (область 3) имеет связь с величиной износа, т.е. суммарное время пластической и упругопластической деформации (область 1 и 2) определяет время формирования площади фрикционного контакта, а при упругой деформации происходят процессы формирования и разрушения граничных защитных слоев, при которых ток принимает минимальное значение.

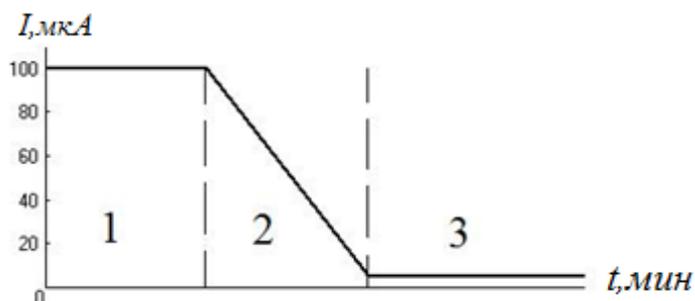


Рисунок 3.10 - Физическая модель процессов, протекающих на фрикционном контакте, в зависимости от времени испытания моторного масла: 1-область пластических деформаций; 2-область упругопластических деформаций; 3-область упругих деформаций.

На рисунке 3.11 показаны диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании минерального масла М-8Г₂ в зависимости от степени окисления.

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. При большом сопротивлении граничного слоя, а это возможно, когда на поверхностях трения образуются модифицированные слои, как результат химической реакции металлических поверхностей с органическими кислотами, изменяющими электропроводность этих слоев.

Если условно сопротивление граничного слоя обозначить через символ R ,

то величина тока, протекающего через граничный слой, определится по формуле:

$$I = U_{ГС} / R, \quad (3.23)$$

где $U_{ГС}$ – падение напряжения на граничном слое, В; I – величина тока, протекающего через граничный слой, мкА.

Тогда сопротивление граничного слоя определяется как

$$R = U_{ГС} / I. \quad (3.24)$$

Для удобства применения формулы 3.24 величину тока предлагается заменить коэффициентом электропроводности граничного слоя $K_{ЭГС}$, определяемого выражением

$$K_{ЭГС} = I / I_3, \quad (3.25)$$

где I – величина тока, протекающего через граничный слой, мкА; I_3 – заданная величина тока при статическом положении пары трения, мкА.

Тогда формулу 3.24 можно записать в виде

$$R = U_{ГС} / K_{ЭГС}. \quad (3.26)$$

Так как концентрация продуктов окисления в граничном слое определяется отношением

$$K_{П} / I = П, \quad (3.27)$$

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

$$U_{ГС} = П \cdot K_{ЭГС} = \frac{K_{П}}{I} \cdot K_{ЭГС} = K_{СС}. \quad (3.28)$$

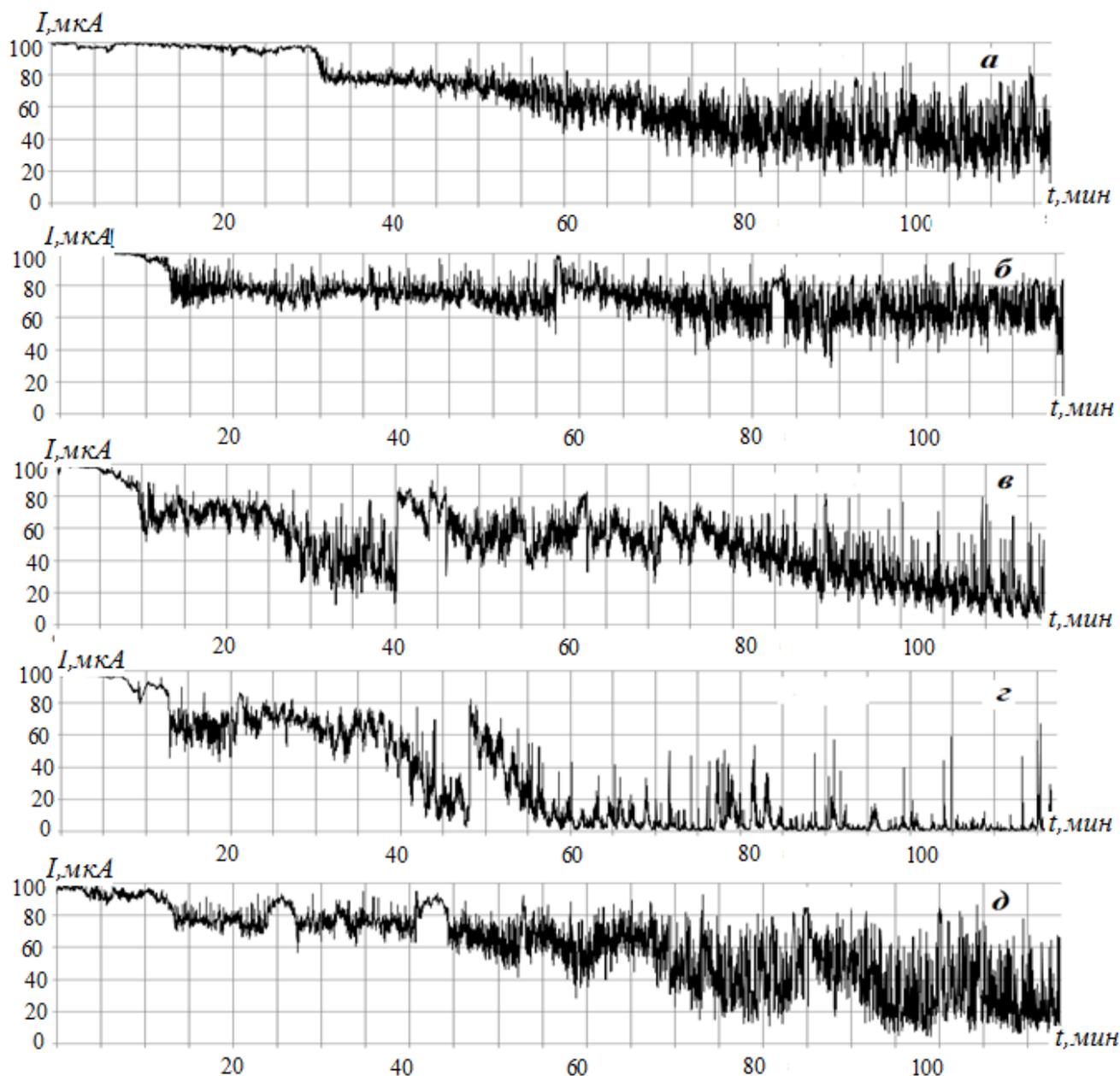


Рисунок 3.11 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при окислении минерального моторного масла М-8Г₂ : а - товарное, б - $K_{П}=0,29$ ед, в - $K_{П}=0,593$ ед; г - $K_{П}=0,717$ ед; д - $K_{П}=0,857$ ед.

Падение напряжения на граничном слое характеризует смазывающие свойства окисленных масел и принято за критерий, обозначенный символом $K_{СС}$. Это комплексный критерий, характеризующий концентрацию продуктов окисления на номинальной площади контакта и их электропроводящие свойства.

Влияние продуктов окисления на триботехнические характеристики минеральных масел оценивались по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа, критерию противоизносных свойств, времени формирования пятна

износа, суммарной продолжительности пластической и упругопластической деформаций и критерию смазывающих свойств окисленных масел (K_{CC}).

Зависимости диаметра пятна износа и критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока рассмотрены ранее (см. рисунки 3.7 и 3.8). Зависимости времени формирования пятен износа от коэффициента поглощения светового потока представлены на рисунке 3.12. При понижении противоизносных (смазывающих) свойств время формирования пятна износа должно уменьшаться, а при удовлетворительных смазывающих свойствах время увеличивается.

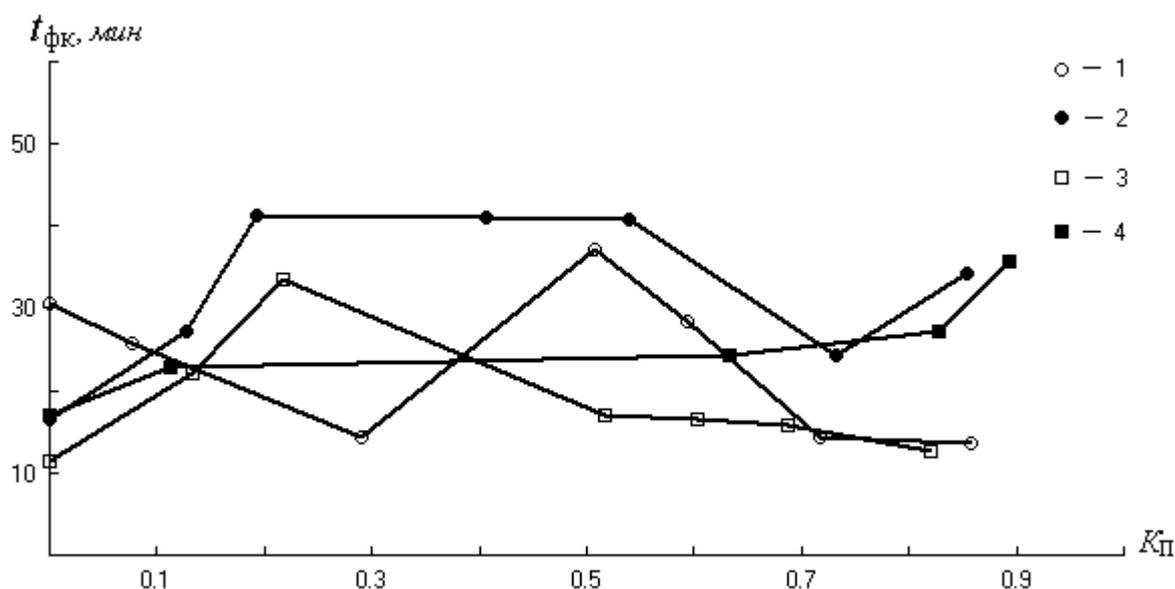


Рисунок 3.12 - Зависимости времени формирования фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при испытании моторных масел: 1-М-8Г₂, 2- М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Поскольку при окислении масел увеличивается его кислотность, то на поверхностях трения образуются защитные пленки за счет химической реакции металла с органическими кислотами, которые влияют на электропроводность фрикционного контакта. Кроме того, продукты окисления также влияют на электрические свойства граничного слоя, которые совместно влияют на этот показатель.

Согласно данным (рисунок 3.12), с увеличением коэффициента поглощения светового потока $K_{П}$ время формирования пятна износа $t_{фк}$ колеблется в пределах

от 10 до 42 минут в зависимости от соотношения концентраций растворимых и нерастворимых продуктов окисления (см. рисунок 3.1).

В начале окисления в сравнении с товарным маслом (точки на ординате) время формирования пятна износа (суммарное время пластической и упругопластической деформаций) для масел М-8Г₂ (кривая 1), Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC (кривая 3) и Utech navigator 15W-40 SG/CD (кривая 4) увеличивается, а масла М-10Г₂к (кривая 2) уменьшается. При дальнейшем окислении масел время формирования фрикционного контакта либо уменьшается (кривые 1,3) при разных значениях коэффициента $K_{П}$, либо увеличивается (кривая 4). Такие различия в изменении времени $t_{ФК}$ могут объясняться различиями в соотношении концентраций первичных и вторичных продуктов окисления и концентрации присадок. Кроме того, на время формирования площади контакта оказывает существенное влияние способность окисленных масел формировать защитные пленки на поверхностях трения, уменьшающих значение этого показателя, что в целом определяет их смазывающие свойства.

На рисунке 3.13 представлены зависимости критерия смазывающих свойств $K_{СС}$ минеральных моторных масел от коэффициента поглощения светового потока.

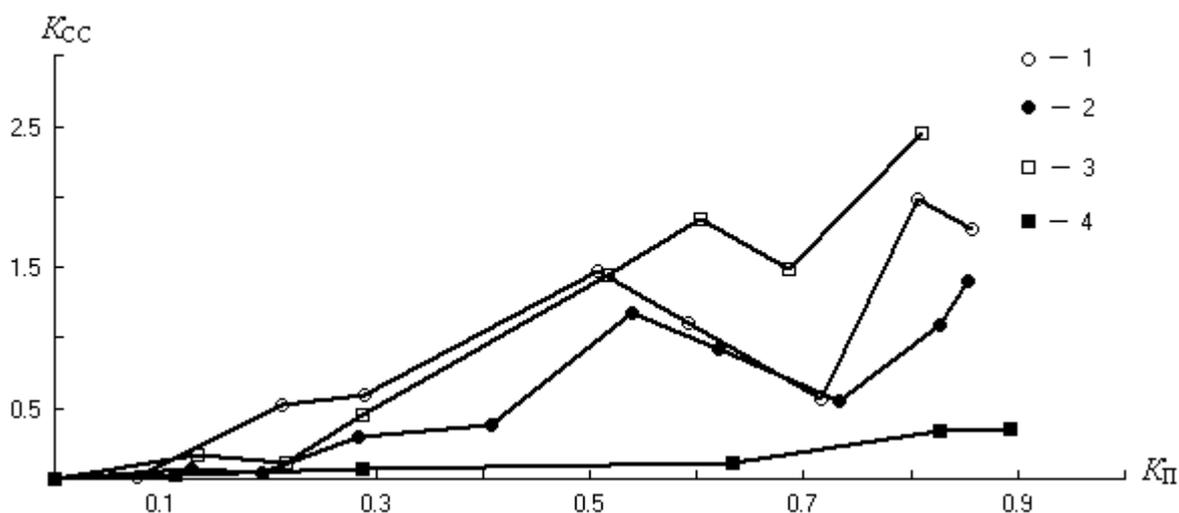


Рисунок 3.13 - Зависимости критерия смазывающих свойств от коэффициента поглощения светового потока минеральных моторных масел: 1-М-8Г₂, 2- М-10Г₂к, 3-Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, 4-Utech navigator 15W-40 SG/CD.

Данный критерий характеризует падение напряжения на граничном слое окисленного масла, разделяющего поверхности трения при изнашивании (см. формулу 3.28), причем, чем больше сопротивление граничного слоя, тем больше падение напряжения, а значит выше смазочная способность окисленных моторных масел.

Данные зависимости имеют два участка. Первый участок характеризуется увеличением критерия смазывающих свойств, т.е. увеличением сопротивления граничного слоя, а второй колебаниями его значений. Можно полагать, что в этой области сопротивление граничного слоя изменяется из-за формирования и разрушения пленок, образующихся на поверхностях трения.

Для масла Utech navigator 15W-40 SG/CD (кривая 4) установлено непрерывное увеличение критерия K_{CC} , т.е. это масло характеризуется самыми низкими смазывающими свойствами, что подтверждается данными диаметра пятна износа (рисунок 3.7) и критерия противоизносных свойств (рисунок 3.8). В данном случае электрическое сопротивление граничного слоя небольшое, что свидетельствует об отсутствии на поверхностях трения защитных пленок.

3.2 Результаты исследования частично синтетических моторных масел

Представителями частично синтетических моторных масел, взятых для исследования, являются следующие моторные масла: Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, ТНК Супер 5W-40 SL/CF, Ravenol TSI 10W-40 SM/CF. Все масла являются всесезонными и универсальными, их характеристики приведены в разделе 2.2.

Исследование масел проводилось в два этапа по методике, приведенной в разделе 2. На первом этапе определялась термоокислительная стабильность масел при температуре 180°C, на втором оценивались изменения противоизносных свойств масел при их окислении.

Согласно классификации API масла Mobil Super 2000 10W-40 и Лукойл Люкс 5W-40 относятся к одной группе эксплуатационных свойств SJ/CF, масло

ТНК Супер 5W-40 относится к более высокой группе SL/CF, а масло Ravenol TSI 10W-40 к наивысшей группе SM/CF. Задача исследований заключается в подтверждении этой классификации.

Термоокислительная стабильность является комплексным показателем, который определялся по коэффициенту поглощения светового потока при фотометрировании окисленного масла, испаряемости и изменению вязкости.

На рисунке 3.14 представлены зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления масел при температуре 180°C с перемешиванием мешалкой с частотой вращения 300±2 об/мин.

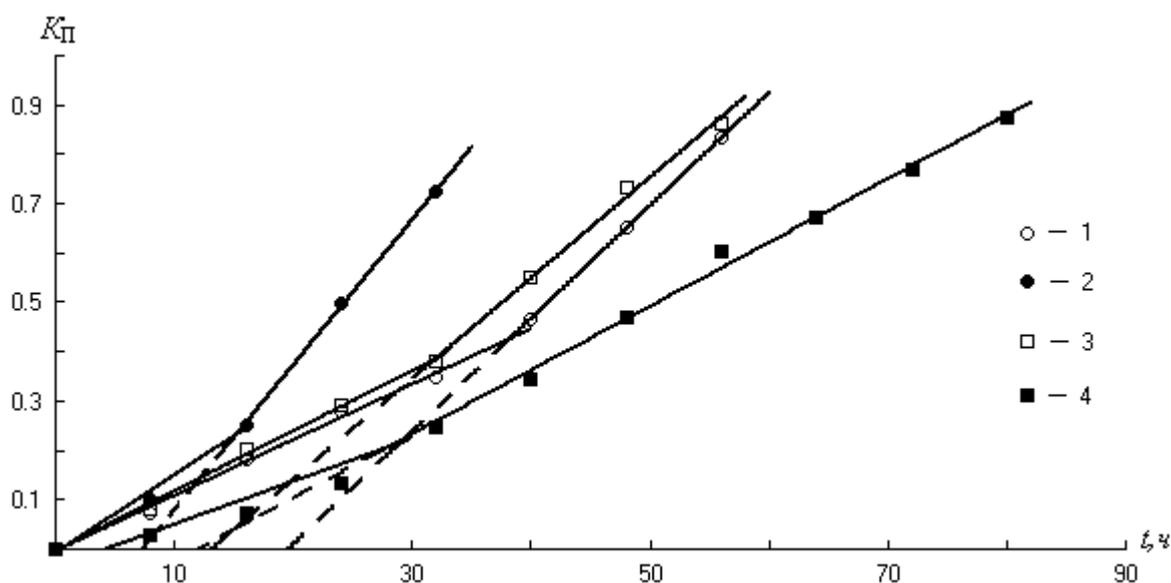


Рисунок 3.14 - Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

После каждых 8 –ми часов проба окисленного масла взвешивалась, определялась масса испарившейся части масла, отбирались пробы для измерения вязкости, фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока. Фотометрирование производилось при толщине фотометрируемого слоя 2мм, продолжительность испытаний определялась временем достижения коэффициентом поглощения светового потока значений $K_{П}=0,7...0,8$ ед.

Согласно данным (рисунок 3.14), зависимости коэффициента $K_{П}$ от времени испытания имеют два линейных участка для всех исследованных масел, вы-

званных образованием продуктов различной оптической плотности. Первый участок зависимости до изгиба характеризует увеличение концентрации первичных продуктов окисления, а второй - образование вторичных продуктов с большей оптической плотностью.

Наличие вторичных продуктов установлено центрифугированием окисленных проб при $K_{II} > 0,5$ ед. Начало образования вторичных продуктов определяется продлением второго участка зависимости $K_{II} = f(t)$ до пересечения с осью абсцисс. Время начала процесса окисления и образования вторичных продуктов с момента начала испытания приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Время начала окисления и образования вторичных продуктов.

Марка масла	Время начала окисления масел, ч	Время начала образования вторичных продуктов окисления, ч
Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	0,4	19,5
Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	0,5	7,3
ТНК Супер 5W-40 SL/CF	0,25	13
Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	4,4	11,9

По данным таблицы 3.3 видно, что наибольшая область сопротивления окислению установлено для масла Ravenol TSI 10W-40 – 4,4ч, однако через 11,9 часов начинают образовываться вторичные продукты.

Наибольшее время начала образования вторичных продуктов установлено для масла Mobil Super 2000 10W-40 – 19,5ч и ТНК Супер 5W-40 – 13ч. Время достижения коэффициентом поглощения светового потока значения равного 0,8ед для исследованных масел составило: 54,3ч - Mobil Super; 33,3ч - Лукойл Люкс; 53,5ч - ТНК Супер и 73ч - Ravenol TSI, т.е. наибольший потенциальный ресурс установлен для масла Ravenol TSI, классификация которого по API наивысшая.

Масла Mobil Super 2000 и Лукойл Люкс, относящиеся к одной группе SJ различаются ресурсом, а масло ТНК Супер, относящееся к группе SL, уступает маслу с низшей классификацией SJ - Mobil Super 2000, т.е. система классификации требует совершенствования.

Процесс окисления описывается для всех участков и масел уравнением:

$$K_{\Pi} = a(t - t_{\text{H}}), \quad (3.29)$$

где a - скорость окисления, ч^{-1} ; t - время испытания, ч; t_{H} - время начала процесса окисления или образования вторичных продуктов, ч.

Регрессионные уравнения процесса окисления сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 - Регрессионные уравнения процесса окисления.

Марка масла	Первый участок	Второй участок	Потенциальный ресурс (при $K_{\Pi}=0,8$), ч
Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	$K_{\Pi} = 0,01(t-0,4)$	$K_{\Pi} = 0,023(t-19,5)$	54,3
Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	$K_{\Pi} = 0,016(t-0,5)$	$K_{\Pi} = 0,03(t-7,3)$	33,3
ТНК Супер 5W-40 SL/CF	$K_{\Pi} = 0,012(t-0,25)$	$K_{\Pi} = 0,02(t-13)$	53,5
Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	$K_{\Pi} = 0,009(t-4,4)$	$K_{\Pi} = 0,013(t-11,9)$	73

Анализ регрессионных уравнений, представленных в таблице 3.4, показал, что наибольшая средняя скорость образования первичных продуктов установлена для масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF – $0,016\text{ч}^{-1}$, а наименьшая $0,009\text{ч}^{-1}$ для масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF. Наибольшая средняя скорость образования вторичных продуктов окисления $0,03\text{ч}^{-1}$ установлена также для масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, а наименьшая у масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF – $0,013\text{ч}^{-1}$.

Вязкость окисленных масел (рисунок 3.15) оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_{μ} , определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного (исходного).

Установлено, что вязкость при окислении двух образцов масел Mobil Super 2000 10W-40 (кривая 1) и Лукойл Люкс 5W-40 (кривая 2) в среднем уменьшается за 56 часов испытания на 10% по отношению к товарному маслу, что указывает на стабильность вязкости при окислении и хорошие пусковые свойства масел в холодный период эксплуатации двигателя (рисунок 3.15). Вязкость окисленного

масла ТНК Супер 5W-40 (кривая 3) за 40 часов испытания уменьшается на 40% и далее повышается до конца испытания на 10%.

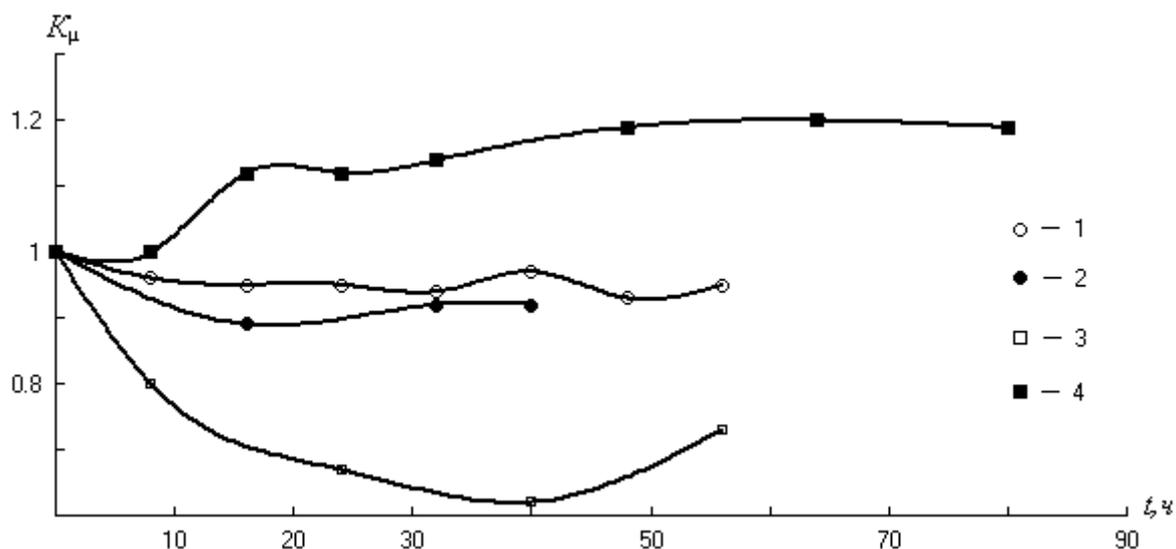


Рисунок 3.15- Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени испытания моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Вязкость масла Ravenol TSI 10W-40 (кривая 4) увеличилась за 90 часов испытания на 20% видимо за счет минеральной основы, что может говорить о пониженных пусковых свойствах в холодный период эксплуатации двигателей.

Испаряемость масла является важным показателем эксплуатационных и качественных характеристик моторного масла. На рисунке 3.16 приведены результаты испытаний частично синтетических моторных масел. Наименьшая летучесть установлена для масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF (кривая 4), остальные масла обладают большей летучестью без существенных различий между собой.

Испаряемость масел от времени окисления описывается полиномом второго порядка:

$$G = at^2 + bt + c, \quad (3.30)$$

где a и b — коэффициенты, характеризующие испаряемость испытуемого масла; c — коэффициент, характеризующий концентрацию легких фракций и воды.

Регрессионные уравнения зависимостей испаряемости от времени испытания для исследуемых масел имеют вид:

$$\text{Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF} \quad G = -0,178 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,281 t + 0,78 \quad (3.31)$$

$$\text{Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF} \quad G = -0,499 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,411 t + 0,33 \quad (3.32)$$

$$\text{ТНК Супер 5W-40 SL/CF} \quad G = -0,089 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,262 t + 0,6 \quad (3.33)$$

$$\text{Ravenol TSI 10W-40 SM/CF} \quad G = -0,032 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,123 t + 0,29 \quad (3.34)$$

Коэффициент корреляции 0,99.

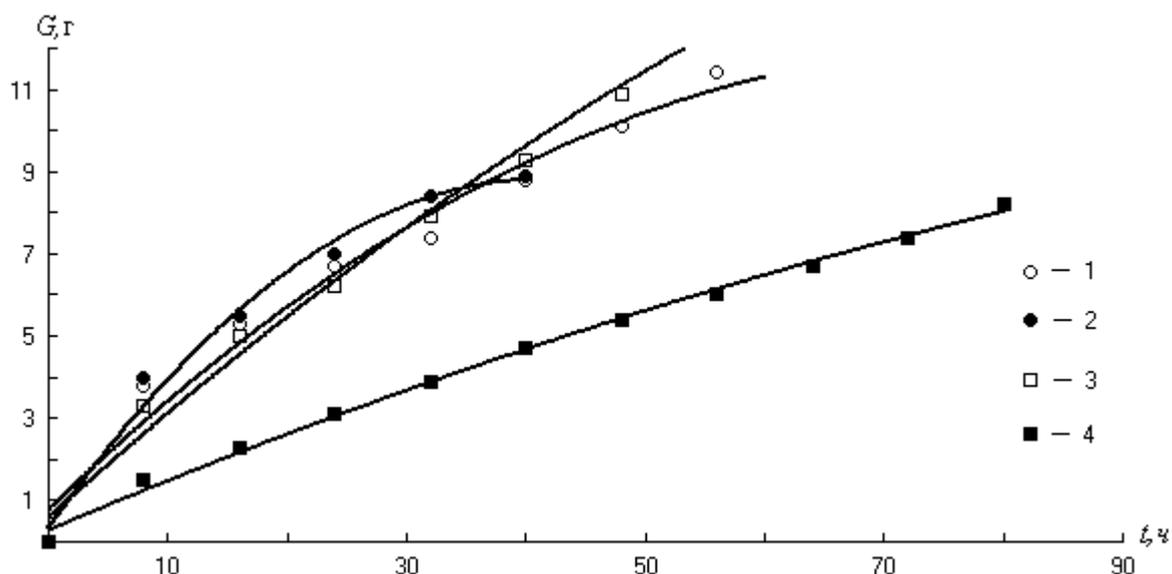


Рисунок 3.16- Зависимости испаряемости от времени испытания моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Согласно уравнений 3.31 – 3.34, средняя скорость испарения наибольшая $0,411 \text{ч}^{-1}$ установлена для масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, а наименьшая $0,123 \text{ч}^{-1}$ для масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF. Наибольшая концентрация легких фракций и воды установлена для масла Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF – $0,78 \text{г}$, а наименьшая $0,29 \text{г}$ для масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Для оценки влияния продуктов окисления на вязкость и испаряемость частично синтетических масел исследована связь этих параметров с коэффициентом поглощения светового потока (рисунок 3.17, 3.18).

Установлено, что вязкость частично синтетических масел 1 и 2 понижается при коэффициенте поглощения светового потока $K_{\text{П}} < 0,1 \text{ед}$, а для масла 3 она понижается до значения $K_{\text{П}} = 0,55 \text{ед}$, для масла 4 она повышается. При увеличении коэффициента $K_{\text{П}} > 0,1 \text{ед}$ вязкость стабилизируется для масел 1 и 2, и увеличива-

ется для масла 4, а вязкость масла 3 увеличивается при коэффициенте $K_{\Pi} > 0,55$ ед. Таким образом, продукты окисления неоднозначно влияют на вязкость из-за различий в концентрациях синтетической и минеральной основ и вязкостных присадок.

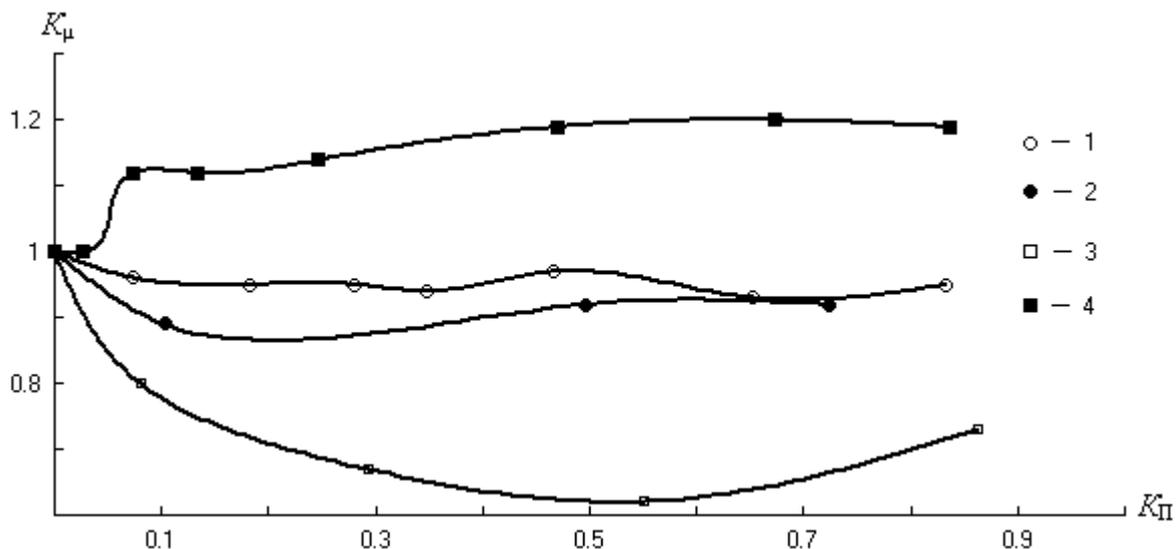


Рисунок 3.17- Зависимости коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Испаряемость в начальный период окисления (рисунок 3.18) увеличивается более интенсивно из-за наличия в товарном масле легких фракций и воды.

Это явление происходит в период образования первичных продуктов окисления. С появлением вторичных продуктов окисления испаряемость частично синтетических масел уменьшается по сравнению с изменениями коэффициента поглощения светового потока, т.е. в этот период большая часть тепловой энергии поглощается продуктами окисления – происходит перераспределение тепловой энергии.

Зависимости испаряемости от коэффициента поглощения светового потока описываются полиномом второго порядка:

$$G = aK_{\Pi}^2 + bK_{\Pi} + c, \quad (3.35)$$

где a и b — коэффициенты, характеризующие испаряемость испытуемого масла при различных концентрациях продуктов окисления; c — коэффициент, характеризующий концентрацию легких фракций и воды в товарном масле.

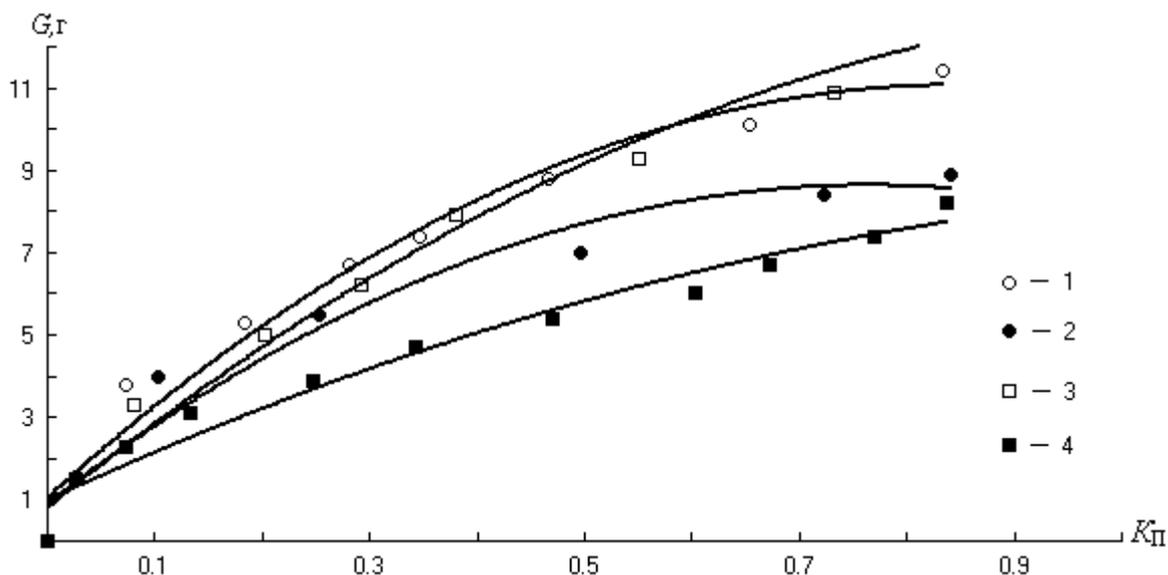


Рисунок 3.18- Зависимости испаряемости от коэффициента поглощения светового потока моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Регрессионные уравнения зависимостей испаряемости от коэффициента поглощения светового потока имеют вид для масел:

$$\text{Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF} \quad G = -13,9K_{\text{П}}^2 + 23,6K_{\text{П}} + 1 \quad (3.36)$$

$$\text{Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF} \quad G = -13,2K_{\text{П}}^2 + 20,2K_{\text{П}} + 0,9 \quad (3.37)$$

$$\text{ТНК Супер 5W-40 SL/CF} \quad G = -9,3K_{\text{П}}^2 + 21,4K_{\text{П}} + 0,8 \quad (3.38)$$

$$\text{Ravenol TSI 10W-40 SM/CF} \quad G = -4,7K_{\text{П}}^2 + 12K_{\text{П}} + 1 \quad (3.39)$$

Коэффициент корреляции 0,97-0,98.

Термоокислительную стабильность предложено оценивать коэффициентом $E_{\text{ТОС}}$, определяемым суммой коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости (рисунок 3.19).

В этой связи физический смысл показателя термоокислительной стабильности заключается в том, что он характеризует сопротивляемость смазочного материала окислению и испарению, поэтому, чем меньше значение этого показателя,

тем выше термоокислительная стабильность данного смазочного материала при заданной температуре испытания.

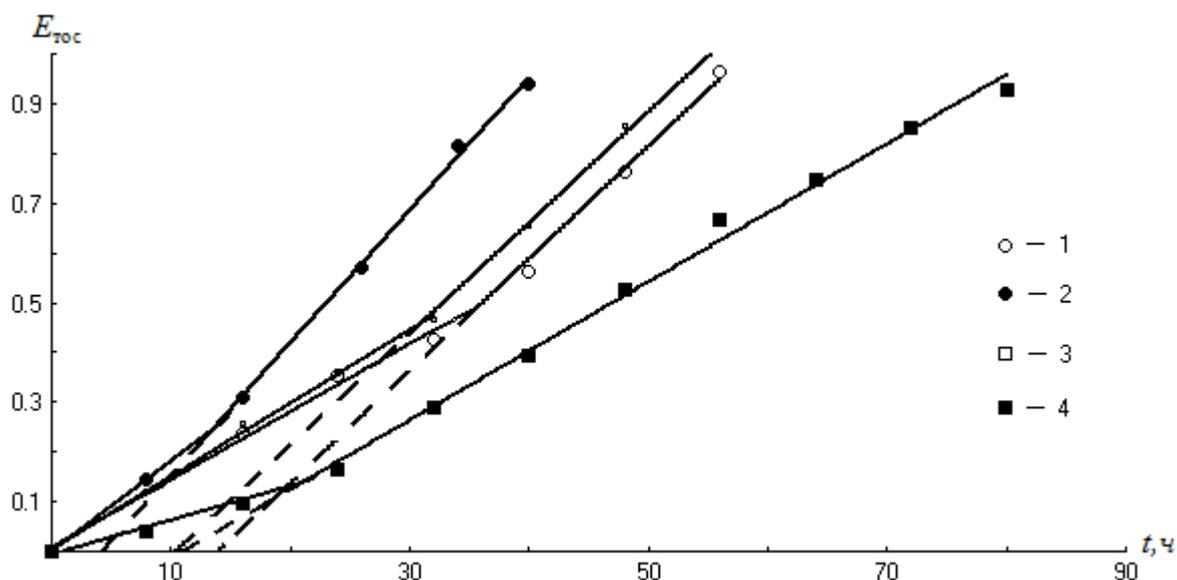


Рисунок 3.19- Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2-Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности $E_{\text{ТОС}}$ от времени испытания является кусочно-линейной функцией (рисунок 3.19), имеющей изгиб при некотором значении $E_{\text{ТОС}}$.

Регрессионные уравнения двух участков зависимостей коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания имеют вид для масел:

	Первый участок	Второй участок	
Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	$E_{\text{ТОС}}=0,0137t$	$E_{\text{ТОС}}=0,023(t-13,7)$	(3.40)

Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	$E_{\text{ТОС}}=0,018t$	$E_{\text{ТОС}}=0,027(t-4,23)$	(3.41)
-------------------------	-------------------------	--------------------------------	--------

ТНК Супер 5W-40 SL/CF	$E_{\text{ТОС}}=0,015t$	$E_{\text{ТОС}}=0,02(t-11,5)$	(3.42)
-----------------------	-------------------------	-------------------------------	--------

Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	$E_{\text{ТОС}}=0,007t$	$E_{\text{ТОС}}=0,014(t-10,7)$	(3.43)
--------------------------	-------------------------	--------------------------------	--------

Коэффициент корреляции 0,99.

Наибольшая средняя скорость образования первичных продуктов окисления установлена для масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF– $0,018\text{ч}^{-1}$, а наименьшая $0,007\text{ч}^{-1}$ для масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF. Наибольшая средняя скорость образования

вторичных продуктов установлена тоже для масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF – $0,027\text{ч}^{-1}$, а наименьшая так же для масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF – $0,014\text{ч}^{-1}$. Наибольшее время начала образования вторичных продуктов окисления установлено для масла Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF – 13,7ч, а наименьшее 4,23ч - для масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF.

Для исследования противоизносных свойств частично синтетических моторных масел в процессе окисления пробы отбирались при значениях коэффициента поглощения светового потока приблизительно равного 0,1;0,2;...0,8ед.

На рисунке 3.20 представлены зависимости параметра износа I от коэффициента поглощения светового потока K_{Π} .

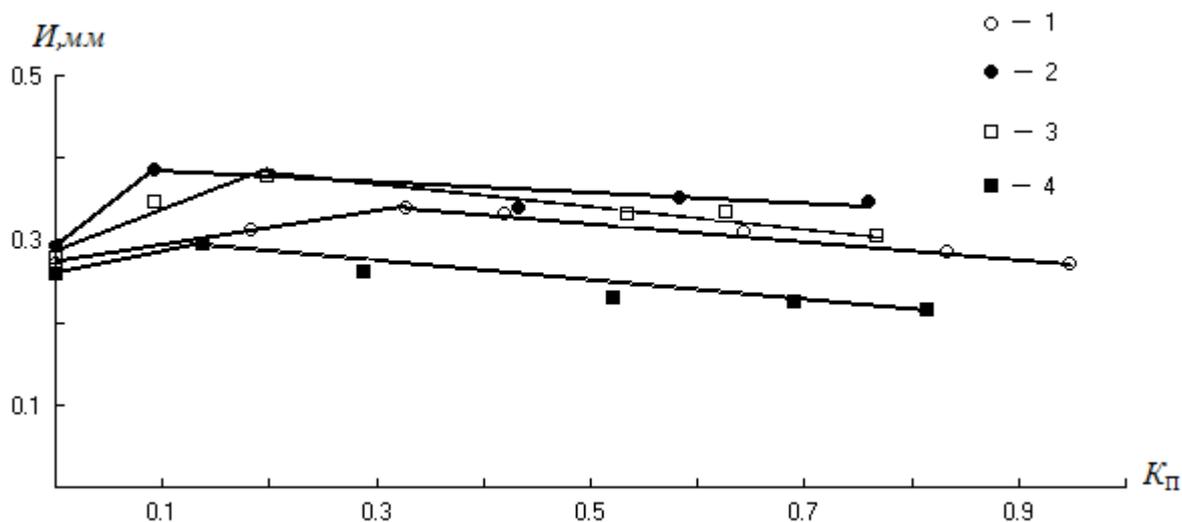


Рисунок 3.20 - Зависимости диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока при испытании частично синтетических моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Согласно данным, противоизносные свойства масел понижаются в начальный период окисления до некоторого значения K_{Π} (см. таблицу 3.5), а износ увеличивается по сравнению с товарным (не окисленным) маслом (точка на ординате). При дальнейшем окислении масел их противоизносные свойства повышаются до значений, примерно соответствующих товарным маслам (кривые 1, 2 и 3), а противоизносные свойства масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF повышаются до значения, превосходящего товарное масло.

Повышение противоизносных свойств вызвано появлением в маслах определенной концентрации вторичных продуктов окисления, которые изменяют оптическую плотность масел.

Противоизносные свойства предложено оценивать критерием противоизносных свойств, определяемым отношением [15,60-66]:

$$I = K_{\Pi}/I, \quad (3.44)$$

где K_{Π} - коэффициент поглощения светового потока; I - диаметр пятна износа, мм.

Таблица 3.5 - Значения K_{Π} , до которых происходит понижение противоизносных свойств испытываемых масел при окислении.

Марка масла	K_{Π}
Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	0,327
Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	0,093
ТНК Супер 5W-40 SL/CF	0,197
Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	0,137

Данный критерий (рисунок 3.21) характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта и описывается эмпирическим линейным уравнением вида $I = a_n K_{\Pi}$.

Коэффициент a_n характеризует скорость изменения критерия I и чем больше его значение, тем выше противоизносные свойства исследуемого масла.

Регрессионные уравнения зависимостей критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока имеют вид для масел:

$$\text{Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF} \quad I = 4,73 K_{\Pi} \quad (3.45)$$

$$\text{Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF} \quad I = 2,79 K_{\Pi} \quad (3.46)$$

$$\text{ТНК Супер 5W-40 SL/CF} \quad I = 3,27 K_{\Pi} \quad (3.47)$$

$$\text{Ravenol TSI 10W-40 SM/CF} \quad I = 4,56 K_{\Pi} \quad (3.48)$$

Коэффициент корреляции – 0,98.

На рисунке 3.22 представлены диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании товарных частично синтетических мотор-

НЫХ масел.

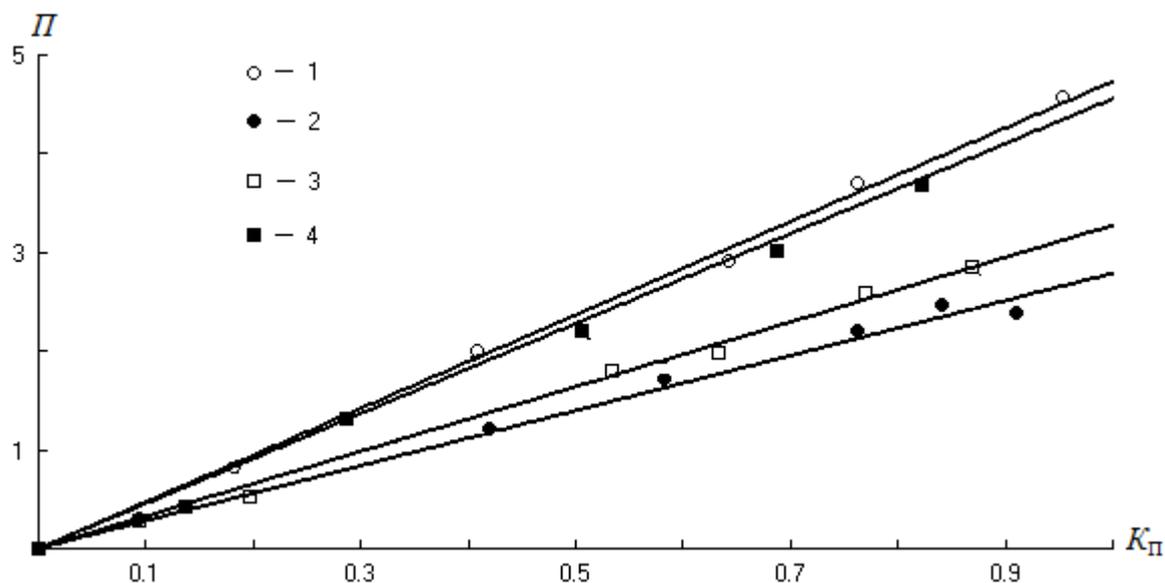


Рисунок 3.21 - Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока частично синтетических моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Здесь видны три характерные участка: 1- где ток равен 100мкА (заданный), участок, характеризует продолжительность пластической деформации; 2-ток уменьшающийся до определенной стабильной величины - участок упругопластической деформации; 3-участок, где ток колеблется около определенной величины, на котором протекают упругие деформации, характеризующиеся формированием и разрушением хемосорбционных защитных слоев на поверхностях трения. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления, см. в приложении 2.

Из представленных данных (рисунок 3.22) видно, что наиболее стабильные защитные граничные слои на поверхностях трения формируются в масле ТНК Супер 5W-40 SL/CF (диаграмма в) и менее стабильные в масле Ravenol TSI 10W-40 SM/CF (диаграмма з), хотя оно характеризуется самыми высокими противоизносными свойствами по результатам испытаний.

По данным диаграммам (рисунок 3.22) можно судить об интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте при испытании товарных ма-

сел, характеризующих электрическое сопротивление, образовавшихся на поверхностях трения граничных слоев.

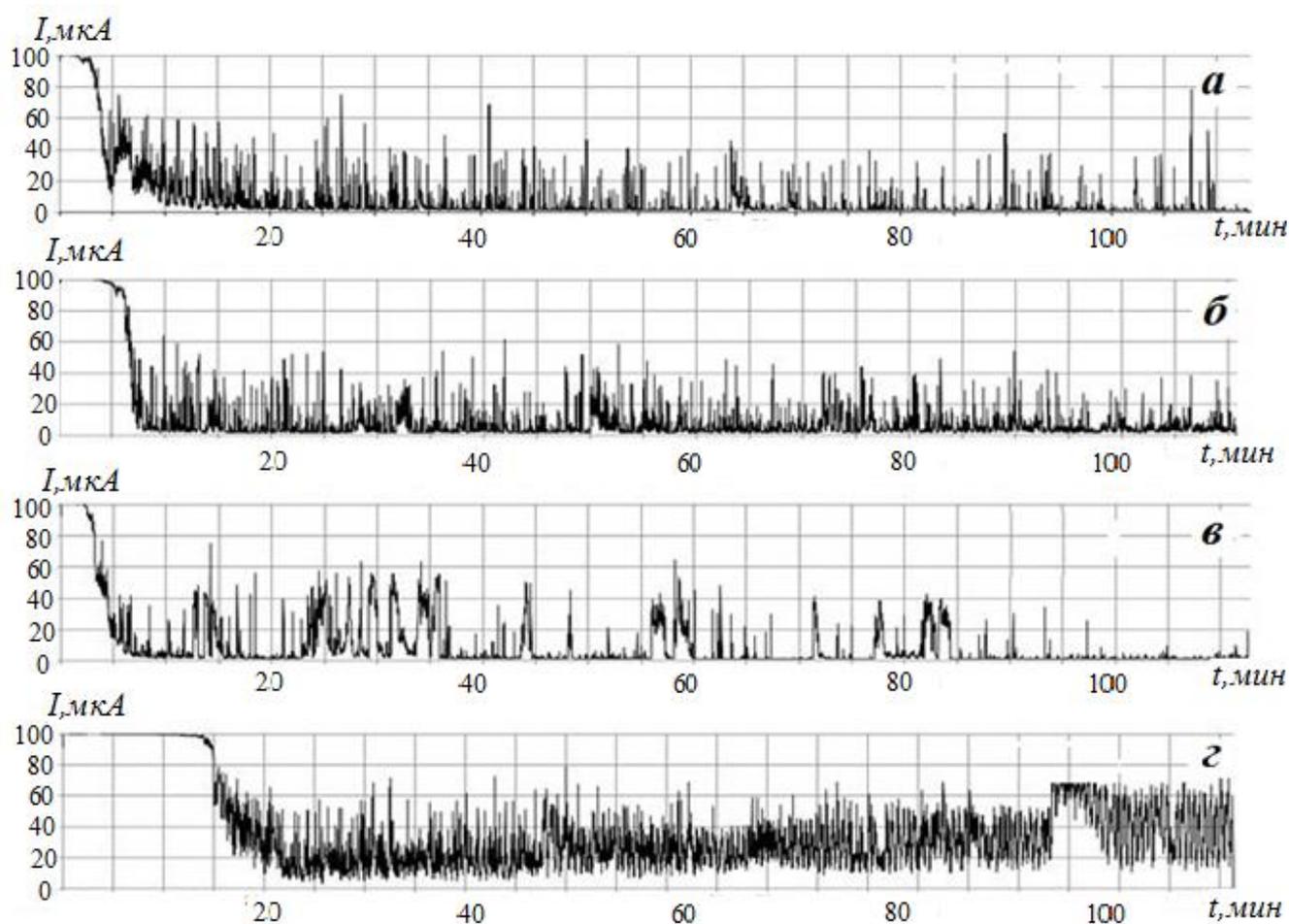


Рисунок 3.22 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании товарных частично синтетических моторных масел: *а* - Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, *б* - Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, *в* - ТНК Супер 5W-40 SL/CF, *г* - Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Так, чем больше колебания тока при установившемся изнашивании (упругий контакт), тем прочнее граничные слои, образующиеся на поверхностях трения, ниже (диаграмма *г*).

По динамике изменения амплитуды тока, протекающего через фрикционный контакт товарных и окисленных масел (рисунок 3.23), можно судить о времени формирования защитных граничных слоев, их разрушении и восстановлении в зависимости от степени окисления, определяемой коэффициентом поглощения светового потока $K_{\text{П}}$.

С увеличением коэффициента поглощения светового потока, обнаруживается тенденция к уменьшению времени формирования защитного слоя на поверхности трения (рисунок 3.23).

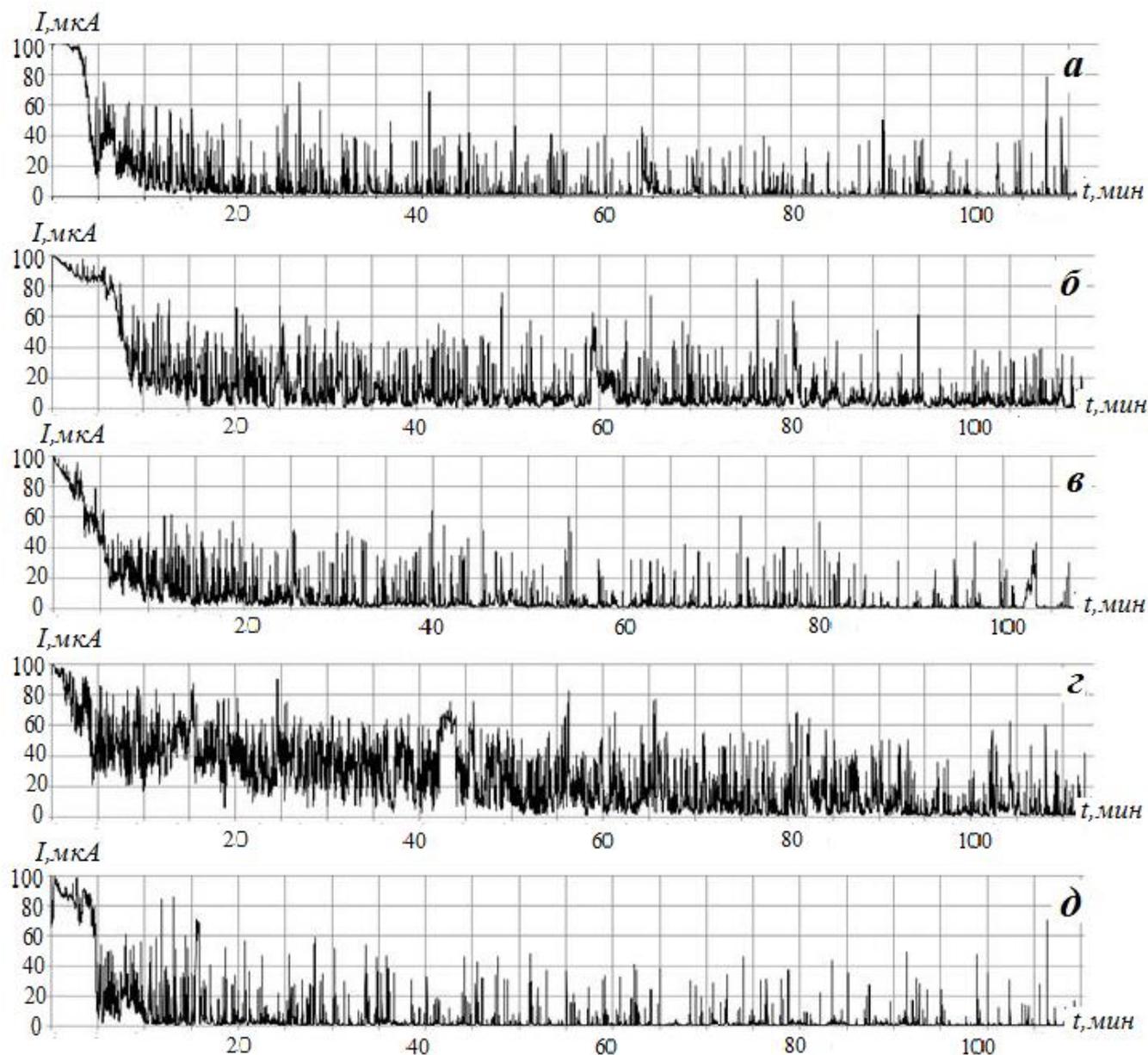


Рисунок 3.23 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при окислении частично синтетического моторного масла Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF: *a* - товарное, *б* - $K_{II}=0,183$ ед, *в* - $K_{II}=0,643$ ед; *г* - $K_{II}=0,833$ ед; *д* - $K_{II}=0,947$ ед.

Время начала минимального значения тока имеет связь с величиной износа, т.е. суммарное время пластической и упругопластической деформаций определяет время формирования фрикционного контакта, а при упругой деформации проис-

ходят процессы формирования и разрушения граничных защитных слоев, при которых ток принимает минимальное значение.

Зависимости времени формирования номинальной площади фрикционного контакта $t_{ФК}$ от коэффициента поглощения светового потока представлены на рисунке 3.24. Для всех исследованных частично синтетических моторных масел в начальный период окисления время формирования фрикционного контакта увеличивается в сравнении с товарным маслом (точка на ординате), а с увеличением коэффициента поглощения светового потока оно либо уменьшается, либо колеблется в определенных пределах. Для масла ТНК Супер 5W-40 SL/CF (кривая 3) время формирования площади фрикционного контакта непрерывно увеличивается во всем диапазоне изменения коэффициента поглощения светового потока, а для масел Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF (кривая 2) и Ravenol TSI 10W-40 SM/CF (кривая 4) при значениях коэффициента $K_{П} > 0,7$ ед время формирования площади фрикционного контакта увеличивается.

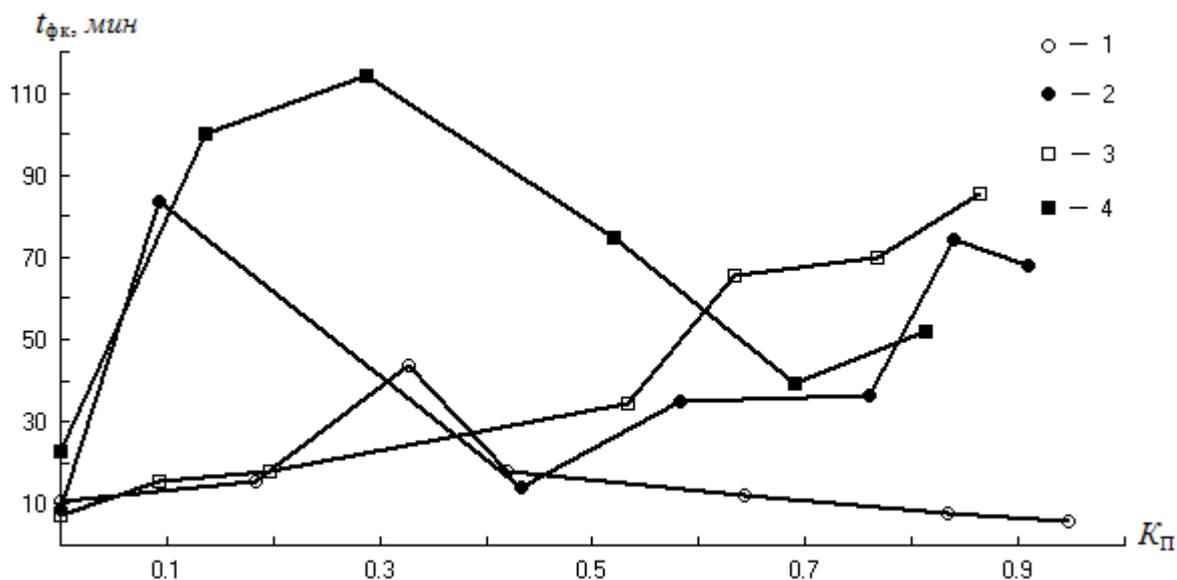


Рисунок 3.24 - Зависимости времени формирования фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при окислении частично синтетических моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Зависимости критерия смазывающих свойств $K_{СС}$ окисленных частично синтетических моторных масел от коэффициента поглощения светового потока

представлены на рисунке 3.25. Данные зависимости, как и для минеральных масел, имеют два участка, различающихся характером изменения критерия. Первый участок зависимостей характеризуется увеличением критерия смазывающих свойств для всех исследованных масел, но интенсивность его изменения различна. Так, чем больше значение критерия, тем больше электрическое сопротивление граничного слоя, разделяющего поверхности трения.

Поэтому лучшими смазывающими свойствами характеризуются масла ТНК Супер 5W-40 SL/CF (кривая 3) и Ravenol TSI 10W-40 SM/CF (кривая 4), что подтверждается зависимостями диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока (рисунок 3.20).

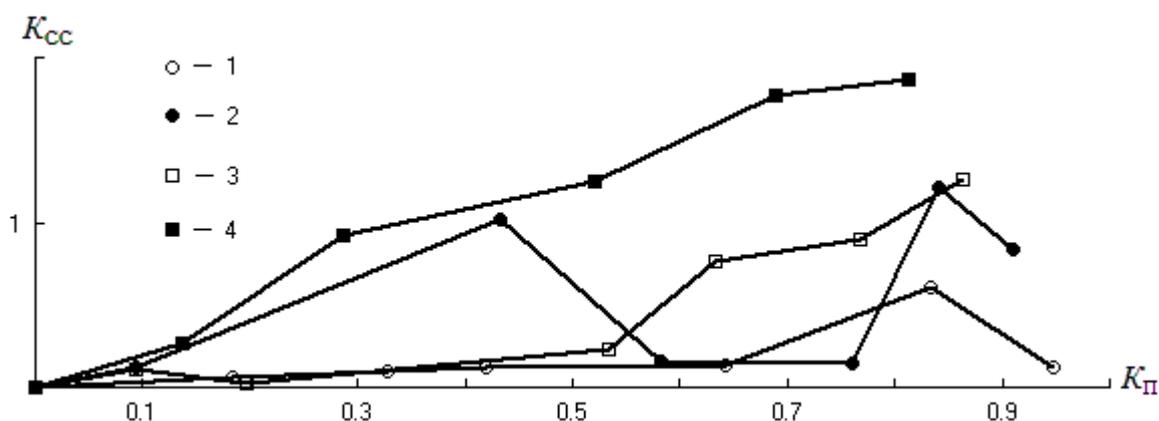


Рисунок 3.25 - Зависимости критерия смазывающих свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении частично синтетических моторных масел: 1-Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, 2- Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, 3-ТНК Супер 5W-40 SL/CF, 4-Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Дальнейшее увеличение коэффициента поглощения светового потока на втором участке для масел ТНК Супер 5W-40 SL/CF (кривая 3) и Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF (кривая 1) вызывает увеличение критерия смазывающих свойств, а для масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF (кривая 2) его уменьшение с последующей стабилизацией, а затем повторное увеличение. Для масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF характерно непрерывное увеличение критерия смазывающих свойств.

Можно полагать, что смазывающие свойства масел повышаются на втором участке за счет образования вторичных продуктов окисления.

3.3 Результаты исследования синтетических моторных масел

Для исследования выбраны следующие синтетические моторные масла: Agip Tec sint 5W-30 SJ/CF, Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life. Их характеристики приведены в разделе 2.2.

Исследование масел проводилось в два этапа по методике, приведенной в разделе 2. На первом этапе определялась термоокислительная стабильность масел при температуре 180°C, на втором оценивались изменения противоизносных свойств масел при их окислении.

Согласно классификации производителя по API, масла Agip Tec sint 5W-30 SJ/CF, Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life относятся к разным группам эксплуатационных свойств, при этом Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life, согласно характеристике производителя [47], при различных условиях эксплуатации проявляет различные эксплуатационные свойства. Задача исследований заключается в подтверждении этой классификации.

Термоокислительная стабильность является комплексным показателем, который определялся по коэффициенту поглощения светового потока при фотометрировании окисленного масла, испаряемости и изменению вязкости.

На рисунке 3.26 представлены зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления масел при температуре 180°C с перемешиванием мешалкой с частотой вращения 300±2 об/мин. После каждых 8 –ми часов испытания проба окисленного масла взвешивалась, определялась масса испарившейся части масла, отбирались пробы для измерения вязкости, фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока.

Фотометрирование производилось при толщине фотометрируемого слоя 2мм, продолжительность испытаний определялась временем достижения коэффициентом поглощения светового потока значений $K_{\Pi}=0,7 \dots 0,8$ ед.

Согласно данным (рисунок 3.26), зависимости коэффициента K_{Π} от времени испытания имеют два линейных участка, вызванных образованием продуктов

различной оптической плотности. Первый участок зависимости до изгиба характеризует увеличение концентрации растворимых (первичных) продуктов окисления, а второй образование гелеобразных (вторичных) продуктов с большой оптической плотностью. Наличие вторичных продуктов установлено центрифугированием окисленных проб при $K_{\Pi} > 0,5$ ед. Начало образования вторичных продуктов определяется продлением второго участка зависимости $K_{\Pi} = f(t)$ до пересечения с осью абсцисс.

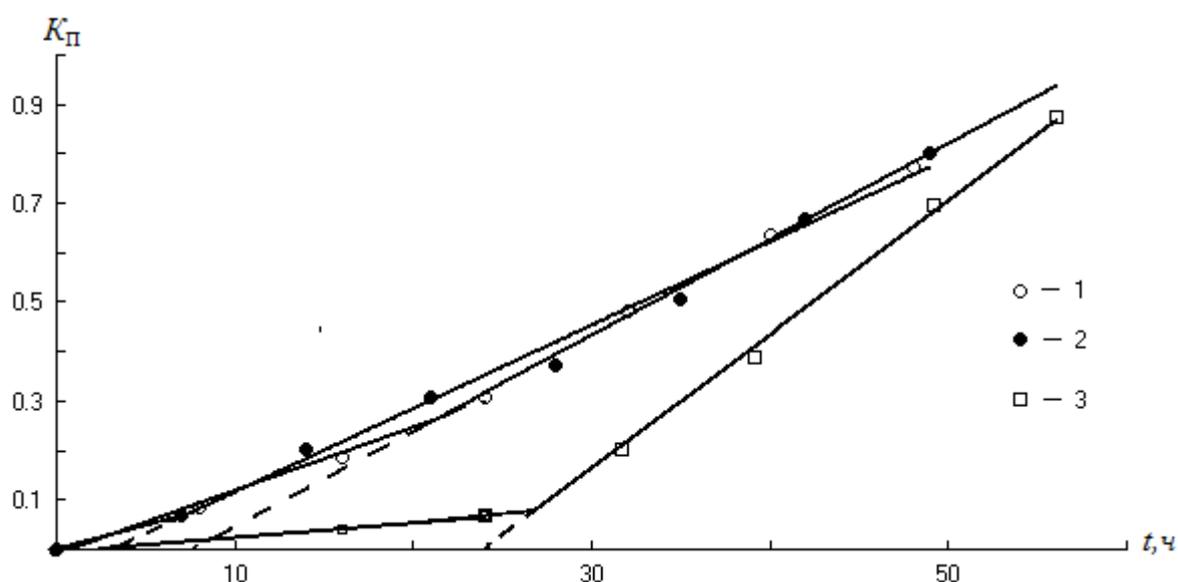


Рисунок 3.26 - Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Время начала процесса окисления и образования вторичных продуктов с момента начала испытания приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Данные по времени начала окисления и образования вторичных продуктов.

Марка масла	Время начала окисления масел, ч	Время начала образования гелеобразных продуктов окисления, ч
Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF	0,74	7,65
Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	0	3,1
Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	2,3	23,9

По данным таблицы 3.6 видно, что наибольшее время сопротивления окислению и образованию вторичных продуктов установлено для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF – 2,3ч и 23,9ч соответственно. Время достижения значения коэффициента поглощения светового потока, равного 0,8ед, характеризующего потенциальный ресурс, для исследуемых масел составило: 48,9ч - Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF; 50,5ч - Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF; 53,4ч - Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF и соответствует заявленной классификации.

Процесс окисления описывается кусочно-линейными уравнениями для всех участков и масел:

$$K_{\Pi} = a(t - t_{\text{H}}), \quad (3.49)$$

где a - скорость окисления, ч^{-1} ; t - время испытания, ч; t_{H} - время начала процесса окисления или образования вторичных продуктов (t_{H} для первого участка равно нулю), ч.

Регрессионные уравнения процессов окисления сведены в таблице 3.7 для исследуемых масел.

Таблица 3.7 - Регрессионные уравнения процесса окисления синтетических моторных масел.

Марка масла	Первый участок	Второй участок	Потенциальный ресурс (при $K_{\Pi}=0,8\text{ед}$), ч
Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF	$K_{\Pi} = 0,013(t-0,75)$	$K_{\Pi} = 0,02(t-7,8)$	48,9
Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	$K_{\Pi} = 0,0096t$	$K_{\Pi} = 0,017(t-3)$	50,5
Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	$K_{\Pi} = 0,003(t-2,28)$	$K_{\Pi} = 0,03(t-23,9)$	53,4

Наибольшая средняя скорость образования первичных продуктов окисления $0,013\text{ч}^{-1}$ установлена для масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, а наименьшая $0,003\text{ч}^{-1}$ для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF. Наибольшая средняя скорость образования вторичных продуктов окисления $0,03\text{ч}^{-1}$ установлена для масла Mobil Su-

per Syn 0W-40 SJ/SL/CF, а наименьшая $0,017\text{ч}^{-1}$ для масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF.

Вязкость окисленных масел (рисунок 3.27.) оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_{μ} , определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного (исходного).

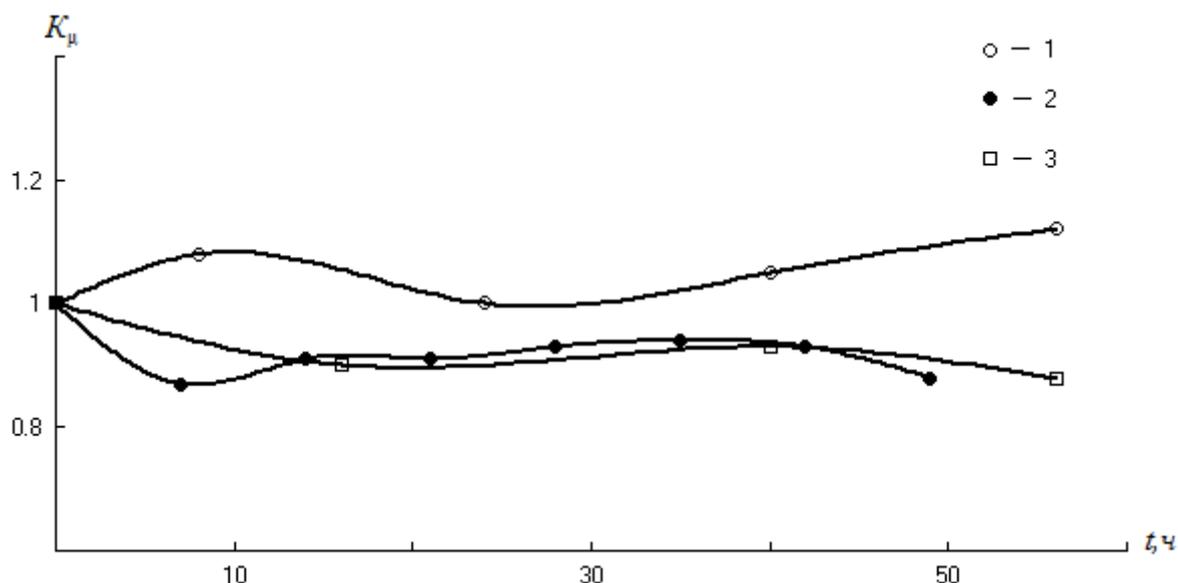


Рисунок 3.27 - Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени испытания моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Установлено, что вязкость при окислении масел Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF(кривая 2) и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life(кривая 3) в среднем уменьшается за 56 часов испытания на 10% по отношению к товарному маслу, что указывает на стабильность вязкости при окислении и хорошие пусковые свойства масел в холодный период эксплуатации двигателя. Вязкость масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF (кривая 1) за первые 8 часов окисления увеличивается на 10%, что понижает пусковые свойства в холодный период для этого этапа эксплуатации масла, а в конце она увеличилась на 12%. (рисунок 3.27). Все образцы масел показали стабильные вязкостные свойства на протяжении всего времени испытания.

Испаряемость масла является важным показателем эксплуатационных и качественных характеристик моторного масла. На рисунке 3.28 приведены результаты испытаний синтетических моторных масел.

Наибольшая испаряемость установлена для масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF(кривая 1), а наименьшая для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF New Life (кривая 3). Кроме того, точки на оси ординат указывают на начальное содержание в маслах легких фракций и воды.

Анализируя зависимости изменения относительной вязкости и испаряемости от времени окисления синтетических моторных масел установлено, что их испаряемость не зависит от вязкости и описывается полиномом второго порядка:

$$G = at^2 + bt + c, \quad (3.50)$$

где a, b и c – коэффициенты, характеризующие испаряемость испытуемого масла.

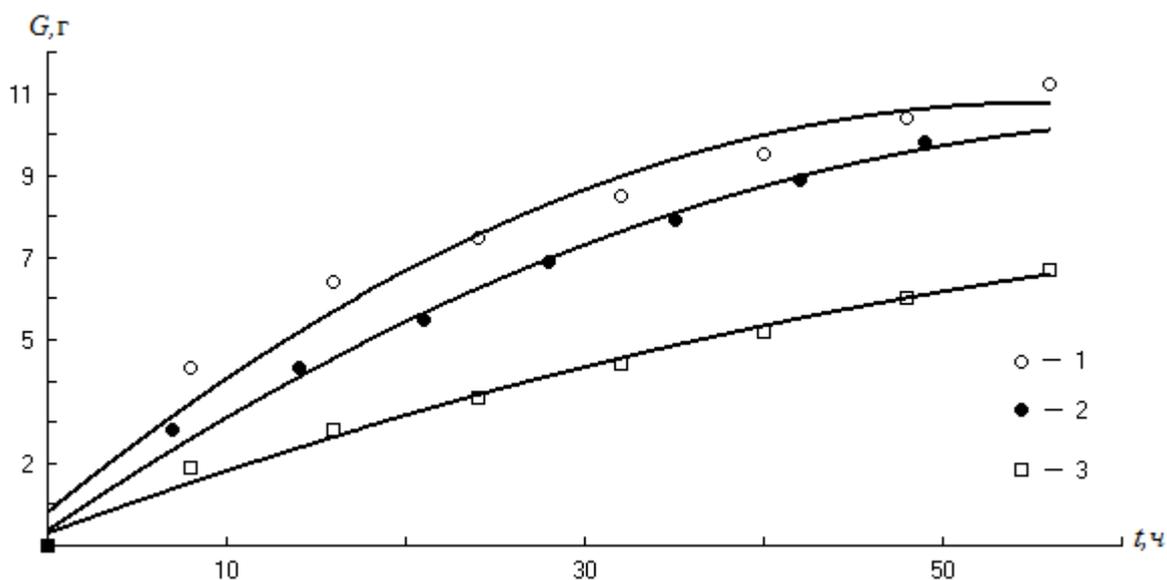


Рисунок 3.28 - Зависимости испаряемости от времени испытания моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Регрессионные уравнения для испытуемых масел имеют вид:

$$\text{Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF} \quad G = -0,32 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,36t + 0,8 \quad (3.51)$$

$$\text{Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF} \quad G = -0,22 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,43t + 0,4 \quad (3.52)$$

$$\text{Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF} \quad G = -0,08 \cdot 10^{-2} t^2 + 0,16t + 0,3 \quad (3.53)$$

Коэффициент корреляции 0,99.

Максимальная средняя скорость испарения 0,43г/ч установлена для масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, а минимальная 0,16г/ч для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Для оценки влияния продуктов окисления на вязкость и испаряемость синтетических масел исследована связь этих параметров от коэффициента поглощения светового потока (рисунки 3.29, 3.30).

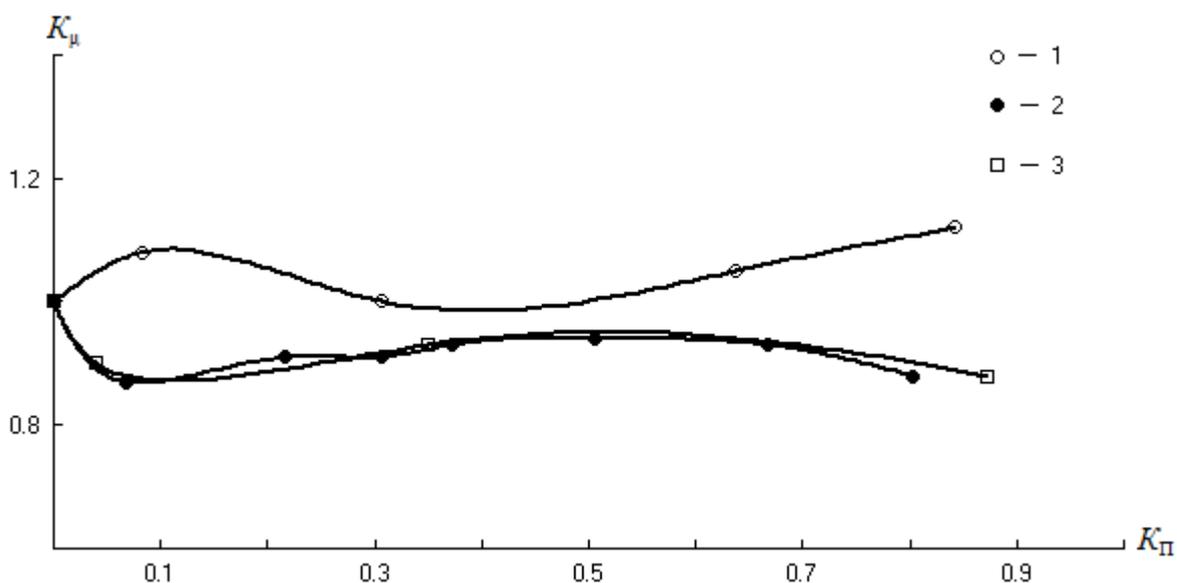


Рисунок 3.29 - Зависимости коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Установлено, что вязкость синтетических масел в начале окисления практически не зависит от концентрации продуктов окисления (рисунок 3.29), а испаряемость в первые часы окисления увеличивается более интенсивно, чем оптические свойства (рисунок 3.30). Эти явления происходят в период образования растворимых продуктов окисления. С появлением вторичных продуктов окисления испаряемость синтетических масел уменьшается по сравнению с изменениями коэффициента поглощения светового потока, т.е. в этот период большая часть тепловой энергии поглощается продуктами окисления - происходит перераспределение тепловой энергии.

Регрессионные уравнения зависимостей испаряемости от коэффициента по-

глощения светового потока имеют вид для масел:

$$\text{Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF} \quad G = -15,3 K_{\Pi}^2 + 23,6 K_{\Pi} + 1,4 \quad (3.54)$$

$$\text{Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF} \quad G = -11 K_{\Pi}^2 + 20 K_{\Pi} + 0,6 \quad (3.55)$$

$$\text{Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF} \quad G = -11,2 K_{\Pi}^2 + 15 K_{\Pi} + 1,7 \quad (3.56)$$

Коэффициент корреляции 0,98 – 0,99.

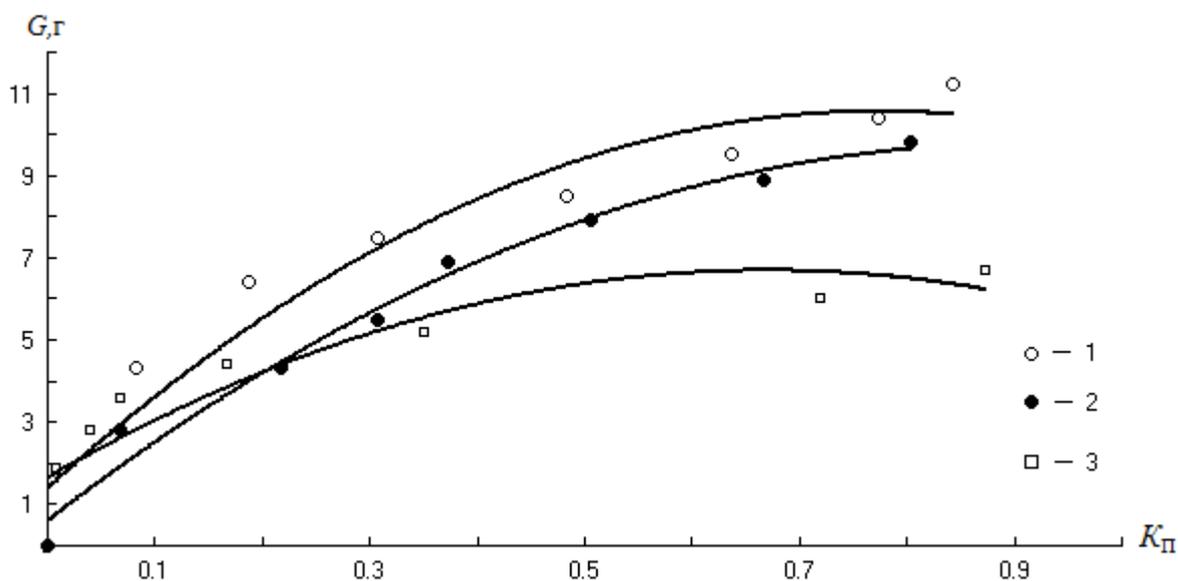


Рисунок 3.30 - Зависимости коэффициента испаряемости от коэффициента поглощения светового потока при испытании моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Согласно данным, наибольшая средняя скорость испарения 23,6г/ч при увеличении концентрации продуктов окисления установлена для масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, а наименьшая 15г/ч для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF. Концентрация легких фракций и воды наибольшая 1,7г установлена для товарного масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Термоокислительную стабильность предложено определять коэффициентом $E_{\text{ТОС}}$, определяемым суммой коэффициентов поглощения потока K_{Π} и испаряемости K_G , так как в процессе окисления избыточная тепловая энергия расходуется на образование продуктов окисления и испарения.

В этой связи физический смысл показателя термоокислительной стабильности заключается в том, что он характеризует сопротивляемость смазочного мате-

риала окислению и испарению, поэтому, чем меньше значение этого показателя, тем выше термоокислительная стабильность данного смазочного материала при заданной температуре и времени испытания.

Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности $E_{\text{ТОС}}$ от времени испытания является кусочно-линейной функцией (рисунок 3.31) имеющей изгиб при некотором значении $E_{\text{ТОС}}$.

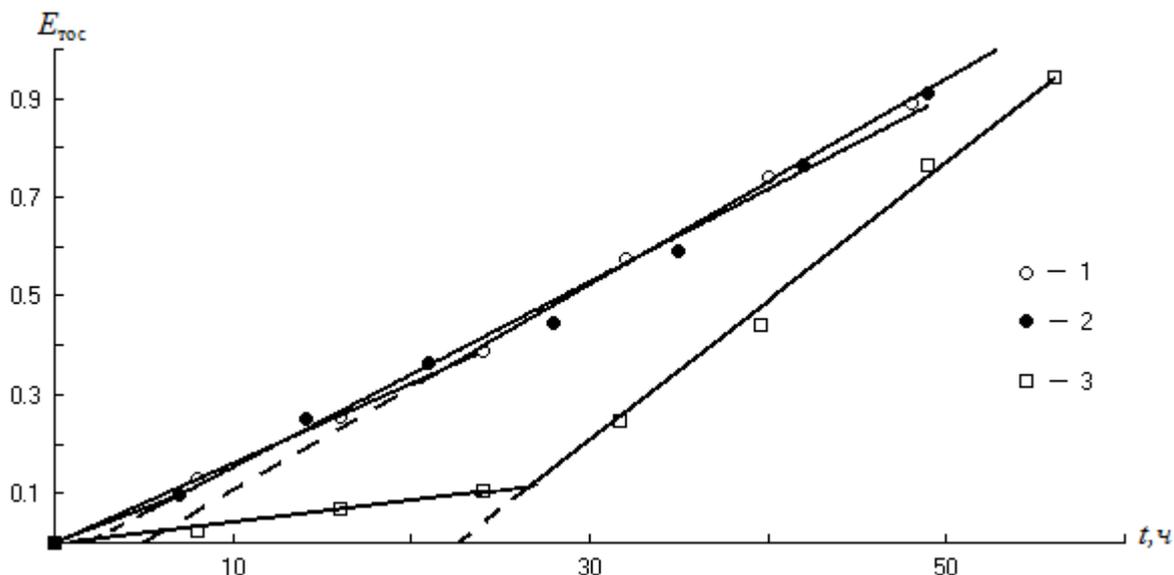


Рисунок 3.31 - Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания синтетических моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Регрессионные уравнения двух участков зависимостей коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания имеют вид для масел:

	Первый участок	Второй участок	
Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF	$E_{\text{ТОС}}=0,0116(t-0,08)$	$E_{\text{ТОС}}=0,02(t-5)$	(3.57)

Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	$E_{\text{ТОС}}=0,014t$	$E_{\text{ТОС}}=0,02(t-1,75)$	(3.58)
------------------------------	-------------------------	-------------------------------	--------

Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	$E_{\text{ТОС}}=0,004(t-0,88)$	$E_{\text{ТОС}}=0,028(t-22,6)$	(3.59)
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------

Коэффициент корреляции – 0,99.

Средняя скорость образования первичных продуктов окисления (участок 1) наибольшая $0,014\text{ч}^{-1}$ установлена для масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, а наименьшая $0,004\text{ч}^{-1}$ для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF. Средняя ско-

рость образования вторичных продуктов окисления (участок 2) наибольшая $0,028\text{ч}^{-1}$ установлена для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF, у остальных масел она одинакова и равна $0,02\text{ч}^{-1}$. Время начала образования вторичных продуктов самое большое 22,6ч установлено для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF, а самое малое 1,75ч – для масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF.

Для исследования противоизносных свойств при окислении синтетических моторных масел пробы отбирались при значениях коэффициента поглощения светового потока, приблизительно равных 0,1;0,2;...0,8ед. Испытания проводились на трёхшариковой машине трения со схемой «шар-цилиндр» [67] при постоянных параметрах: нагрузка на контакт 13Н; скорость скольжения 0,68м/с; температура масла в объеме 80°C ; время каждого испытания 2 часа. Через центральный шар пропускался ток от внешнего стабилизированного источника питания напряжением 3В и величиной 100мкА, который устанавливался при статическом положении образцов (шара и обоймы). При изнашивании величина тока изменялась вследствие пластической, упругопластической и упругой деформаций, протекающих на фрикционном контакте, а также механохимических процессов на поверхностях трения, под влиянием продуктов окисления. Величина тока посредством преобразователя RS-202-RS-485 записывалась на компьютер в виде диаграммы.

Величина износа измерялась при помощи микроскопа «Альтами МЕТ 1М» на трех шарах как среднеарифметическое значение диаметра пятна износа из двух опытов и выражалась в миллиметрах.

На рисунке 3.32 представлены зависимости параметра износа И от коэффициента поглощения светового потока K_{Π} .

Согласно данным, противоизносные свойства при окислении масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF (кривая 1) понижаются до значения коэффициента $K_{\Pi}=0,203\text{ед}$, а далее повышаются до конца испытания, но не превышают противоизносные свойства товарного масла (точка на ординате).

Противоизносные свойства масел Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF изменяются скачкообразно, при этом у первого масла в начале испытания идет понижение противоизносных свойств до значения $K_{\Pi}=\dots$

0,183ед, а у второго повышение до значения $K_{\Pi}=0,1$ ед.

При дальнейшем окислении масел Mobil Super 3000 5W-40 и Mobil Super Syn 0W-40 их противоизносные свойства имеют тенденцию к понижению. Такое нелинейное изменение противоизносных свойств вызвано влиянием присадок совместно с появлением в маслах определенной концентрации вторичных продуктов окисления.

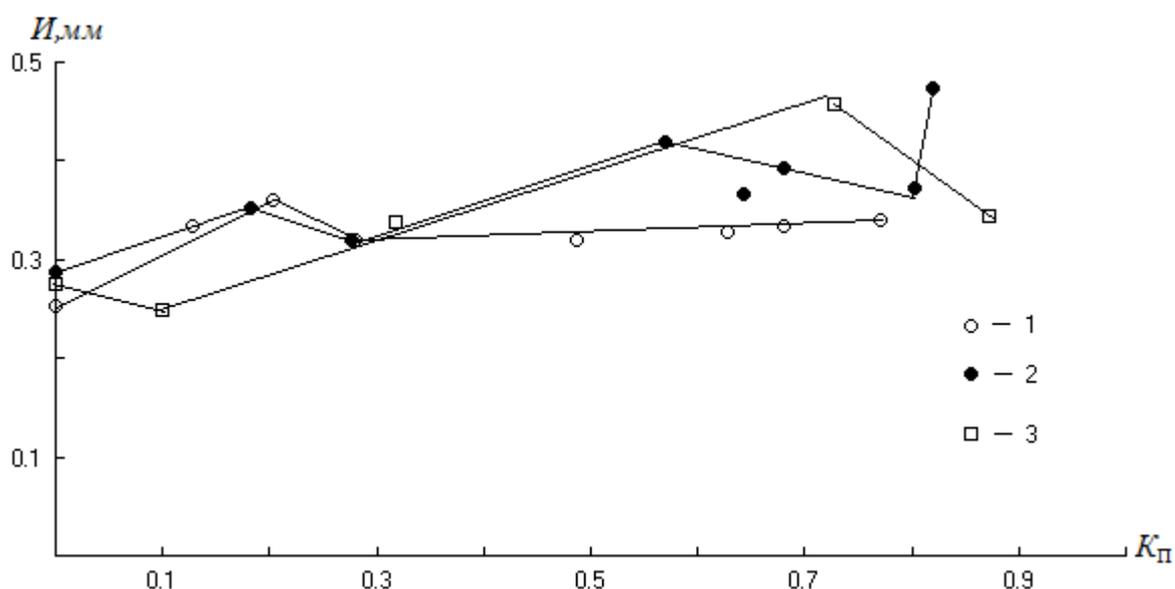


Рисунок 3.32 - Зависимости диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока при испытании синтетических моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Противоизносные свойства предложено оценивать критерием противоизносных свойств, определяемым отношением:

$$\Pi = K_{\Pi}/И, \quad (3.60)$$

где K_{Π} - коэффициент поглощения светового потока; И - диаметр пятна износа, мм.

Данный критерий (рисунок 3.33) характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта. Зависимости критерия противоизносных свойств Π описываются эмпирическим линейным уравнением вида $\Pi = a_n K_{\Pi}$ для масел:

$$\text{Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF} \quad \Pi = 3,31 K_{\Pi} \quad (3.61)$$

$$\text{Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF} \quad \Pi = 2,61 K_{\Pi} \quad (3.62)$$

$$\text{Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF} \quad \Pi = 3,23 K_{\Pi} \quad (3.63)$$

Коэффициент корреляции – 0,98.

Коэффициент a_n характеризует среднюю скорость изменения критерия Π и чем она выше, тем выше противоизносные свойства исследуемого масла.

Согласно данных (рисунок 3.33), противоизносные свойства масел Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF (кривая 1) и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF (кривая 3) практически одинаковы, а масло Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF (кривая 2) им уступает на 20%.

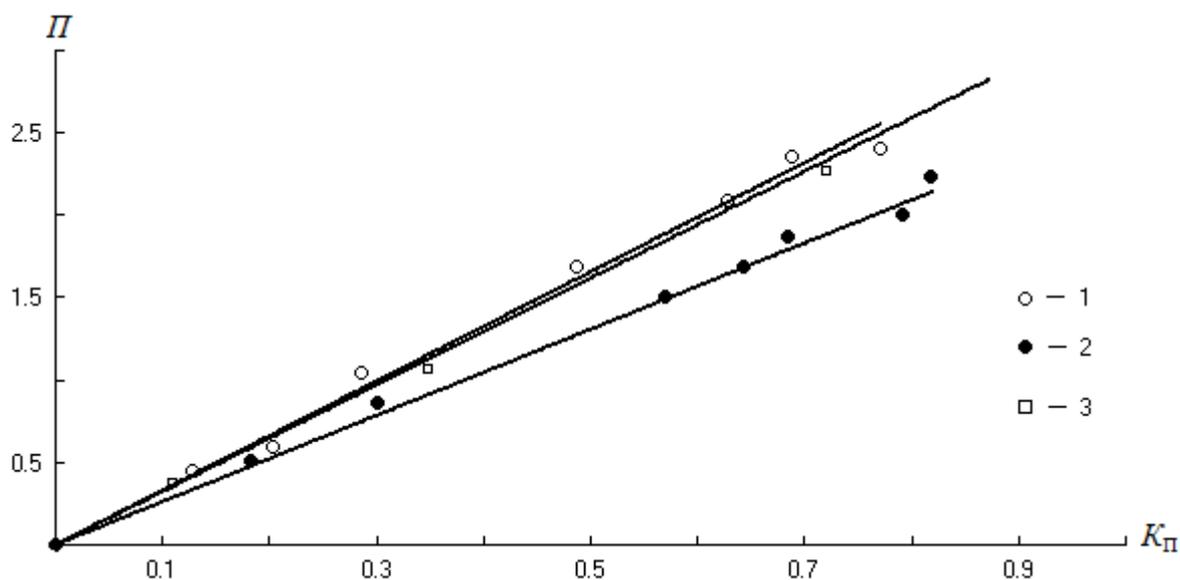


Рисунок 3.33 - Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

На рисунке 3.34 представлены диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт товарных синтетических моторных масел. Здесь видны три характерные участка: 1- где ток равен 100мкА (заданный), участок, характеризующий продолжительность пластической деформации; 2-ток уменьшающийся до определенной стабильной величины - участок упругопластической деформации; 3-участок, где ток колеблется около определенной величины, на котором

протекают упругие деформации, характеризующий формирование и разрушение хемосорбционных защитных слоев на поверхностях трения.

Из диаграмм видно, что наименьшая величина тока, протекающего через фрикционный контакт при установившемся изнашивании, установлена для товарного масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF (диаграмма *а*), показавшего наименьший износ (точка на ординате рис 3.32). Для масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF (диаграмма *б*) амплитуда тока при установившемся изнашивании максимальная, поэтому износ по сравнению с другими маслами максимальный.

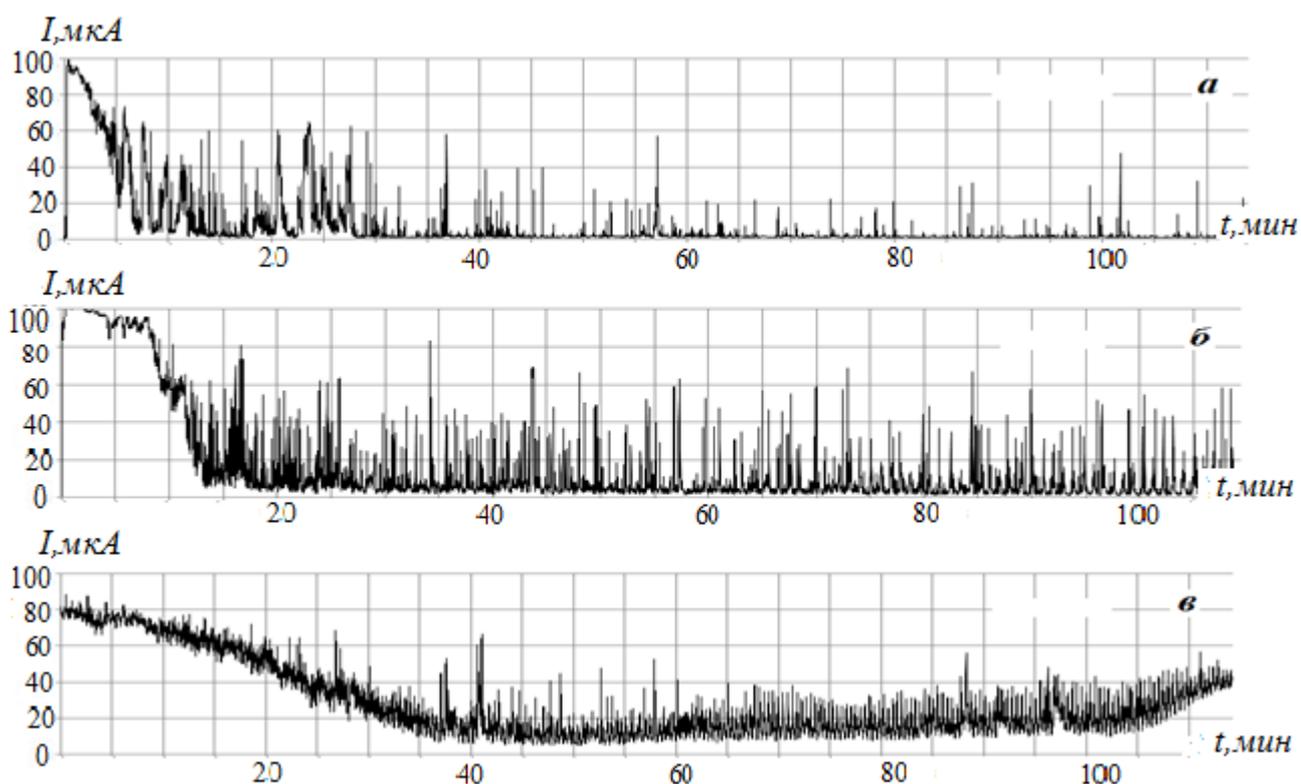


Рисунок 3.34 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании товарных синтетических моторных масел: *а*-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, *б*-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, *в* - Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

По диаграммам записи тока, протекающего через фрикционный контакт при окислении масел, на примере масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF (рисунок 3.35), можно судить об интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте, характеризующих электрическое сопротивление, образующихся на поверхностях трения граничных слоев.

Так, чем больше колебания тока при установившемся изнашивании (упругий контакт), тем прочность граничных слоев, образующихся на поверхностях трения ниже (диаграмма *в*), а колебания тока вызваны процессами формирования и разрушения граничных слоев.

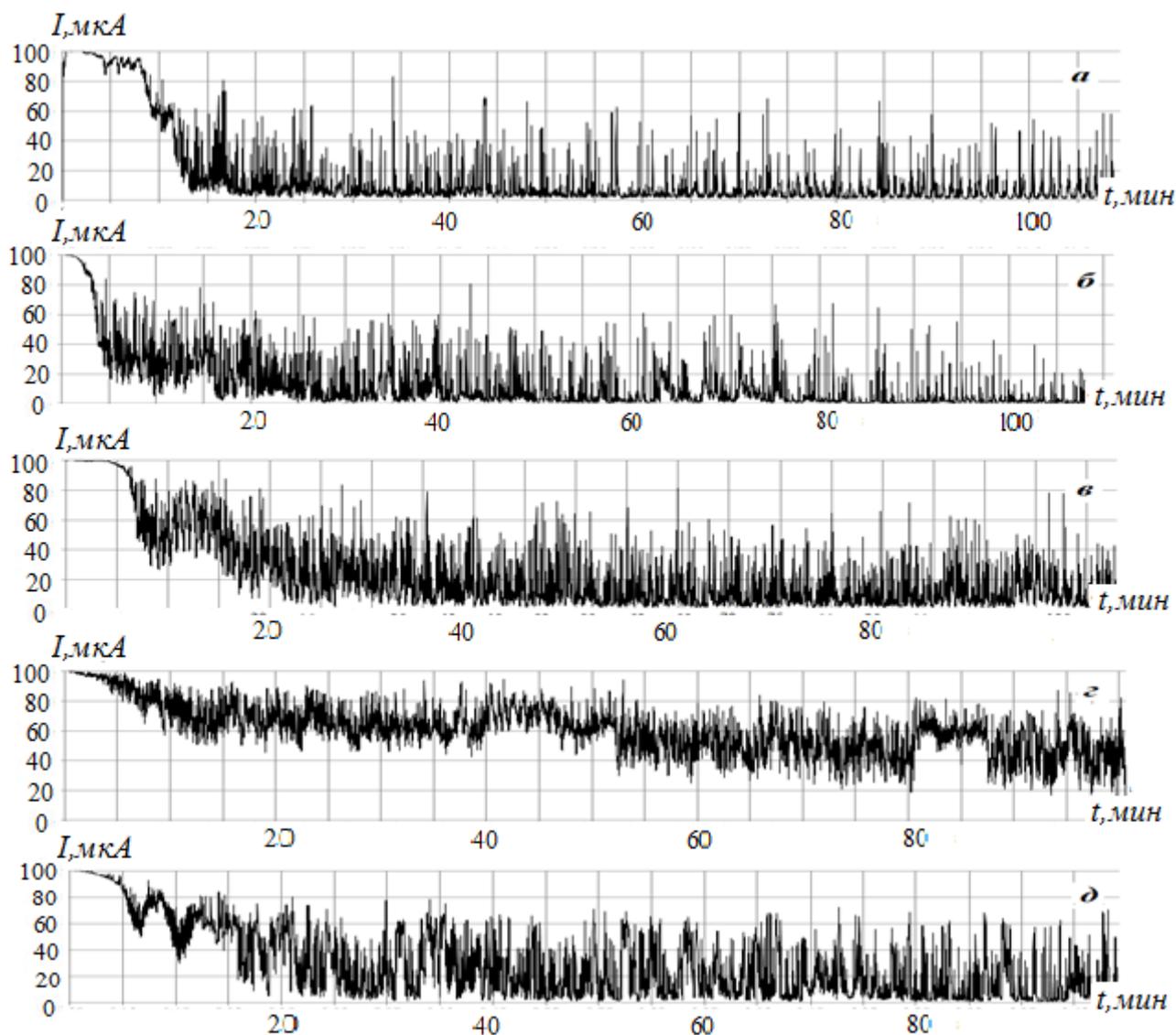


Рисунок 3.35 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при окислении синтетического моторного масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF: *а* - товарное, *б* - $K_{II}=0,183$ ед, *в* - $K_{II}=0,57$ ед; *г* - $K_{II}=0,643$ ед; *д* - $K_{II}=0,68$ ед.

По динамике изменения амплитуды тока, протекающего через фрикционный контакт товарных и окисленных масел, можно судить о времени формирования защитных граничных слоев, их разрушении и восстановлении в зависимости от степени окисления. С увеличением коэффициента поглощения светового пото-

ка, обнаруживается тенденция к уменьшению времени формирования защитного слоя на поверхности трения (приложение 2).

Зависимости времени формирования площади фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока приведены на рисунке 3.36.

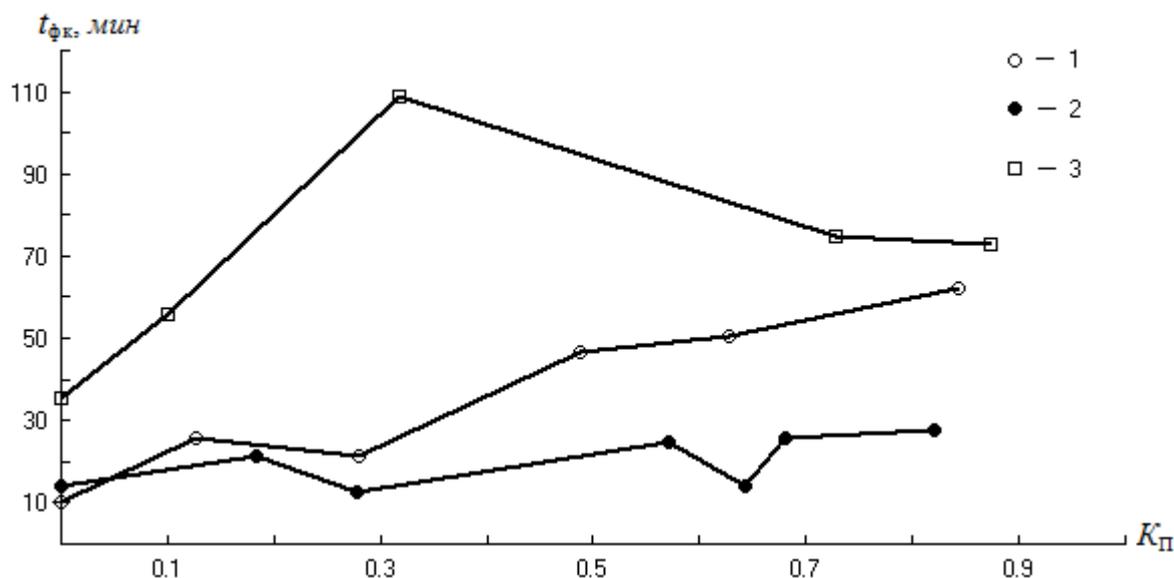


Рисунок 3.36 - Зависимости времени формирования фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при испытании моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Время начала минимального значения тока имеет связь с величиной износа, т.е. суммарное время пластической и упругопластической деформаций определяет время формирования фрикционного контакта, а при упругой деформации происходят процессы формирования и разрушения граничных защитных слоев, при которых ток принимает минимальное значение. Значения минимального тока при установившемся изнашивании для каждого масла при разной степени окисления имеют свою величину, которая характеризуется наличием электропроводных продуктов окисления, которые способствуют снижению износа, увеличивая при этом электропроводность контакта за счет увеличения кислотности масла (рисунок 3.36).

Согласно данным, в начале окисления время формирования фрикционного контакта $t_{\text{ФК}}$ увеличивается по сравнению с товарным маслом для всех исследо-

ванных синтетических масел. Однако с увеличением коэффициента поглощения светового потока время $t_{\text{ФК}}$ уменьшается для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF (кривая 3), а для остальных масел после уменьшения наступает период увеличения времени $t_{\text{ФК}}$ во всем диапазоне изменения коэффициента поглощения светового потока. Зависимости критерия смазывающих свойств синтетических моторных масел от коэффициента поглощения светового потока представлены на рисунке 3.37.

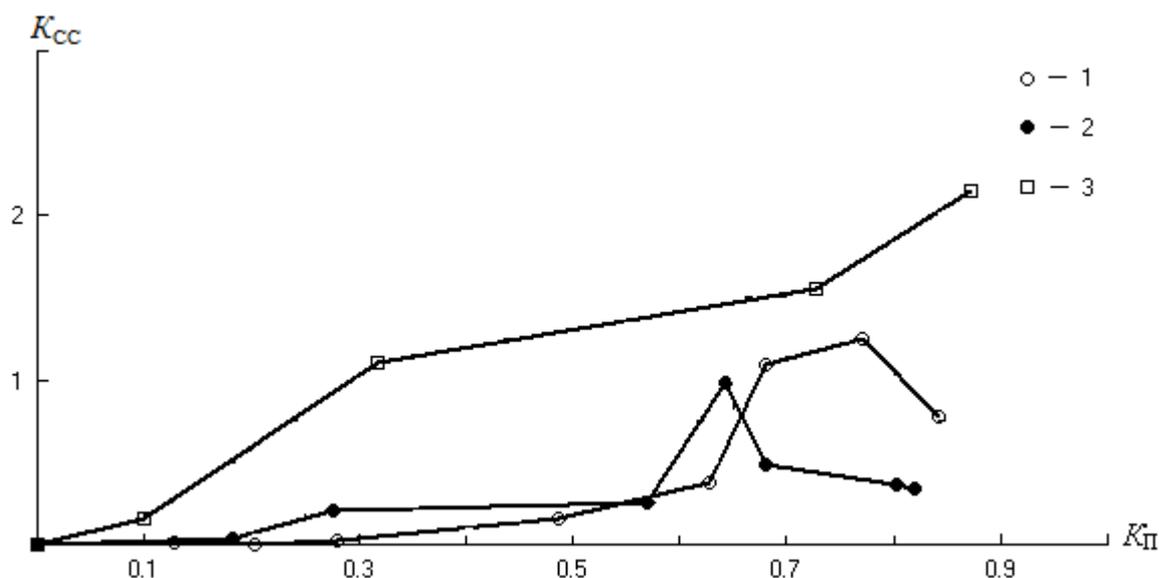


Рисунок 3.37 - Зависимости критерия смазывающих свойств от коэффициента поглощения светового потока при испытании синтетических моторных масел: 1-Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF, 2-Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF, 3-Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Как в минеральных и частично синтетических, в синтетических маслах также установлено два участка различной интенсивности изменения критерия смазывающих свойств. Первый участок характеризуется менее интенсивным изменением критерия, а второй - значительными колебаниями для масел Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF (кривая 1) и Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF (кривая 2).

Для масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF установлено увеличение критерия смазывающих свойств во всем диапазоне изменения коэффициента поглощения светового потока. Наилучшими смазывающими свойствами характеризуется масло Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

3.4. Оценка влияния базовой основы на процессы окисления моторных масел

Основной целью исследований в данном подразделе является оценка влияния базовой основы на процессы окисления. В качестве параметров оценки (сравнения) приняты: потенциальный ресурс, определяемый по коэффициентам поглощения светового потока и термоокислительной стабильности, испаряемость, коэффициент относительной вязкости, скорость образования первичных продуктов окисления и время начала образования вторичных продуктов окисления.

Потенциальный ресурс исследуемых масел по коэффициентам поглощения светового потока и термоокислительной стабильности определялся временем достижения этими показателями значений равных 0,8ед. Причем, коэффициент поглощения светового потока учитывает только интенсивность процессов окисления, а термоокислительная стабильность учитывает как процессы окисления, так и процессы испарения. Показатели испарения и вязкости определялись после 40 часов испытания масел, что позволяло сравнивать масла и оценивать влияние продуктов окисления.

Скорость образования первичных продуктов окисления характеризует сопротивляемость масел температурным воздействиям, а время начала образования вторичных продуктов окисления характеризует начало загрязнения масляной системы двигателей.

Применение предложенных параметров при окислении моторных масел расширяет информацию об их свойствах и позволяет осуществлять обоснованный выбор для двигателей различной степени нагруженности.

Результаты исследования представлены в таблице 3.8. Анализ полученных результатов показывает, что термоокислительная стабильность незначительно зависит от базовой основы моторных масел.

Так, наибольший потенциальный ресурс по коэффициенту поглощения светового потока установлен для минерального моторного масла М-8Г₂ – 75 часов и частично синтетического Ravenol TSI 10W-40SM/CF – 73 часа.

Таблица 3.8 – Сравнительные данные по показателям процессов окисления моторных масел различной базовой основы.

Марка моторного масла	Потенциальный ресурс, час		Испаряемость за 40 часов, г	Коэффициент относительной вязкости за 40 часов, ед.	Скорость образования первичных продуктов окисления, ч ⁻¹	Начало образования вторичных продуктов окисления, ч.	Скорость образования вторичных продуктов окисления ч ⁻¹
	по Кдп	по Eтос					
Минеральные	75	66,9	6,3	1,1	0,009	10,0	0,012
	67,1	61,3	4,2	1,44	0,01	10,0	0,04
	57,5	48,1	9,6	0,91	0,01	17,5	0,02
	44,5	36,3	9,6	0,85	0,016	4,5	0,02
Частичные	54,3	49,4	8,9	1,0	0,01	19,5	0,023
	33,3	33,8	8,9	0,92	0,016	7,3	0,03
	53,5	46,3	9,3	0,62	0,012	13,0	0,02
	73	70	4,7	1,16	0,009	11,89	0,013
Синтетические	48,9	43,4	9,5	1,05	0,013	7,65	0,02
	50,5	44,9	8,5	0,95	0,01	3,1	0,017
	53,4	51,3	5,2	0,93	0,003	23,9	0,03

Для масла М-10Г₂к потенциальный ресурс – 67,1 часа, Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC – 57,5 часа. Наименьший потенциальный ресурс установлен для частично синтетического моторного масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF – 33,3 часа; минерального Utech navigator 15W-40 SG/CD – 44,5 часа и синтетического Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF – 48,9 часа.

Эти данные показывают, что установленная для них производителем группа эксплуатационных свойств не соответствует полученным экспериментальным данным. Так, минеральное масло Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC с потенциальным ресурсом 57,5 часа относится к более низкой группе эксплуатационных свойств, тогда как частично синтетическое масло Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF с потенциальным ресурсом 33,3 часа и минеральное Utech navigator 15W-40 SG/CD относятся к более высоким группам эксплуатационных свойств, что указывает на несовершенство системы классификации моторных масел.

Потенциальный ресурс по коэффициенту термоокислительной стабильности самый высокий установлен для частично синтетического масла Ravenol TSI 10W-40 SM/CF – 70 часов, минеральных дизельных масел М-8Г₂ – 66,9 часа, М-10Г₂к – 61,3 часа и синтетического Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF – 51,3 часа. Самый низкий потенциальный ресурс установлен для минерального масла Utech navigator 15W-40 SG/CD -36,3 часа, частично синтетического Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF -33,8 часа и синтетического Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF -43,4 часа. Последние два масла, хотя относятся к одной группе эксплуатационных свойств SJ/CF, но отличаются потенциальным ресурсом в 1,28 раза.

Необходимо отметить, что понижение потенциального ресурса по коэффициенту термоокислительной стабильности по сравнению с потенциальным ресурсом, определяемым по коэффициенту поглощения светового потока, связано с учетом испаряемости масел, поэтому достижение коэффициента $K_{\Pi}=0,8$ ед наступает за более короткое время.

Наименьшая испаряемость за 40 часов испытания установлена для минерального дизельного масла М-10Г₂к – 4,2г, частично синтетического Ravenol TSI 10W-40SM/CF -4,7г и синтетического Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF – 5,2г, а

наибольшая – для минеральных масел Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC и Utech navigator 15W-40 SG/CD -9,6г, а также для синтетического масла Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF - 9,5г.

Наибольшее увеличение кинематической вязкости при окислении моторных масел за 40 часов испытания установлено для дизельного минерального масла М-8Г₂ – в 1,1 раза и частично синтетического Ravenol TSI 10W-40SM/CF- в 1,16 раза; а наибольшее уменьшение, по сравнению с товарным образцом, установлено для частично синтетического масла ТК Супер 5W-40 SL/CF- на 0,62ед, минеральных масел Utech navigator 15W-40 SG/CD – на 0,85 ед и Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC – на 0,91ед.

Наименьшая скорость образования первичных продуктов окисления установлена для синтетического масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF – 0,003ч⁻¹, минерального М-8Г₂ и частично синтетического Ravenol TSI 10W-40SM/CF - 0,009 ч⁻¹, а наибольшая для минерального Utech navigator 15W-40 SG/CD и частично синтетического Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF - 0,016ч⁻¹ и синтетического Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF – 0,013ч⁻¹.

Наибольшее время начала образования вторичных продуктов окисления установлено для синтетического масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF -23,9 часа, частично синтетического Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF – 19,5 часа и минерального Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC – 17,5 часа, а наименьшее для синтетического Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF -3,1 часа и минерального Utech navigator 15W-40 SG/CD – 4,5 часа.

Приведенная информация в таблице 3.8 позволяет объективно осуществлять выбор моторных масел в зависимости от температурного режима работы двигателей. Кроме того, для увеличения потенциального ресурса моторных масел необходимо понижать температурный режим.

Результаты исследования моторных масел различной базовой основы, представленные в разделах 3.1 – 3.3, показывают, что базовая основа практически не влияет на процессы окисления, характеризующиеся последовательным образованием в начале первичных продуктов окисления переходящих во вторичные с

большей оптической плотностью.

3.5 Оценка влияния продуктов окисления моторных масел различной базовой основы на противоизносные свойства

Анализом зависимостей коэффициента поглощения светового потока от времени окисления моторных масел различной базовой основы установлен их изгиб, подтверждающий образование при окислении двух видов продуктов с различной оптической плотностью. Причем установлено, что изгиб зависимостей происходит при различных значениях коэффициента поглощения светового потока и времени окисления, что указывает на различное соотношение концентраций первичных и вторичных продуктов окисления в маслах. В этой связи противоизносные свойства моторных масел должны зависеть не только от базовой основы, но и от соотношения концентраций продуктов окисления в масле [68,69].

Противоизносные свойства оценивались по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трёх шарах из двух параллельных опытов. Установлено, что для минеральных масел износ колеблется от 0,2мм до 0,4мм, частично синтетических от 0,21мм до 0,39мм и синтетических от 0,25мм до 0,47мм. Для минерального масла Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, частично синтетических Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF и ТНК Супер 5W-40 SL/CF, а также синтетических Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF и Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF в начальный период окисления противоизносные свойства понижаются по сравнению с товарным маслом. Это связано с периодом приспособляемости масел к новым температурным условиям.

Для оценки влияния базовой основы моторных масел при окислении на противоизносные свойства предложен эмпирический критерий P , определяемый отношением концентрации продуктов окисления, выраженной коэффициентом поглощения светового потока K_{Π} к среднеарифметическому значению диаметра пятна износа I .

$$P = K_{\Pi}/I. \quad (3.64)$$

Зависимость критерия противоизносных свойств от концентрации продуктов окисления описывается линейными уравнениями:

$$П = a_n K_{П}, \quad (3.65)$$

где a_n – коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия противоизносных свойств.

В таблице 3.9 представлены экспериментальные данные по скорости изменения критерия противоизносных свойств исследуемых масел.

Таблица 3.9 - Экспериментальные данные скорости изменения критерия противоизносных свойств окисленных моторных масел.

Марка моторного масла		Скорость изменения критерия противоизносных свойств
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 Tec sint 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

Анализ результатов, представленных в таблице 3.9, показал, что наилучшими противоизносными свойствами характеризуются: минеральные масла М-8Г₂, М-10Г₂к, Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC; частично синтетические Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF и Ravenol TSI 10W-40 SM/CF.

Более низкими противоизносными свойствами характеризуются: минеральное масло Utech navigator 15W-40 SG/CD; частично синтетическое Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF; синтетическое Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF.

Противоизносные свойства товарных масел (таблица 3.10) различаются по диаметру пятна износа незначительно - от 0,253мм до 0,293мм, независимо от базовой основы. Высокими противоизносными свойствами характеризуются: минеральное масло М-8Г₂ и частично синтетическое Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF – 0,293мм. Более высокими противоизносными свойствами характеризуются товарные масла: дизельное минеральное М-10Г₂к, частично синтетическое Ravenol TSI 10W-40 SM/CF и синтетическое Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF – 0,253мм.

В процессе окисления противоизносные свойства большинства масел повышаются и превышают противоизносные свойства товарных масел, поэтому важно исследовать влияние на противоизносные свойства первичных и вторичных продуктов окисления. Влияние продуктов окисления на противоизносные свойства моторных масел исследовано при значениях коэффициента поглощения светового потока равного 0,2 и 0,7ед. При коэффициенте 0,2ед в окисленных маслах присутствуют, в основном, первичные продукты, а при значении коэффициента 0,7ед – вторичные. Результаты исследования представлены в таблице 3.10.

Приведенные данные (таблица 3.10) показывают, что для всех масел, кроме М-10Г₂к, первичные продукты окисления понижают противоизносные свойства, а вторичные продукты их повышают для всех исследованных минеральных масел, а для частично синтетических, кроме Ravenol TSI 10W-40 SM/CF, и всех синтетических масел они понижают противоизносные свойства в сравнении с товарными.

Определение причины изменения противоизносных свойств от вида продуктов окисления исследовано процессами, протекающими на фрикционном контакте с использованием диаграмм записи тока, величина которого зависит от вида деформаций и электропроводности граничного слоя.

Метод контроля основан на использовании участков диаграмм, где происходят пластические и упругопластические деформации, в результате которых формируется пятно износа.

Таблица 3.10 – Результаты 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	0,24
	М-10Г ₂ к	0,253	0,198	0,25
	Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC	0,28	0,28	0,25
	Utech navigator 15W-40 SG/CD	0,287	0,307	0,23
Частично синтетические	Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF	0,273	0,318	0,29
	Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF	0,293	0,355	0,35
	ТНК Супер 5W-40 SL/CF	0,28	0,355	0,30
	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	0,26	0,291	0,22
Синтетические	Agip Tec sint 5W-30 SJ/CF	0,253	0,362	0,33
	Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF	0,287	0,346	0,39
	Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF	0,275	0,285	0,46

Влияние продуктов окисления на свойства граничных слоев, разделяющих поверхности трения, оценивались по времени формирования фрикционного контакта, определяемого суммарной продолжительностью пластической и упруго-пластической деформациями, а также смазывающей способностью окисленных масел, вычисляемой выражением через коэффициент K_{CC} , названный критерием смазывающих свойств:

$$K_{CC} = \Pi \cdot K_{ЭГС}, \quad (3.66)$$

где Π – критерий противоизносных свойств, мм⁻¹; $K_{ЭГС}$ – коэффициент электропроводности граничного слоя.

$$K_{\text{ЭГС}}=I_{\text{ГС}}/I_3, \quad (3.67)$$

где $I_{\text{ГС}}$ и I_3 – соответственно ток, протекающий через граничный слой и величина заданного тока, устанавливаемого в статическом состоянии пары трения, мкА.

Заданный ток устанавливался равным 100мкА от стабилизированного источника постоянного напряжения 3В [52].

Критерий смазывающей способности характеризует концентрацию продуктов окисления в граничном слое, разделяющем поверхности трения, и их электропроводность.

Время формирования номинальной площади фрикционного контакта для минеральных масел колеблется от 12,7 до 41,4мин, частично синтетических от 5,7 до 114мин, синтетических от 10 до 109мин, т.е. минеральные масла быстрее формируют площадь контакта. Кроме того, характерной особенностью зависимостей времени формирования номинальной площади фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока является то, что независимо от базовой основы моторных масел в начале процесса окисления время формирования увеличивается по отношению к товарному маслу для большинства масел. Исключением является минеральное масло М-8Г₂. Таким образом, первичные продукты окисления увеличивают время формирования площади фрикционного контакта.

Вторичные продукты окисления вызывают колебания времени формирования номинальной площади контакта, как в сторону увеличения, так и уменьшения независимо от базовой основы. Непрерывное увеличение времени формирования установлено для частично синтетического масла ТНК Супер 5W-40 SL/CF и синтетического Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Зависимости критерия смазывающих свойств $K_{\text{СС}}$ от коэффициента поглощения светового потока характеризуются двумя участками, отличающимися интенсивностью его изменения. На первом (начальном) участке зависимости, когда в маслах, независимо от базовой основы, увеличивается концентрация первичных продуктов окисления, критерий смазывающих свойств увеличивается, т.е. элек-

трическое сопротивление граничного слоя, разделяющего поверхности трения, также увеличивается. Это обусловлено увеличением кислотности масел.

На втором участке зависимости критерия смазывающих свойств от коэффициента поглощения светового потока, когда в маслах образуются вторичные продукты окисления и кислотность масел повышается, на поверхностях трения образуются защитные пленки, как результат химического взаимодействия органических кислот с металлической поверхностью. Эти пленки при изнашивании разрушаются и вновь образуются, поэтому электрические свойства граничного слоя периодически изменяются, вызывая колебания критерия смазывающих свойств для большинства масел независимо от базовой основы. Непрерывное увеличение критерия смазывающих свойств с увеличением коэффициента поглощения светового потока установлено для минерального масла Utech navigator 15W-40 SG/CD, частично синтетического Ravenol TSI 10W-40 SM/CF и синтетического Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF.

Для оценки влияния базовой основы на смазывающие способности окисленных масел предлагается сравнивать их по величине критерия смазывающих свойств в областях образования первичных и вторичных продуктов окисления при постоянных значениях коэффициента поглощения светового потока и по значению коэффициента поглощения светового потока, при котором начинается второй участок зависимости критерия смазывающих свойств от коэффициента поглощения светового потока, и чем больше значение критерия смазывающих свойств, тем выше смазывающая способность исследуемого масла [70].

В таблице 3.11 приведены характеристики смазывающих свойств моторных масел различных базовых основ. Данные характеристики определены по зависимостям, представленным на рисунках 3.13 для минеральных масел, 3.25 - частично синтетических и 3.37 – синтетических.

Смазывающие свойства определялись по значениям критерия смазывающих свойств в области образования первичных продуктов окисления при коэффициенте поглощения светового потока $K_{\Pi}=0,3$ ед, в области образования вторичных продуктов окисления при $K_{\Pi}=0,8$ ед и при значениях коэффициента поглощения све-

тогового потока в начальный период образования вторичных продуктов окисления.

Таблица 3.11 – Характеристики смазывающих свойств моторных масел различной базовой основы

Марка моторного масла		Критерий смазывающих свойств		Значение коэффициента $K_{П}$ в начале образования вторичных продуктов окисления, ед
		Первичные продукты при $K_{П}=0,3$ ед	Вторичные продукты при $K_{П}=0,8$ 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

Лучшими смазывающими свойствами в начале окисления масел характеризуются: синтетическое Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF - $K_{CC}=1,22$; частично синтетическое Ravenol TSI 10W-40 SM/CF $K_{CC}=1,17$ и минеральное М-8Г₂ - $K_{CC}=0,67$. Лучшими смазывающими свойствами при большой концентрации вторичных продуктов окисления ($K_{П}=0,8$ ед) характеризуются: синтетическое Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF и частично синтетическое Ravenol TSI 10W-40 SM/CF $K_{CC}=2,28$ и минеральное Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC - $K_{CC}=2,5$.

Показателем смазывающих свойств моторных масел является значение коэффициента поглощения светового потока, при котором вторичные продукты оказывают влияние на этот показатель. Чем раньше образуются вторичные продукты, тем выше смазывающие свойства исследуемого масла, но при этом важно учитывать значение критерия смазывающих свойств при значении коэффициента $K_{\Pi}=0,8$ ед.

Согласно представленных данных в таблице 3.11, из числа исследуемых масел лучшие данные получены для синтетического масла Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF - $K_{\Pi}=0,32$ ед, т.к. критерий смазывающих свойств при коэффициенте $K_{\Pi}=0,8$ ед равен 2,28.

3.6 Выводы по третьей главе

1. Разработанный метод контроля моторных масел с применением фотометра, прибора для термостатирования масел, малообъемного вискозиметра, трехшариковой машины трения, электронных весов и оптического микроскопа позволяет определить влияние продуктов окисления на триботехнические характеристики моторных масел и обосновать критерии.

2. Получены графические зависимости и регрессионные уравнения процессов окисления моторных масел различной базовой основы, оценено влияние продуктов окисления на триботехнические характеристики, включающие определение диаметра пятна износа, критерия противоизносных свойств, времени формирования номинальной площади фрикционного контакта, его электропроводность и смазочную способность.

3. Подтверждено, что механизм окисления исследованных моторных масел не зависит от базовой основы и характеризуется последовательным образованием первичных продуктов окисления, которые, доокисляясь, переходят во вторичные продукты с большей оптической плотностью, вызывая изгиб зависимостей коэффициента поглощения светового потока от времени окисления, описываемых ку-

сочно-линейными уравнениями.

4. Кинематическая вязкость при окислении масел, оцениваемая коэффициентом относительной вязкости, определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного масла, наиболее стабильной установлена для минерального масла Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, частично синтетических Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF и Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, синтетических Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF. Для остальных масел вязкость либо уменьшается, либо увеличивается по сравнению с вязкостью товарного масла.

5. Испаряемость моторных масел при окислении не зависит от кинематической вязкости, а ее зависимость от времени окисления описывается уравнениями второго порядка. Наименьшая испаряемость за 40 часов испытания установлена для минерального масла М-10Г₂к (4,2г), частично синтетического Ravenol TSI 10W-40 SM/CF (4,7г) и синтетического Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF (5,2г), а наибольшая испаряемость 9,6г для минеральных масел Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC и Utech navigator 15W-40 SG/CD, частично синтетического ТНК Супер 5W-40 SL/CF (9,3г) и синтетического Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF (9,5г).

6. В качестве критерия термоокислительной стабильности предложен коэффициент, определяемый суммой коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости, характеризующий сопротивляемость масел температурным воздействиям, позволяющий их сравнивать, определять потенциальный ресурс по времени достижения коэффициентом определенного значения, а также соответствие классификации по группам эксплуатационных свойств. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления описываются кусочно-линейными функциями.

7. Установлено, что в начальный период окисления, когда в масле преобладают первичные продукты окисления, противоположные свойства понижаются для минеральных масел М-10Г₂к, Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, всех частично синтетических и синтетических Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF и Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF. В области образования вторичных продуктов окисления противо-

износные свойства для большинства масел повышаются.

8. Предложен критерий противоизносных свойств моторных масел при их окислении, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа, эмпирическая зависимость которого от коэффициента поглощения светового потока описывается линейным уравнением. Данный критерий характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, а скорость его изменения позволяет сравнивать различные масла.

9. Наивысшими противоизносными свойствами характеризуются частично синтетические моторные масла Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF и Ravenol TSI 10W-40 SM/CF, а низшими минеральное Utech navigator 15W-40 SG/CD и синтетическое Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF.

10. Наибольшим потенциальным ресурсом характеризуются минеральное масло М-8Г₂ - 75ч и частично синтетическое Ravenol TSI 10W-40 SM/CF – 73ч, а наименьшим - минеральное Utech navigator 15W-40 SG/CD – 44,5ч и частично синтетическое Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF – 33,3ч.

11. В качестве показателей для сравнения качества моторных масел предложены: потенциальный ресурс, испаряемость за 40 часов испытания, коэффициент относительной вязкости за 40 часов испытания, скорость образования первичных продуктов окисления, время начала образования вторичных продуктов окисления и критерий противоизносных свойств.

12. Предложена физическая модель процессов, протекающих во фрикционном контакте, учитывающая электрическое сопротивление граничного слоя, разделяющего поверхности трения и величину тока, протекающего через него, позволяющая оценить смазывающую способность окисленных масел.

13. Применение электрометрического метода, предусматривающего пропускание постоянного тока величиной 100мкА через фрикционный контакт от стабилизированного источника напряжения 3В, позволяет определить продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций и использовать суммарную продолжительность пластической и упругопластической дефор-

маций как время формирования номинальной площади контакта для сравнения различных смазочных материалов.

14. Предложен критерий смазывающих свойств моторных масел, определяемый произведением условной концентрации продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта на коэффициент электропроводности граничного слоя и характеризующий падение напряжения в контакте.

15. Установлено, что для большинства моторных масел независимо от базовой основы в начале процесса окисления время формирования номинальной площади фрикционного контакта увеличивается, а с образованием вторичных продуктов окисления этот показатель колеблется из-за формирования на поверхностях трения хемосорбционных пленок, которые при трении формируются и разрушаются.

16. Установлено, что зависимости критерия смазывающих свойств моторных масел от коэффициента поглощения светового потока независимо от базовой основы имеют два участка различной интенсивности изменения критерия, что подтверждает влияние вторичных продуктов окисления на увеличение электрического сопротивления фрикционного контакта и повышение смазывающих свойств.

17. Триботехнические характеристики окисленных масел предложено оценивать по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа, критерию противоизносных свойств, времени формирования фрикционного контакта и критерию смазывающих свойств, что позволяет осуществлять их выбор для двигателей различной степени форсирования.

4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО КОНТРОЛЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Практические рекомендации разработаны на основе полученных экспериментальных данных изложенных в разделе 3 настоящей работы с применением средств испытания и измерения, включающих: фотометрическое устройство, малообъемный вискозиметр, прибор для термостатирования масел, трехшариковую машину трения со схемой «шар-цилиндр», оптический микроскоп «Альтами МЕТ 1М» для измерения пятен износа и электронные весы. Контроль эксплуатационных свойств моторных масел осуществляется при термостатировании по изменению таких показателей, как: коэффициент поглощения светового потока, кинематическая вязкость, испаряемость, скорость образования первичных продуктов окисления, время начала образования вторичных продуктов окисления, скорость образования вторичных продуктов окисления, критерий термоокислительной стабильности, потенциальный ресурс, среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах, критерий противоизносных свойств, скорость изменения критерия противоизносных свойств, продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформаций, протекающих на фрикционном контакте, коэффициент электропроводности фрикционного контакта и коэффициент смазочных свойств.

Данные показатели позволяют сравнивать различные по назначению смазочные масла, осуществлять их обоснованный выбор для техники различной степени нагруженности, контролировать их качество в торговой сети и в период эксплуатации, идентифицировать на соответствие классификации.

4.1 Технология определения термоокислительной стабильности смазочных масел

Технология предназначена для комплексной оценки товарных смазочных масел и предусматривает применение прибора для термостатирования масел, фо-

тометра, малообъемного вискозиметра и электронных весов. Схема технологии определения термоокислительной стабильности представлена на рисунке 4.1.

Технология предусматривает термостатирование пробы масла массой $100 \pm 0,1$ г, помещенную в стеклянный стакан прибора для термостатирования с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин при температуре 180°C в течение 8-ми часов.

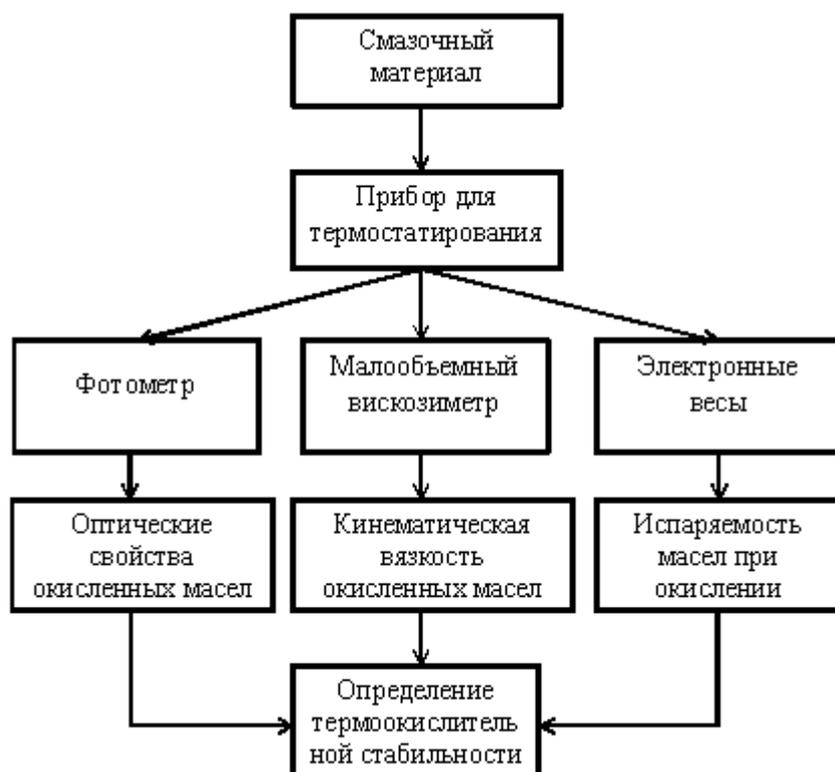


Рисунок 4.1 –Схема технологии определения термоокислительной стабильности смазочных масел.

Температура термостатирования задается дискретно и поддерживается автоматически в течение испытания и может изменяться в зависимости от назначения смазочного материала (трансмиссионные, гидравлические, промышленные). После каждых восьми часов испытания стакан с окисленным маслом взвешивается для определения массы испарившегося масла, отбираются пробы масла для фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока при толщине фотометрируемого слоя 2 мм, а также кинематической вязкости при 100°C .

Отобранные пробы с фотометра и вискозиметра сливаются в стеклянный стакан прибора для термостатирования масла, который взвешивается повторно вследствие потерь масла, и испытания продолжаются по данной технологии до тех пор, пока коэффициент поглощения светового потока не достигнет значения равного 0,7- 0,8ед.

Для удобства сравнения окисленных масел с различной базовой основой по кинематической вязкости целесообразно использовать коэффициент относительной вязкости K_{μ} , определяемый отношением вязкости окисленного масла μ_0 к вязкости товарного масла μ_T :

$$K_{\mu} = \mu_0 / \mu_T. \quad (4.1)$$

По полученным результатам оптических свойств и испаряемости окисленных масел определяется коэффициент термоокислительной стабильности $E_{ТОС}$, определяемый суммой:

$$E_{ТОС} = K_{\Pi} + K_G, \quad (4.2)$$

где K_{Π} – коэффициент поглощения светового потока, K_G – коэффициент испаряемости:

$$K_G = m / M, \quad (4.3)$$

где m – масса испарившегося масла за 8 часов испытания, г; M – масса масла до испытания, г.

По результатам экспериментальных данных строятся зависимости: коэффициента поглощения светового потока, испаряемости, коэффициента относительной вязкости и коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления исследуемого масла, по которым производят сравнение с другими маслами и определяют их сопротивляемость окислению. Чем меньше значение коэффициента термоокислительной стабильности за выбранное время окисления, тем выше его термоокислительная стабильность.

Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления масла используются для определения скорости образования первичных продуктов окисления, время начала и скорость образования вторичных продуктов окисления, а также потенциального ресурса как время достижения определенного значения коэффициента поглощения светового потока или коэффициента термоокислительной стабильности.

При определении потенциального ресурса необходимо учитывать изменение вязкости. Если вязкость увеличилась на 35% или уменьшилась на 20%, то время достижения вязкости этих значений будет определять потенциальный ресурс исследуемого масла независимо от значений коэффициентов поглощения светового потока или термоокислительной стабильности.

4.2 Технология определения концентрации воды и легких фракций в товарном масле

Технология предусматривает применение прибора для термостатирования масел и электронных весов. Проба масла массой 100г заливается в стеклянный стакан и термостатируется при температуре 120°C с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300об/мин в течение 20 мин. Время термостатирования установлено экспериментально и обеспечивает полное испарение воды и легких фракций. После термостатирования проба масла взвешивается и по разности масс определяется масса испарившейся воды и легких фракций в процентах:

$$\Delta m = \frac{100 - M}{100} 100\%, \quad (4.4)$$

где Δm – масса испарившегося масла, г; 100 – масса пробы масла до термостатирования, г; M – масса пробы после термостатирования, г.

Данная технология эффективна при определении воды и легких фракций в маслах, находящихся в эксплуатации или хранящихся на складах и в резервуарах.

4.3 Технология определения температурной области работоспособности смазочных масел

Технология реализуется с применением прибора для термостатирования масел, фотометра, малообъемного вискозиметра и электронных весов и предусматривает два метода определения предельной температуры работоспособности исследуемого масла. Первый метод основан на определении температуры термостатирования масла, при которой ресурс его наибольший. Для этого исследуемое масло испытывается в температурном диапазоне, например, для моторных масел от 160°C до 200°C, по технологии, описанной в параграфе 4.1. В качестве параметров контроля приняты: коэффициент поглощения светового потока, относительная вязкость, испаряемость и коэффициент термоокислительной стабильности. По полученным данным строятся графические зависимости этих показателей от времени окисления (рисунок 4.2), по которым видно влияние температуры и времени окисления на коэффициенты поглощения светового потока, относительной вязкости и испаряемость. Так, значение коэффициента поглощения светового потока равные 0,8ед достигается за время при температурах: 200°C за 9ч; 190 °C - 12ч; 180°C – 19,5ч; 170°C – 27ч. Кинематическая вязкость в интервале температур от 170°C до 200°C уменьшается на 7% и увеличивается на 2%, т.е. вязкость при окислении изменяется незначительно.

Испаряемость масла так же зависит от температуры и времени окисления. Так, 8г масла испаряется при температуре 200°C за 4,5ч; 190°C за 8ч; 180°C за 14,5ч; 170°C за 23,5ч. Для более точного определения влияния температуры на показатели термоокислительной стабильности необходимо построить графические зависимости этих показателей от температуры окисления за постоянное время окисления, например 10ч (рисунок 4.3), и определить аналитическую модель этих зависимостей.

Согласно данным рисунка 4.3а коэффициент поглощения светового потока с уменьшением температуры окисления уменьшается, так при температуре 170°C в сравнении с температурой 200°C в 4,08 раза, и описывается полиномом второго

порядка:

$$K_{\Pi} = aT^2 + bT + c, \quad (4.5)$$

где a , b и c – коэффициенты, характеризующие сопротивляемость окислению испытуемого масла.

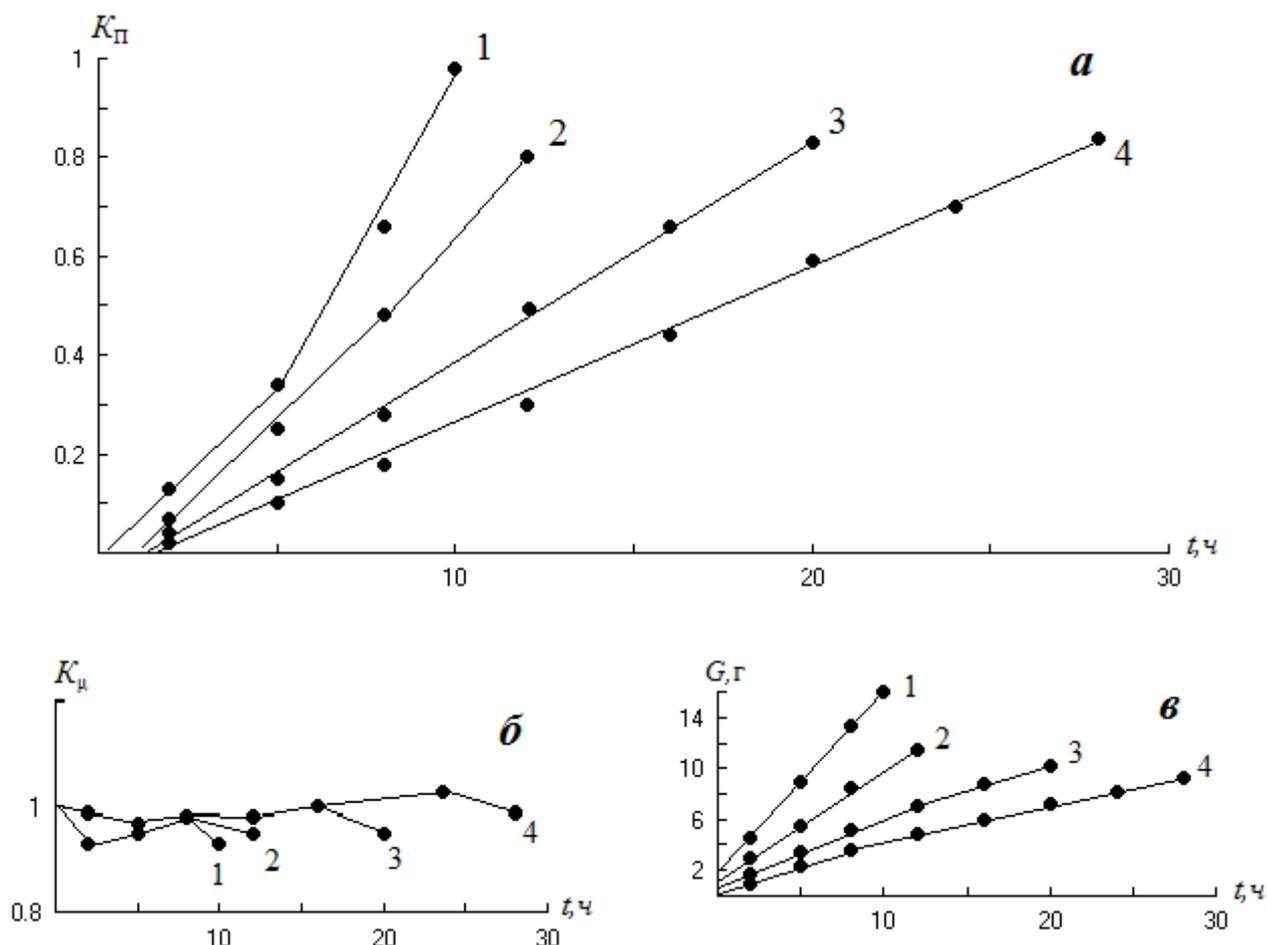


Рисунок 4.2 – Зависимости коэффициентов поглощения светового потока K_{Π} (а), относительной вязкости K_{μ} (б) и испаряемости G (в) от времени окисления моторного масла Mobil 10W-40 SJ/CH при температуре окисления: 1-200°C; 2-190°C; 3 -180°C; 4 -170°C.

Регрессионное уравнение имеет вид:

$$K_{\Pi} = 6,5 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,216 T + 18,16. \quad (4.6)$$

Коэффициент корреляции равен 0,99.

Влияние температуры на изменение вязкости, оцениваемой коэффициентом относительной вязкости (рисунок 4.3б) с ростом температуры уменьшается.

Испаряемость масла (рисунок 4.3в) с увеличением температуры окисления увеличивается. Так, значение испаряемости при температуре 170°C составило 4г, а при температуре 200°C -16г, т.е. увеличилось в 4 раза.

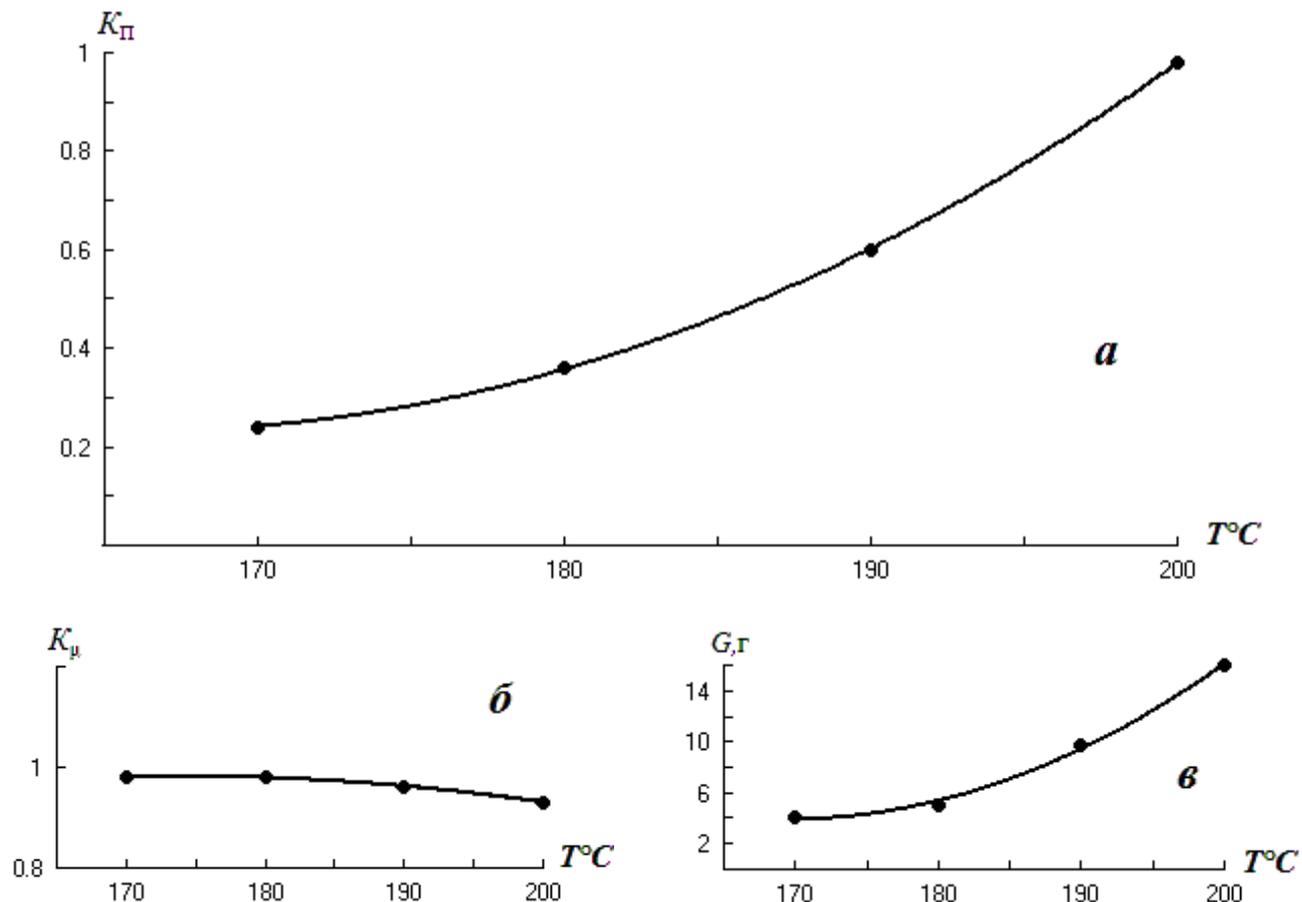


Рисунок 4.3 – Зависимости коэффициентов поглощения светового потока $K_{\text{П}}$ (а), относительной вязкости K_{μ} (б) и испаряемости G (в) от температуры окисления в течение 10 часов моторного масла Mobil 10W-40 SJ/CH.

Зависимость испаряемости от температуры окисления описывается полиномом второго порядка:

$$G = aT^2 + bT + c, \quad (4.7)$$

где a , b и c – коэффициенты, характеризующие испаряемость испытуемого масла;

Регрессионное уравнение зависимости испаряемости от температуры окисления имеет вид:

$$G = 0,013T^2 - 4,4T + 376,5 \quad (4.8)$$

Коэффициент корреляции равен 0,99.

Анализируя графические зависимости (рисунок 4.3) можно утверждать, что температурная область работоспособности исследуемого масла ограничивается температурой 170°C.

Температурную область работоспособности исследуемого масла можно определять по потенциальному ресурсу, определяемому временем достижения принятого значения коэффициента поглощения светового потока равного, например, 0,8ед при разных температурах окисления. На рисунке 4.4 представлена зависимость потенциального ресурса от температуры окисления в момент достижения коэффициентом поглощения светового потока значения равного 0,8ед. Показано, что при температуре окисления 170°C потенциальный ресурс моторного масла Mobil 10W-40 SJ/CH максимальный.

Зависимость потенциального ресурса от температуры окисления описывается полиномом второго порядка:

$$P = aT^2 + bT + c, \quad (4.9)$$

где a , b и c – коэффициенты, характеризующие изменение ресурса испытуемого масла;

Регрессионное уравнение зависимости потенциального ресурса от температуры окисления имеет вид:

$$P = 0,0125T^2 - 5,175T + 542,75 \quad (4.10)$$

Коэффициент корреляции равен 0,99.

По уравнению 4.10 можно прогнозировать потенциальный ресурс для других температур окисления исследуемого масла.

Второй метод (менее точный) определения температурной области работоспособности смазочных масел используется для партии различных масел одного назначения и реализуется при одной температуре. Определение предельной температуры работоспособности масел производится по потенциальному ресурсу, определяемому временем достижения коэффициента поглощения светового пото-

ка или критерия термоокислительной стабильности принятому (например 0,8ед) значению.

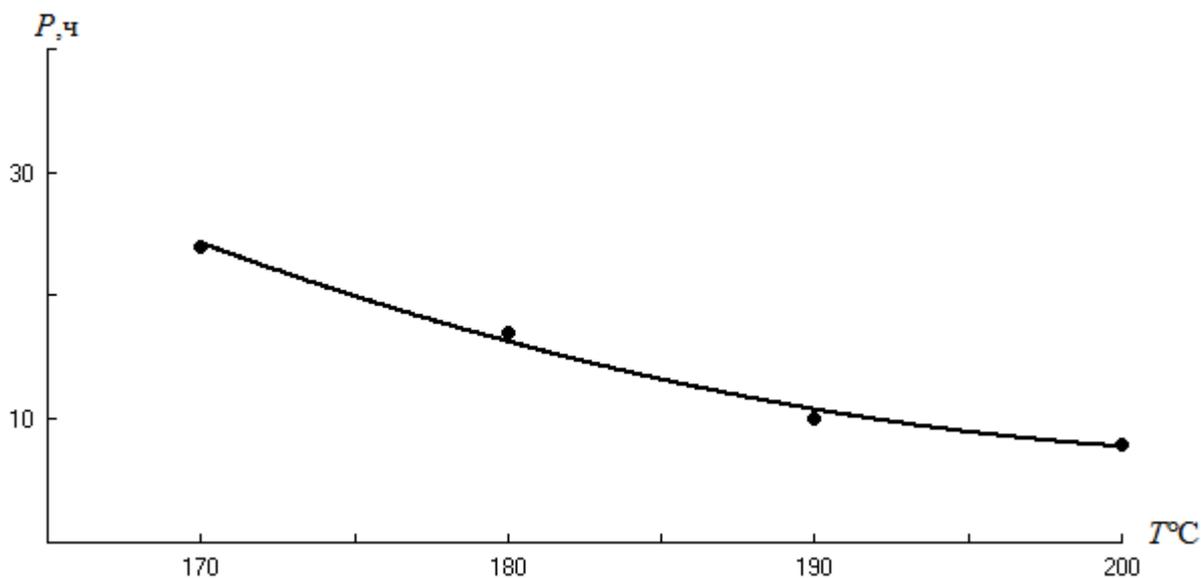


Рисунок 4.4 – Зависимость потенциального ресурса от температуры окисления моторного масла Mobil 10W-40 SJ/CH при коэффициенте поглощения светового потока равного 0,8ед.

Технология определения предельной температуры работоспособности масел аналогична той, которая приведена в параграфе 4.1. Полученные экспериментальные данные при температуре 180°C (таблица 3.8) используют для установления предельной температуры работоспособности масел. Так, если потенциальный ресурс масла по коэффициенту поглощения светового потока находится в пределах 30-40 часов, то предельной температурой работоспособности данного масла (Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF, таблица 3.8) является температура ниже 160°C. Причем за предельную температуру работоспособности масла принимается температура в зоне контакта трущихся пар, а не в объеме масла.

Если потенциальный ресурс находится в пределах 40-50 часов, то предельной температурой работоспособности этих масел является температура 160 °C (Utech navigator 15W-40 SG/CD, Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF и Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF). При значениях потенциального ресурса от 50 до 60 часов предельной температурой работоспособности масел является температура 170°C (Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC, Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, ТНК Супер 5W-40

SL/CF, Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF). При значениях потенциального ресурса от 60 до 70 часов предельной температурой работоспособности масел является температура 180°C (M-10Г₂к, Ravenol TSI 10W-40 SM/CF)

Данная классификация масел является условной, так как испытания данных масел при температуре 170°C сохранит тенденцию распределения масел, но потенциальный ресурс их увеличится. В этой связи предлагаемый метод определения температурной области работоспособности по предельной температуре необходимо стандартизировать и установить температуры испытания для масел различного назначения.

4.4 Рекомендации по определению противоизносных свойств окисленных масел и процессов, протекающих на фрикционном контакте

Для осуществления технологии применяются трехшариковая машина трения со схемой «шар-цилиндр», оптический микроскоп «Альтами МЕТ 1М», прибор для термостатирования масел и фотометр. Противоизносные свойства моторных масел являются эксплуатационным показателем, так как определяют ресурс двигателей внутреннего сгорания.

Разработанная технология может применяться не только для окисленных моторных масел, но и для масел другого назначения и различных базовых основ.

Отличительной особенностью трехшариковой машины трения является взаимодействие трех шаров с цилиндром по индивидуальным дорожкам трения, что повышает точность определения противоизносных свойств. Кроме того, через центральный шар пропускается постоянный ток величиной 100мкА от внешнего стабилизированного источника напряжения 3В. Величина тока, протекающего через фрикционный контакт при трении, через преобразователь RS-202-RS-485 подается на компьютер для записи в виде диаграммы, по которой определяются продолжительности пластической деформации в контакте (ток равен заданному 100мкА), упругопластической деформации, при которой ток уменьшается до определенной стабильной величины, и упругой деформации, при которой ток ста-

билизируется на определенной величине. Пропускание тока через фрикционный контакт позволяет определить время формирования площади фрикционного контакта, процесс формирования граничного слоя между поверхностями трения, его электропроводность и влияние продуктов окисления на этот процесс или в совокупности смазывающие свойства исследуемых масел. Параметры трения выбраны постоянными и составляли: нагрузка 13Н, скорость скольжения 0,68м/с, температура масла в объеме 80°С, время испытания 2 часа.

Технология определения противоизносных свойств окисленных моторных масел осуществляется следующим образом. Проба испытуемого масла массой $100 \pm 0,1$ г заливается в стеклянный стакан прибора для термостатирования при температуре 180°С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300об/мин. Через каждые 8 часов термостатирования отбирается проба масла для фотометрирования при толщине фотометрируемого слоя 2мм и определения коэффициента поглощения светового потока. Если коэффициент соответствует значениям 0,1; 0,2; ... 0,8ед, то отбирается проба масла для испытания на машине трения. Если коэффициент не соответствует заданным значениям, то испытуемое масло подвергается дальнейшему окислению в течение следующих 8-ми часов. При соответствии коэффициента поглощения светового потока заданным значениям отбирается проба окисленного масла массой 15г для испытания на машине трения, а проба масла в стеклянном стакане доливается товарным испытуемым маслом до первоначальной массы ($100 \pm 0,1$ г) и подвергается дальнейшему окислению до значения коэффициента поглощения светового потока равного 0,8ед.

Перед триботехническими испытаниями шары и цилиндр протираются ветошью, смоченной в бензине и вытираются насухо. Шары опускаются на цилиндр и по показаниям микроамперметра устанавливается величина тока (100мкА), протекающего через фрикционный контакт. Затем шары поднимаются и фиксируются в верхнем положении. В ванночку заливается испытуемое масло, которая устанавливается в ванну с нагревателем и включается нагрев масла до 80°С. При наборе температуры включают привод вращения цилиндра, опускают шары с нагрузкой и включают запись диаграммы тока, протекающего через фрикционный

контакт. После двух часов испытания шары с нагрузкой поднимают и фиксируют в верхнем положении. Откручивают оправки с шарами, промывают в бензине и вытирают насухо, а на оптическом микроскопе замеряют диаметры пятен износа на шарах и рассчитывают их среднеарифметическое значение.

По полученным данным строят графическую зависимость диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока, по которой определяют влияние концентрации продуктов окисления на износ. Поскольку основное влияние на противоизносные свойства окисленных масел оказывают продукты окисления, в работе предложен критерий противоизносных свойств P , определяемый отношением:

$$P = K_{\Pi}/I, \quad (4.11)$$

где K_{Π} - коэффициент поглощения светового потока; I - диаметр пятна износа, мм.

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

В параграфе 3.5 показано, что зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока имеет линейный характер:

$$P = a_n K_{\Pi} \quad (4.12)$$

где a_n - коэффициент, характеризующий скорость изменения критерия противоизносных свойств P .

Скорость изменения критерия противоизносных свойств является важным параметром, по которому предлагается сравнивать смазочные масла.

Поскольку механизм окисления моторных масел независимо от базовой основы характеризуется образованием двух видов продуктов, названных первичными и вторичными, важно знать какие из них оказывают большее влияние на процессы, протекающие на фрикционном контакте, а именно: продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций, электропроводность

фрикционного контакта и формирование хемосорбционных защитных слоев на поверхностях трения. Так как основное влияние на формирование номинальной площади фрикционного контакта оказывают пластические и упругопластические деформации, то продолжительность этих деформаций определяет смазывающие свойства масла, а ток, протекающий через контакт, зависит от концентрации продуктов окисления и их электропроводности. Поэтому концентрация продуктов окисления на фрикционном контакте, определяемая отношением K_{Π}/I , которое характеризует сопротивление граничного слоя, разделяющего поверхности трения в контакте и названное критерием противоизносных свойств Π , т.е. $\Pi=K_{\Pi}/I$, где I - диаметр пятна износа. От соотношения K_{Π}/I зависит величина тока, протекающего через фрикционный контакт, поэтому произведение

$$\frac{K_{\Pi}}{I} \cdot I_{\text{ФК}} = U_{\text{ГС}} = K_{\text{СС}} \quad (4.13)$$

определяет падение напряжения $U_{\text{ГС}}$ на фрикционном контакте, которое принято за коэффициент смазывающих свойств $K_{\text{СС}}$, где $I_{\text{ФК}}$ – величина тока, протекающего через фрикционный контакт, мкА.

Коэффициент смазывающих свойств рекомендуется определять в областях образования первичных и вторичных продуктов окисления и по этим значениям выбирать масла с лучшими смазывающими свойствами, при этом оценку производить по двум показателям: коэффициенту $K_{\text{СС}}$ и величине тока, протекающего через фрикционный контакт. Это вызвано тем, что коэффициент смазывающих свойств учитывает концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, определяющую его сопротивление и величину тока, протекающего через него.

4.5 Рекомендации по идентификации и классификации моторных масел

Идентификация моторных масел – процедура контроля на соответствие

технической документации, разработанной производителем. Контроль производится на соответствие классам вязкости и группам по назначению и уровням эксплуатационных свойств. При этом контролируются моюще-диспергирующие, антиокислительные, противоизносные, антикоррозионные и вязкостно-температурные свойства.

На основе проведенных исследований, изложенных в главе 3, предлагаются дополнительные показатели качества моторных масел, определяемые с помощью прибора для термостатирования масел в диапазоне температур от 80 до 200°C, фотометра, малообъемного вискозиметра, трехшариковой машины трения, оптического микроскопа «Альтами МЕТ 1М» и электронных весов.

В качестве показателей идентификации и классификации предлагаются: потенциальный ресурс, определяемый временем достижения коэффициентом поглощения светового потока или коэффициентом термоокислительной стабильности установленного значения; испаряемость за 40 часов испытания; коэффициент относительной вязкости за 40 часов испытания; скорость образования первичных продуктов окисления; концентрация воды и легких фракций; время начала образования вторичных продуктов окисления; скорость образования вторичных продуктов окисления, скорость изменения критерия противоизносных свойств и коэффициент смазывающих свойств. При создании банка данных по этим показателям для отечественных и зарубежных моторных масел и масел другого назначения возможен контроль над их производством.

Анализ экспериментальных данных при исследовании моторных масел различной базовой основы и групп по эксплуатационным свойствам показал, что не все масла соответствуют классификации, заявленной производителем (таблицы 3.8, 3.9). Так, дизельные масла М-8Г₂ и М-10Г₂к согласно классификации API относятся к группе СС, однако результаты исследования показали, что они отличаются по показателям ресурса, испаряемости, изменению вязкости, скорости образования вторичных продуктов и скорости изменения критерия противоизносных свойств.

Моторные масла Mobil Super 2000 10W-40 SJ/CF, Лукойл Люкс 5W-40

SJ/CF, Agip Tecsint 5W-30 SJ/CF и Mobil Super Syn 0W-40 SJ/SL/CF относятся к одной группе эксплуатационных свойств SJ для бензиновых двигателей, однако результаты испытания (таблицы 3.8, 3.9) показали, что классификация масла Лукойл Люкс 5W-40 SJ/CF завышена производителем, а классификация масла Лукойл Стандарт 10W-40 SF/CC занижена. Классификация синтетического моторного масла Mobil Super 3000 5W-40 SK/CF так же завышена. Эти данные показывают о необходимости совершенствования системы классификации моторных масел.

4.6 Выводы по четвертой главе

Разработанные практические рекомендации, включающие технологии определения: термоокислительной стабильности смазочных масел; концентрации воды и легких фракций в товарном масле; температурной области работоспособности смазочных масел, а также рекомендации по определению противоизносных свойств окисленных масел и интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте, рекомендации по идентификации и классификации моторных масел, направлены на получение дополнительной информации, позволяющей повысить эффективность использования смазочных масел, осуществлять обоснованный их выбор для техники различной степени нагруженности, определить потенциальный ресурс, предельную температуру работоспособности и совершенствовать систему классификации.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А. Бнатов и др. Под ред. В.М. Школьников. Изд. 2-е перераб. И доп. – М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596с.
2. ГОСТ 17479.1-85. Масла моторные. Классификация и обозначение. Издательство стандартов № 1986 Стандартиформ № 2006. Разработан ВНИТИ. Утверждён 20 декабря 1985 г. Госстандарт СССР. Поправки к документу №1 от 01 декабря 1987 г., ИУС 3-88., №2 от 01 декабря 1991 г., ИУС 2-92№3 от 01 августа 1999 г. ИУС 11-99.
3. А.с.1779756 РФ, МПК F01M9/02. Способ оценки ресурса моторного масла двигателей внутреннего сгорания. / В.В. Чанкин, Т.К. Пугачева, Ю.А. Шапунский и др. 1992, Бюл. №45.
4. А.с.1460364 РФ, МПК F01M9/02. Способ оценки качественного резерва картерного масла в двигателе внутреннего сгорания. / В.В. Чанкин, Л.А. Морозова, Т.К. Пугачева, Ю.А. Шапунский и др. 1989, Бюл. №7.
5. Григорьев, М.А. Качество моторного масла и надежность двигателей. / М.А. Григорьев, Б.М. Бунаков, В.А. Долецкий. М.: Изд-во стандартов, 1981.-238с.
6. Арабян, С.Г. Масла и присадки для транспортных и комбайновых двигателей. / С.Г. Арабян, А.Б. Виппер, И.А. Холомонов. – М.: Машиностроение, 1984ю-208с.
7. Трейгер, М. И. Экономное и рациональное использование смазочных материалов / М. И. Трейгер. – ЛДНТИ, 1982. – 280 с.
8. Соколов, А. И. Измерения качества масел и долговечность автомобильных двигателей / А. И. Соколов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1976. – 120 с.
9. Маркова Л.В. Современные требования к контролю работоспособности масла дизельного ДВС. / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин, Х. Конт и др. // Трение и износ. – 2002. Т.23. №4. С. 425-435.

10. Скиндер, Н.И. портативный комплект средств для экспресс-диагностики работающего моторного масла. / Н.И. Скиндер, Ю.А. Гурьянов // ХТТМ. – 2001. С. 38-40.
11. Розенберг, Ю.А. Влияние смазочных материалов на надежность и долговечность машин. / Ю.А. Розенберг. – М.: Машиностроение, 1970. – 315с.
12. А.с. №145060 (СССР), МПК G01 №33/30. Способ определения необходимости замены масла в дизелях. / К.А. Павлов. 1962, Бюл. №4.
13. Васильева, Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы: Учебник для вузов. / Л.С. Васильева. – М.: Транспорт, 1986. – С. 177–189.
14. Безбородов, Ю.Н. Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных масел по параметрам термоокислительной стабильности: дис. д-ра. техн. наук. / Безбородова Юрия Николаевича – Красноярск, 2009. – С. 65.
15. Ковальский, Б. И. Методы и средства повышения эффективности использования смазочных материалов / Б. И. Ковальский. – Новосибирск: Наука, 2005. – 341 с.
16. А.с. №113465 (СССР), МПК G01 №33/30. Метод оценки термической стабильности смазочных масел. / К.К. Папок.
17. А.с. №135642 (СССР), МПК G01 №33/28. Способ определения стабильности растворов присадок к маслам. / Ю.С. Заславский, Г.И. Шор, Е.В. Евстегнеев, Н.В. Дмитриева, 1961. Бюл.№3.
18. А.с. №527660 (СССР), МПК G01 №33/30. Способ определения свойств моторного масла. / А.В. Непогодьева, В.Г. Колупаев, 1976. Бюл. №33.
19. А.с. №744325 (СССР), МПК G01 №33/28. Прибор для оценки термоокислительной стабильности масел. / Е.П. Федоров, Н.Т. Разгоняев, В.В. Горячев, О.А. Запорожская, 1980. Бюл. №24.
20. А.с. №1187054, МПК G01 №27/22. Способ определения термоокислительной стабильности низкомолекулярных продуктов. / А.М. Соловьев, И.Г. Третьяков. 1985. Бюл. №39.

21. А.с. №2057326, (СССР) МПК G01 №25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов. / Б.И. Ковальский, Л.Н. Деверягина, И.А. Кириченко. 1996. Бюл. №9.
22. А.с. №1282002, (СССР) МПК G01 №33/28. Способ определения степени загрязненности работавшего моторного масла. / Ю.Л. Шепельский, Л.А. Певзнер. 1987. Бюл. №1.
23. А.с. №02117287, МПК G01 №33/28. Способ определения качества моторного масла. / Р.М. Ишмаков, В.И. Васильев, А.Р. Хафизов, М.Ю. Абызгильдина. 1998. Бюл. №1.
24. А.с. №1525576, МПК G01 №33/30. Способ определения термической стабильности смазочного масла. / П.Ф. Григорьев, О.А. Лебедев. 1989. Бюл. №44.
25. ГОСТ 20457-75. Масла моторные. Метод оценки антиокислительных свойств на установке ИКМ.
26. ГОСТ 23175-78. Масла моторные. Метод оценки моторных свойств и определение термоокислительной стабильности.
27. ГОСТ 11063-77. Масла моторные с присадками. Метод определения стабильности по индукционному периоду осадкообразования.
28. ГОСТ 981-75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления.
29. ГОСТ 20944-75. Жидкости для авиационных систем. Метод определения термоокислительной стабильности и коррозионной активности.
30. ГОСТ 18136-72. Масла. Метод определения стабильности против окисления в универсальном приборе.
31. ГОСТ 23797-79. Масла для авиационных газотурбинных двигателей. Метод определения термоокислительной стабильности в объеме масла.
32. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения. Гос. изд. физ.- матем. лит., 1963.

33. А.с. №116924 МПК G01 №33/28. Прибор для оценки стабильности масел, применяемых в воздушно-реактивных двигателях, турбинах и трансформаторах. / В.С. Демченко, Н.М. Ногвин.
34. А.с. №179083 МПК G01 №33/28. Прибор для оценки эксплуатационных свойств моторных масел. / Н.А. Сорокин, Ю.А. Суетин. – 1966, Бюл. №4.
35. А.с. №1270701, МПК G01 №33/28. Прибор для определения стабильности и коррозионности смазочных масел. / В.Ю. Кирсанов, Д.П. Якуба, Ю.В. Луньков, В.М. Корневский. – 1986, Бюл. №42.
36. А.с. №15874442, МПК G01 №33/28. Установка для испытания моторных масел. / Б.Н. Бунаков, А.Н. Первушин, В.А. Кауров и др. – 1990, Бюл. №31.
37. Пат. РФ 2199114, G01 №33/28. Прибор для оценки эксплуатационных свойств моторных масел. / Б.И. Ковальский, Д.Г. Барков, Р.А. Ерашов, С.И. Васильев. – 2003, Бюл. №5.
38. Черножуков Н.И. Химия минеральных масел / Н.И. Черножуков, С.Э. Крейн, Б.В. Лосиков и др. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 417 с.
39. Розенберг, Ю. А. Эксплуатационные свойства смазочных материалов и их оценка / Ю. А. Розенберг // Вестник машиностроения. – 1975. №8. С. 42 – 49.
40. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения. Гос. изд. физ.-матем. лит., 1963.
41. Черножуков Н.И. Окисляемость минеральных масел. / Н.И. Черножуков, С.Е. Крейн – М. Гостолиздат, 1995. – 372с.
42. Костецкий, Б. И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении / Б. И. Костецкий // Трение и износ. – 1985. Т.6. №2. С.201-212.
43. Буяновский, И. А. Граничная смазка: Этапы развития трибологии / И. А. Буяновский, И. Г. Фукс, Т. Н. Шабалина. – М.: Нефть и газ, 2002.
44. Буяновский, И. А. К применению кинетического подхода для описания процесса граничной смазки / И. А. Буяновский // Трение и износ. – 2003. Т.24, №3. С. 313 – 321.
45. URL:<http://www.lukoil.ru/>.

46. URL:<http://www.yukos.ru/>.
47. URL:http://www.exxonmobil.ru/Russia-Russian/PA/products_lubes_industrial.aspx/.
48. URL:<http://www.tnk-bp.ru/>.
49. URL:<http://www.ravenol.ru/>.
50. URL:<http://www.neftoagip.ru/>.
51. А. с. 851111 СССР. Фотометрический анализатор жидкостей. / Б. И. Ковальский, Г. М. Сорокин, Н. А. Яворский. – 1981, Бюл. № 28.
52. Пат. № 2428677 Рос. Федерация: МПК G 01 N 19/02. Устройство для испытания трущихся материалов и масел / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, О. Н. Петров, В. И. Тихонов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2010119754/28; заявл. 17.05.2010; опубл. 10.09.2011. Бюл. №25.
53. Алексеев, Р.И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа. /Р.И. Алексеев, Ю.И. Коровин// М.Атомиздат, 1972. – 72с.
54. Пустыльник, Е.Н. Статические методы анализа и обработки результатов наблюдений. / Е.Н. Пустыльник . М.: Наука, 1968. – 288с.
55. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. / А.Н. Зайдель. Л.: Наука, 1968. – 97с.
56. 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.
57. Ковальский Б.И. Процессы самоорганизации в частично синтетических моторных маслах при их окислении./Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, А.В. Берко, А.С. Ромащенко//Технологии транспорта и хранения нефтепродуктов. – 2011. – с.67-71.
58. Пат. № 2415422 Рос. Федерация: МПК G 01 N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Б. И. Ковальский, О. Н. Петров,

- Н. Н. Малышева; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2009143446/15; заявл. 24.11.2009; опубл. 27.03.2011. Бюл. № 9.
59. Пат. № 2408886 Рос. Федерация: МПК G 01 N 33/30. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, А.В. Юдин и др.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – опубл. 10.01.2011. Бюл. №1.
60. Пат. № 2419791 Рос. Федерация: МПК G01N 33/30; G01N 3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Б.И. Ковальский, О.Н. Петров, А.В. Кузьменко, А.С. Ромащенко, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2010108896; заявл. 09.03.2010; опубл.27.05.2011. Бюл.№15.
61. Пат. № 2406087 Рос. Федерация: МПК G01N 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». – № 2009121771; заявл. 08.06.2009; опубл.10.12.2010. Бюл.№34.
62. Берко А.В. Влияние термоокислительных процессов на противоизносные свойства моторного масла МТ-16П / А.В. Берко, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда // Сборник рефератов депонированных рукописей. М.: ЦВНИ МО РФ: №96. - 2011.
63. 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 технического университета. №5, (99),2013. – с.91-97.
64. Пат. № 2454654 Рос. Федерация: МПК G 01 N 3/56, G 01 N 33/30. Способ определения качества смазочных масел / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, А. В. Кузьменко, М. М. Рунда, Е. Г. Мальцева; заяви-

- тель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011107418/28; заявл. 25.02.2011; опубл. 27.06.2012. Бюл. №18.
65. Пат. № 2419791 Рос. Федерация: МПК G 01 N 33/30, G 01 N 3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, А. В. Кузьменко, А. С. Ромашенко, А. В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2010108896/15; заявл. 09.03.2010; опубл. 27.05.2011. Бюл. №15. Колубаев, А. В. Эволюция структуры поверхностного слоя металлов в условиях трения скольжения / А. В. Колубаев, С. Ю. Тарасов, О. В. Сизова, Е. А. Колубаев, Ю. Ф. Иванов // Трение и износ. – 2007 (28), №6. С. 582 – 590.
66. Пат. № 2454654 Рос. Федерация: МПК G 01 N 3/56, G 01 N 33/30. Способ определения качества смазочных масел / Б.И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, А. В. Кузьменко, М. М. Рунда, Е. Г. Мальцева; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011107418/28; заявл. 25.02.2011; опубл. 27.06.2012. Бюл. №18.
67. Ковальский Б. И. Прибор для испытания трущихся материалов и масел / Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, В. Г. Шрам, А. Н. Сокольников, А. А. Игнатьев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Красноярск. №1 (47). 2013. С. 53 – 56.
68. Берко А.В. Влияние степени окисления моторных масел на их противоизносные свойства /А.В. Берко, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Ананьин, В.И. Верещагин, // Интерстроймех-2009: материалы Международной научно-технической конференции / Кырг. гос. ун-т строит-ва, трансп. и архит. – Бишкек, 2009. – С.349 –353.
69. Верещагин В.И. Метод контроля качества работающих моторных масел / В.И. Верещагин, А.В. Берко, Ю.Ф. Кайзер, А.В. Кузьменко // Интерстроймех-2009: материалы Междунар. науч.-тех. конференции // Кырг. гос. ун-т строит-ва, трансп. и архит. – Бишкек, 2009. – С. 335 – 339.
70. Пат. № 2408866 Рос. Федерация: МПК G01N 3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Б.И.Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В.

- Юдин, А.В. Берко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2009144350/28; заявл.30.11.2009; опубл.10.01.2011. Бюл.№1.
71. Матвеевский, Р. М. Исследование износостойкости пар трения, применяемых в приводах автомобильных стартеров / Р. М. Матвеевский, Г. А. Иоффе, И. А. Буяновский // Вестник машиностроения. – 1975. №4. С. 22 – 25.
72. Пат. № 2366945 Рос. Федерация: МПК G01N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2008117201/04; заявл. 29.04.2008; опубл.10.09.2009. Бюл.№25.
73. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с., ил.
74. Ковальский, Б. И. Разработка комплексного метода оценки работоспособности дизельных масел: Автореф. дис. канд. техн. наук / Б. И. Ковальский. – Москва, 1985. – 24 с.
75. Гарзанов, Е. Г. Техническая диагностика поршневых газоперекачивающих агрегатов по анализу отработанного масла / Е. Г. Гарзанов, В. А. Ильин и др. // Трение и износ. – 1982. Т. 3. №2. С. 284 – 289.
76. Бауден, Ф. Трение и смазка твердых тел / Ф. Бауден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение. – 1968.
77. Рунда М.М. Процессы самоорганизации в минеральных моторных маслах при окислении / М.М. Рунда, А.В. Берко, Б.И. Ковальский // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Вып.2. – 2011. – с. 67-71.
78. Ковальский Б.И. Методика идентификации смазочных масел / Б.И. Ковальский, М.М. Рунда, А.В. Берко, А.В. Юдин // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. №8. -2013.

79. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение. – 1968. С. 480.
80. А. с. 172528 СССР. Способ непрерывного контроля работы пар трения, разделенных слоем проводящей электрический ток смазки / Б. И. Костецкий, Б. М. Барбалот. – 1965, Бюл. № 16.
81. Морозов, А. В. Теоретико-экспериментальная оценка деформационной составляющей коэффициента трения / А. В. Морозов, Ю. Ю. Маховская // Трение и износ – 2007 (28), №4. С. 335 – 343.
82. Матвеевский, Р. М. Противозадирная стойкость смазочных средств при трении в режиме граничной смазки / Р. М. Матвеевский, И. А. Буяновский, О. В. Лазовская. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
83. Берденников, А. И. Диссипативные, упругие и смазочные свойства рабочих жидкостей систем гидравлики / А. И. Берденников, Д. Г. Громаковский и др. // Трение и износ. – 1983. Т.4. №3. С. 476 – 482.
84. Костецкий, Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б. И. Костецкий // Трение и износ. – 1980. Т.1. №4. С. 622 – 634.
85. Манучаров, Ю. С. Измерение поглощения ультразвуковых волн в жидкостях на частотах 50МГц-4МГц / Ю. С. Манучаров, И. Г. Михайлов // Акустический журнал. Вып.2. – 1974. Т. 90. С. 286 – 296.
86. Крагельский, И. В. Экспериментальные исследования эффекта пленочного голодания / И. В. Крагельский, Н. М. Алексеев, и др. // Трение и износ. – 1982. №3. Т.3. С.485 – 489.
87. Кравец, И. А. Оценка процесса изнашивания деталей по электрической проводимости пары трения / И. А. Кравец, Н. Н. Кривенко // В кн.: Проблемы трения и изнашивания. Научно-технический сборник. Вып. №17. – Киев: Техника. 1980. С. 28 – 31.
88. Меньшов, П. А. Об определении цвета нефтепродуктов / П. А. Меньшов, В. С. Иванов, В. Н. Логинов // Химия и технология топлив и масел. – 1981. №4. С. 45 – 48.

89. Гершман, И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. – 1995 (16), №1. С. 61 – 70.
90. Кужаров, А. С. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении / А. С. Кужаров, С. Б. Булгаревич, А. А. Кужаров, А. Кравчик // Трение и износ. – 2002 (23), №6. С. 645 – 651.
91. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение: Справочник / под ред. Б. В. Лосикова. – М.: Химия, 1966. – 776 с. Матвеевский, Р. М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов / Р. М. Матвеевский. – М.: Наука, 1971. – 227 с.
92. Витязь, П. А. Механика пластической деформации и разрушения поверхностно-упрочненных твердых тел в условиях трения / П. А. Витязь, В. Е. Панин, А. В. Белый, А. В. Колубаев // Физическая мезомеханика. – 2002 (5), №1. С. 15 – 28.
93. Колубаев, А. В. Формирование субструктуры поверхностного слоя при трении / А. В. Колубаев, В. Л. Попов, С. Ю. Тарасов // Изв. вузов. Физика. – 1997 (40), №2. С. 89 – 95.
94. Адамсон А. Физическая химия поверхностей, пер. с англ., М., 1979.
95. Русанов, А. И., Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л., 1967
96. Ковальский Б. И. Исследование механохимических процессов моторных масел при граничном трении скольжения / Б. И. Ковальский, А. Н. Сокольников, О. Н. Петров, А. В. Кузьменко // Транстрибо. IV международный симпозиум по транспортной триботехнике. Сборник трудов. Санкт-Петербург. 2010. С. 86–91.
97. Буяновский, И. А. Граничная смазка: Этапы развития трибологии / И. А. Буяновский, И. Г. Фукс, Т. Н. Шабалина. – М.: Нефть и газ, 2002.
98. Венцель, С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С. В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – 238 с.
99. Труды Второй всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, т. III. Доклады, Изд. АН СССР, 1949.

100. Шрам В. Г. Исследования влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства моторных масел различных базовых основ / В. Г. Шрам, Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, А. Н. Сокольников // Вестник Иркутского государственного технического университета. Иркутск. №2 (73). 2013. С. 125-131.
101. Шрам В. Г. Исследования пятен износа моторных масел различных базовых основ / В. Г. Шрам, Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, Е. Г. Кравцова // Вестник Иркутского государственного технического университета. Иркутск. №3 (74). 2013. С. 92-95.
102. Попов, В. Л. Анализ механизмов формирования поверхностных слоев при трении // Трение и износ. – 1997 (18), №6. С. 818 – 826.
103. Мышкин, Н. К. Трибология в работах В. А Белого / Н. К. Мышкин, М. И. Петрокобец, Ю. М. Плескачевский и др. // Трение и износ. – 2002. Т.23. №3. С. 230 – 235.
104. А. с. 578594 СССР. Способ контроля интенсивности износа пар трения / Н. Н. Теркель, И. И. Карасик и др. – 1977, Бюл. № 40.
105. А. с. 556370 СССР. Способ исследования трения / А. С. Шампур, В. А. Федоруев. – 1977, Бюл. № 16.
106. А. с. 796732 СССР. Способ автоматического контроля технического состояния двигателя / В. И. Ямпольский, С. В. Блохин. – 1981, Бюл. №2.
107. Роулинсон, Дж., Уидом Б., Молекулярная теория капиллярности, пер. с англ., М., 1986.
108. Новое в исследовании поверхности твёрдого тела, под ред. Т. Джайядевайя, Р. Ванселова, пер. с англ., в. 1 – 2, М., 1977.
109. Дерягин, Б. В., Чураев, Н. В., Муллер, В. М., Поверхностные силы. М., 1985.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акты внедрения



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы
МЕТОД КОНТРОЛЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПО ПАРАМЕТРАМ
ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМ
ХАРАКТЕРИСТИКАМ

(наименование темы)

выполненной БЕРКО АЛЕКСАНДРОМ ВАЛЕНТИНОВИЧЕМ

(ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
 внедрены на ООО «СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНАЯ КОМПАНИЯ»

Вид внедренных результатов ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ

эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (изделия, работы, технологии) и др.

1. Характеристика масштаба внедрения СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫБОРА
СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ
МАШИН

2. Форма внедрения МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ
 методика (метод)

3. Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ
 (пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)

4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ
ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ

5. Внедрены: в промышленное производство ОТДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

6. Годовой экономический эффект

Ожидаемый —

Фактический —

7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —

8. Объем внедрения —

что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета
 гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

9. Социальный и научно-технический эффект УСОВЕРШЕНСТВОВАНА СИСТЕМА
КОНТРОЛЯ ПРИ ВЫБОРЕ ТОВАРНЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

(охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

От исполнителя

Автор разработанных методов контроля

Берко А.В.

Заместитель директора по научной работе
 Института нефти и газа СОФУ

Безбородов Ю.Н.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы
МЕТОД КОНТРОЛЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПО ПАРАМЕТРАМ
ТЕРМООКСИДНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМ
ХАРАКТЕРИСТИКАМ

(наименование темы)

выполненной БЕРКО АЛЕКСАНДРОМ ВАЛЕНТИНОВИЧЕМ

(ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ и ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
 внедрены на ООО «СИБАВТОТРАНС»

Вид внедренных результатов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ
 эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (изделия, работы, технологии) и др.

1. Характеристика масштаба внедрения СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ
КОНТРОЛЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ
2. Форма внедрения МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ
 методика (метод)
3. Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ
 (пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)
4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ
ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ
5. Внедрены: в промышленное производство ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ
6. Годовой экономический эффект
 Ожидаемый —
 Фактический —
7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —
8. Объем внедрения —
 что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета
 гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР
9. Социальный и научно-технический эффект УСОВЕРШЕНСТВОВАНА СИСТЕМА
КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

(охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

От исполнителя

Автор разработанных методов контроля

Берко А.В.

Заместитель директора по научной работе
 Института нефти и газа СФУ

Безбородов Ю.Н.



ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при триботехнических испытаниях окисленных моторных масел

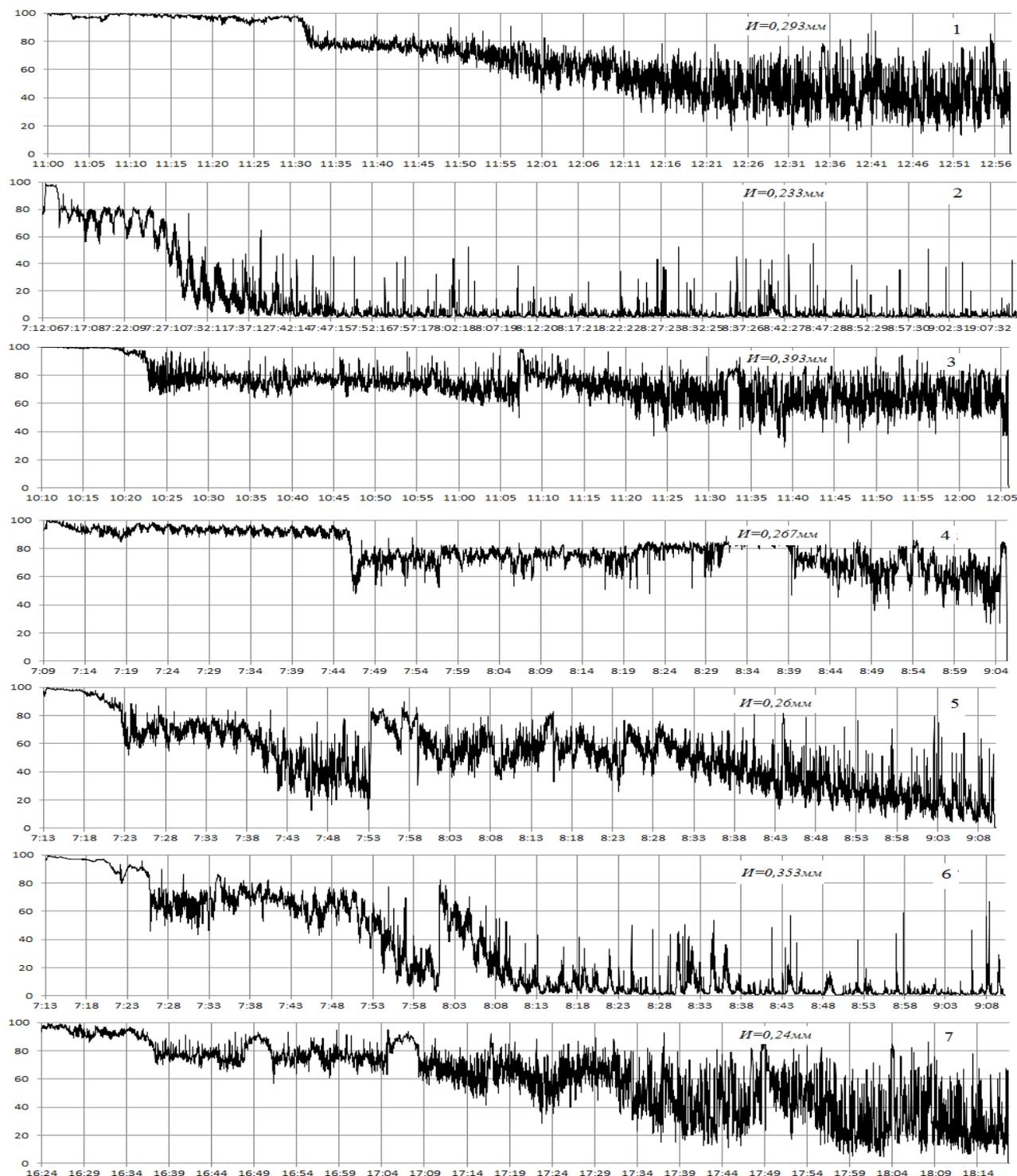


Рис.1 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления минерального моторного масла М-8Г₂: 1- товарное масло, 2- $K_{II}=0,077$ ед; 3- $K_{II}=0,29$ ед; 4- $K_{II}=0,507$ ед; 5- $K_{II}=0,593$ ед; 6- $K_{II}=0,717$ ед; 7- $K_{II}=0,857$ ед.

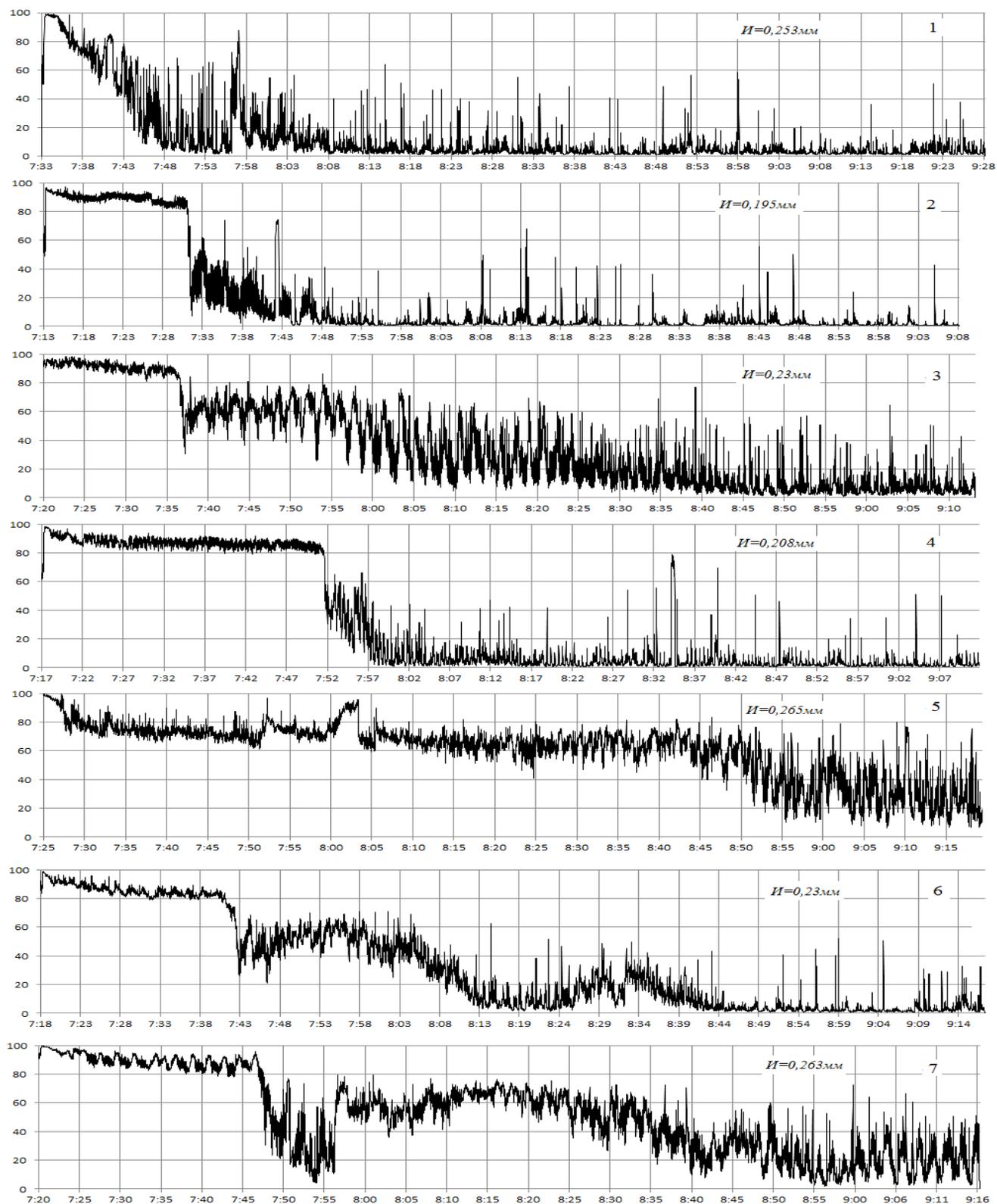


Рис.2 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления минерального моторного масла М-10Г₂к: 1- товарное масло, 2- $K_{\Pi}=0,127\text{ед}$; 3- $K_{\Pi}=0,193\text{ед}$; 4- $K_{\Pi}=0,407\text{ед}$; 5- $K_{\Pi}=0,54\text{ед}$; 6- $K_{\Pi}=0,733\text{ед}$; 7- $K_{\Pi}=0,853\text{ед}$.

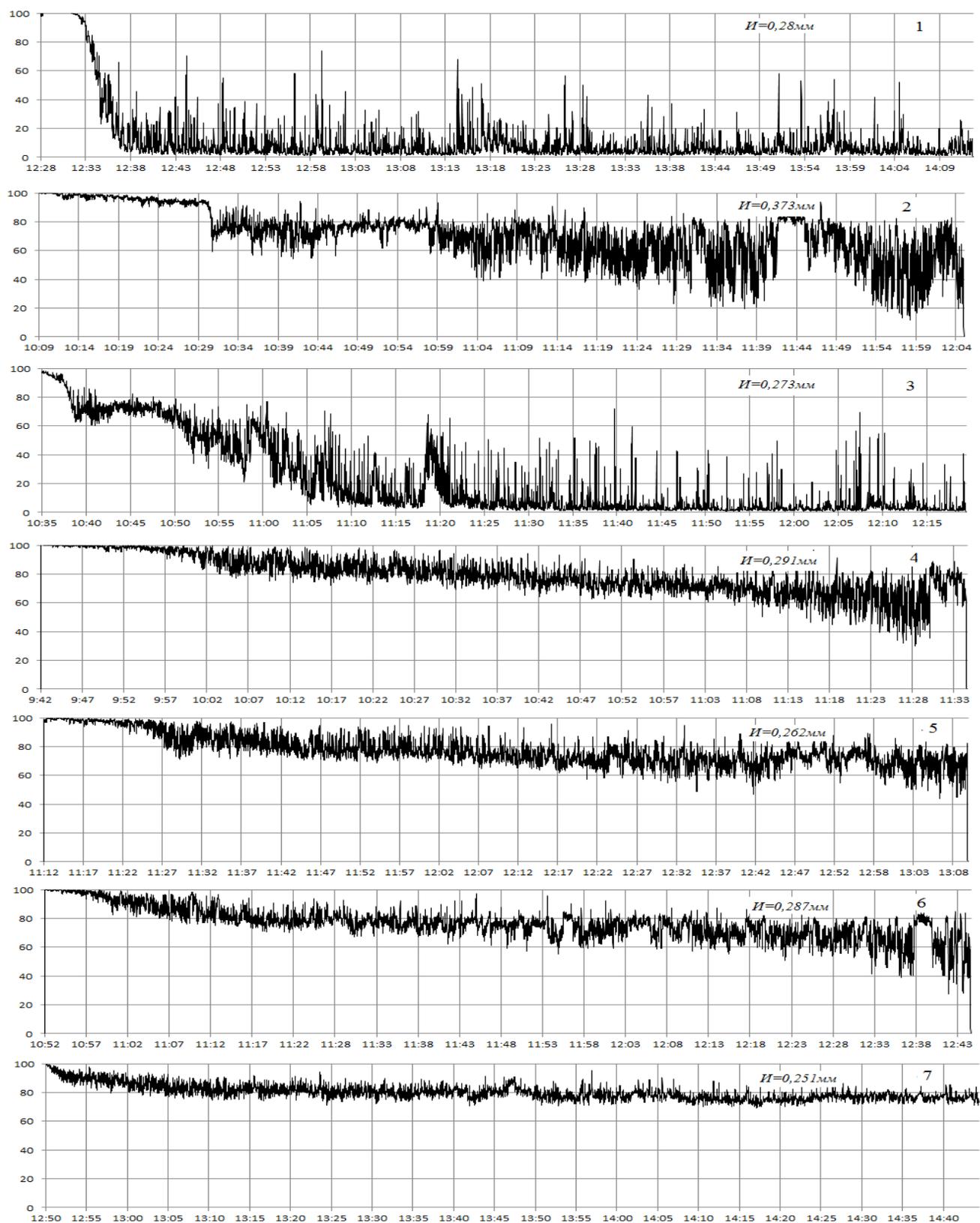


Рис.3 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления минерального моторного масла Лукойл Стандарт 10w-40 SF/CC: 1-товарное масло, 2- $K_{II}=0,133\text{ед}$; 3- $K_{II}=0,217\text{ед}$; 4- $K_{II}=0,517\text{ед}$; 5- $K_{II}=0,603\text{ед}$; 6- $K_{II}=0,687\text{ед}$; 7- $K_{II}=0,82\text{ед}$.

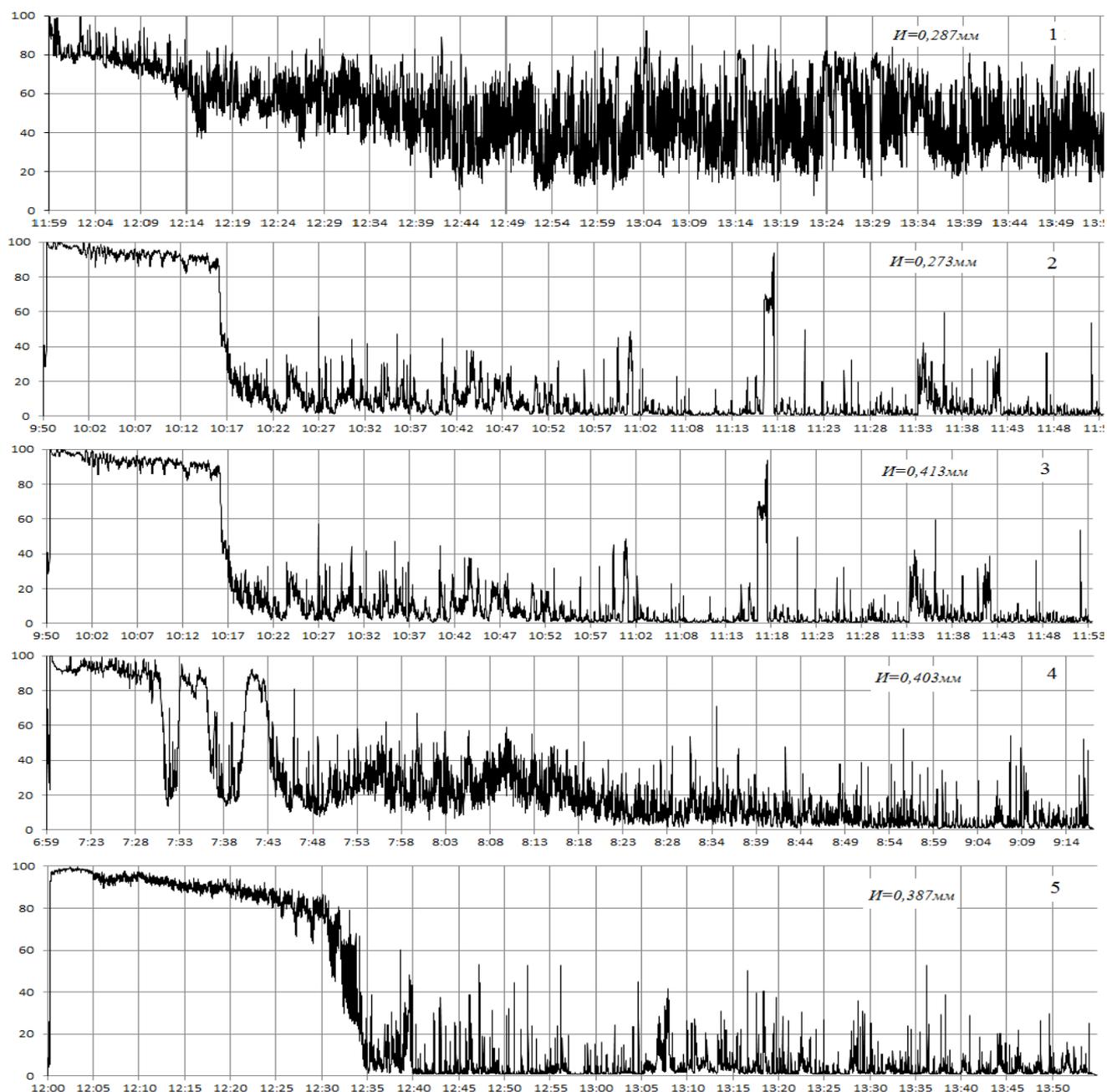


Рисунок.4 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления минерального моторного масла Utech navigator 15W-40 SG/CD: 1-товарное масло, 2- $K_{II}=0,113\text{ед}$; 3- $K_{II}=0,633\text{ед}$; 4- $K_{II}=0,827\text{ед}$; 5- $K_{II}=0,893\text{ед}$.

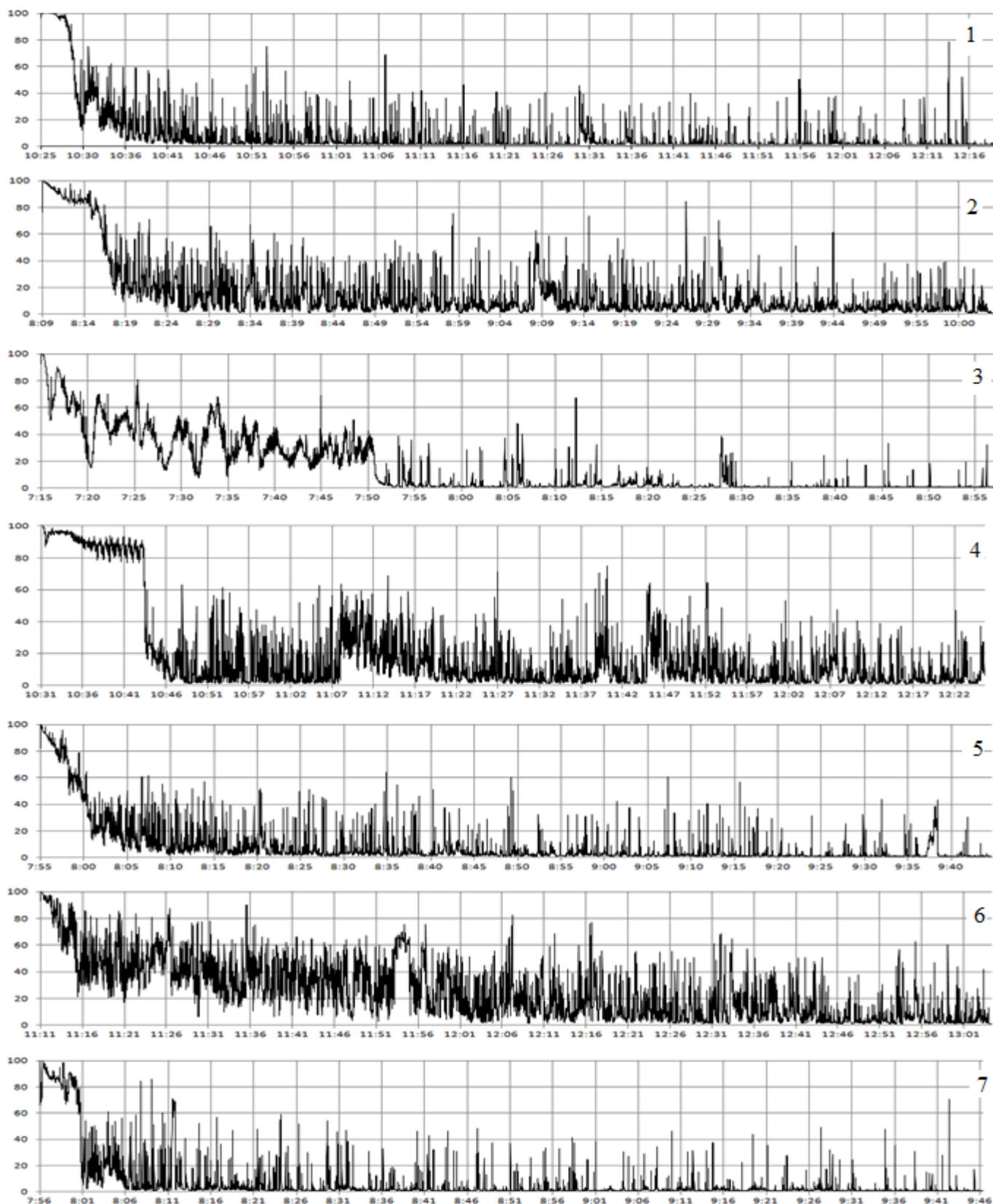


Рис.5 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления частично синтетического моторного масла Mobil Super 2000 10w-40: 1-товарное масло, 2- $K_{П}=0,183$ ед; 3- $K_{П}=0,327$ ед; 4- $K_{П}=0,42$ ед; 5- $K_{П}=0,643$ ед; 6- $K_{П}=0,833$ ед; 7- $K_{П}=0,947$ ед.

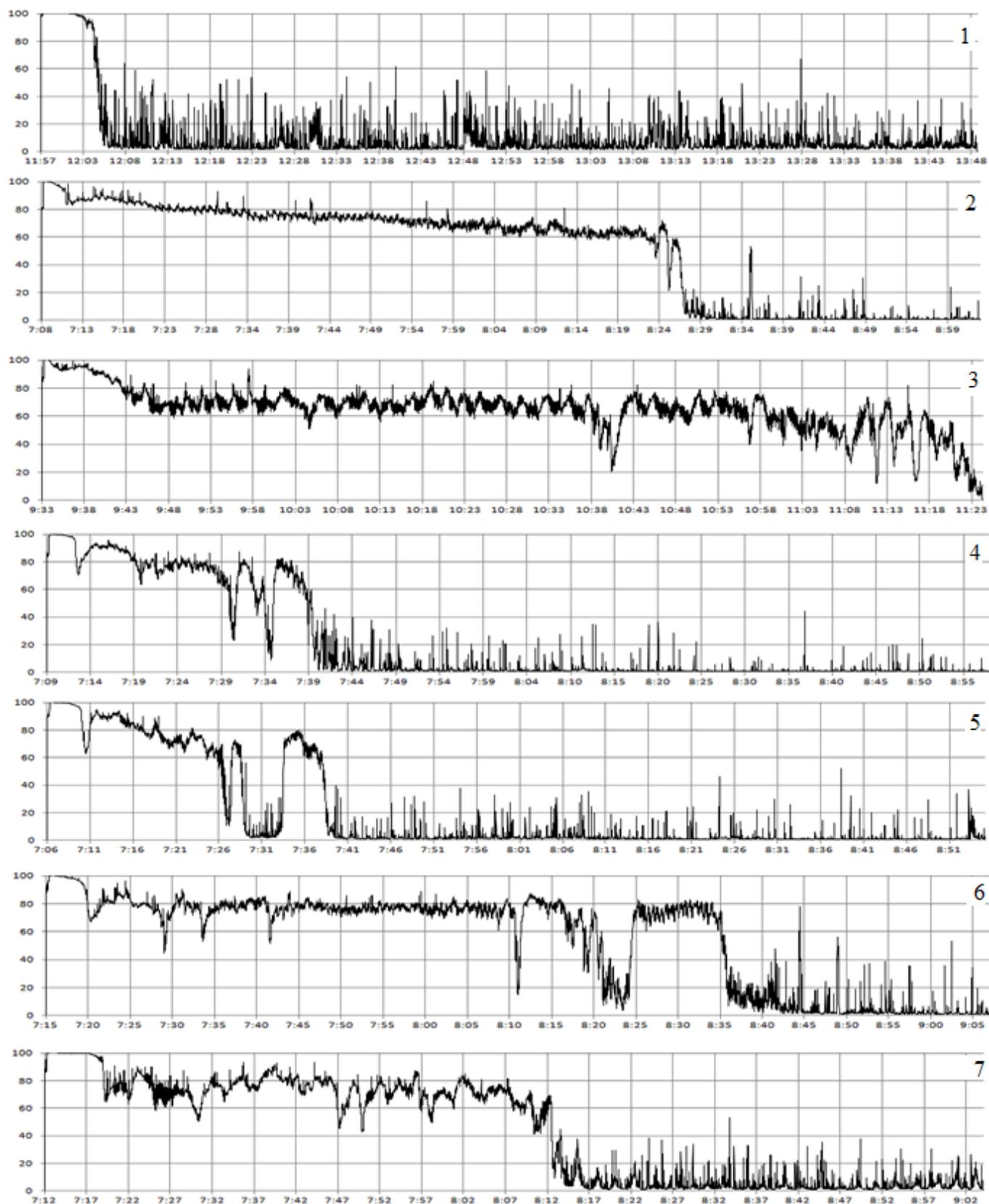


Рис.6 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления частично синтетического моторного масла Лукойл Люкс 5w-40: 1-товарное масло, 2- $K_{II}=0,093$ ед; 3- $K_{II}=0,433$ ед; 4- $K_{II}=0,583$ ед; 5- $K_{II}=0,76$ ед; 6- $K_{II}=0,84$ ед; 7- $K_{II}=0,91$ ед.

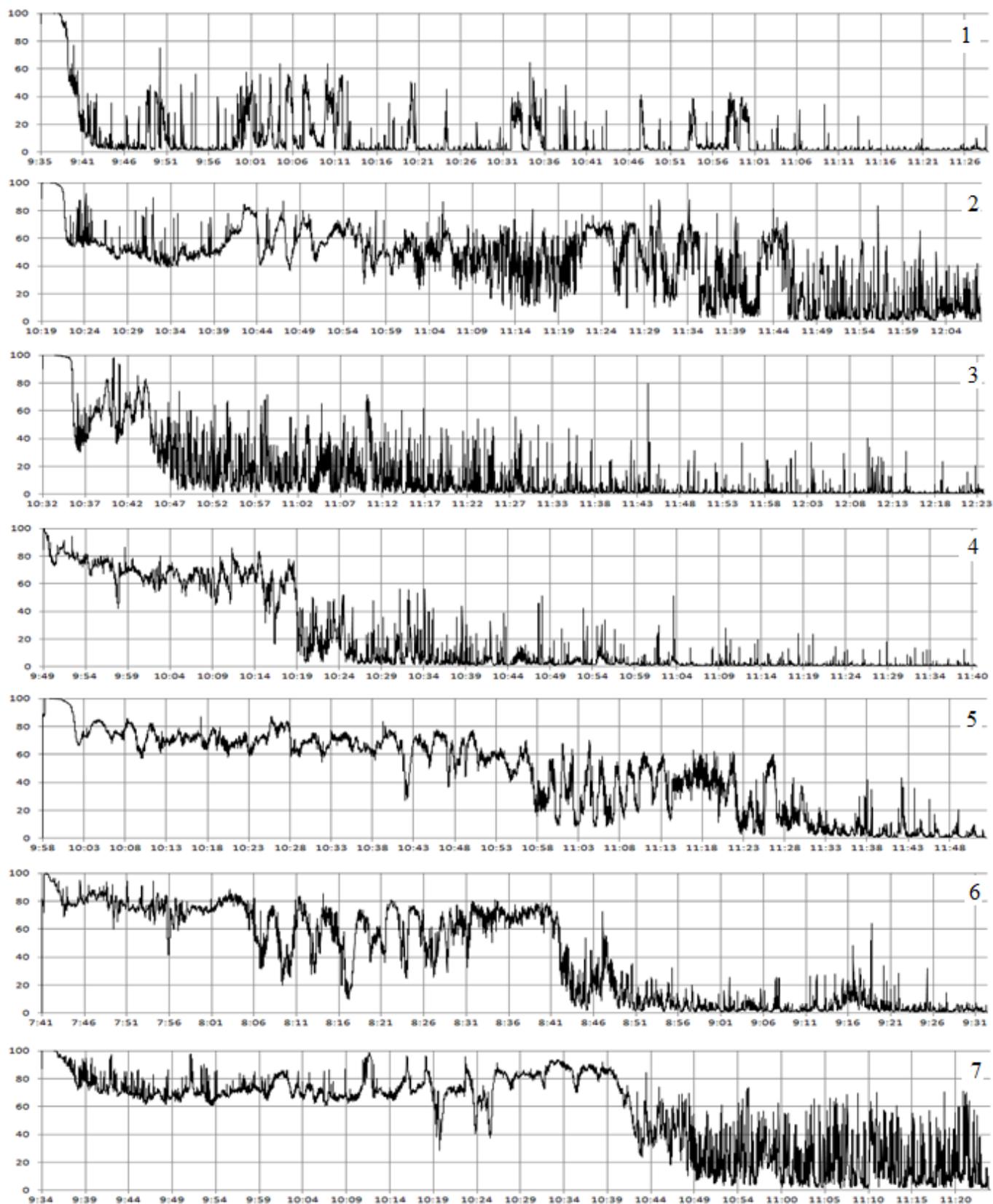


Рис.7 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления частично синтетического моторного масла ТНК Супер 5w-40: 1-товарное масло, 2- $K_{П}=0,093$ ед; 3- $K_{П}=0,197$ ед; 4- $K_{П}=0,533$ ед; 5- $K_{П}=0,633$ ед; 6- $K_{П}=0,767$ ед; 7- $K_{П}=0,863$ ед.

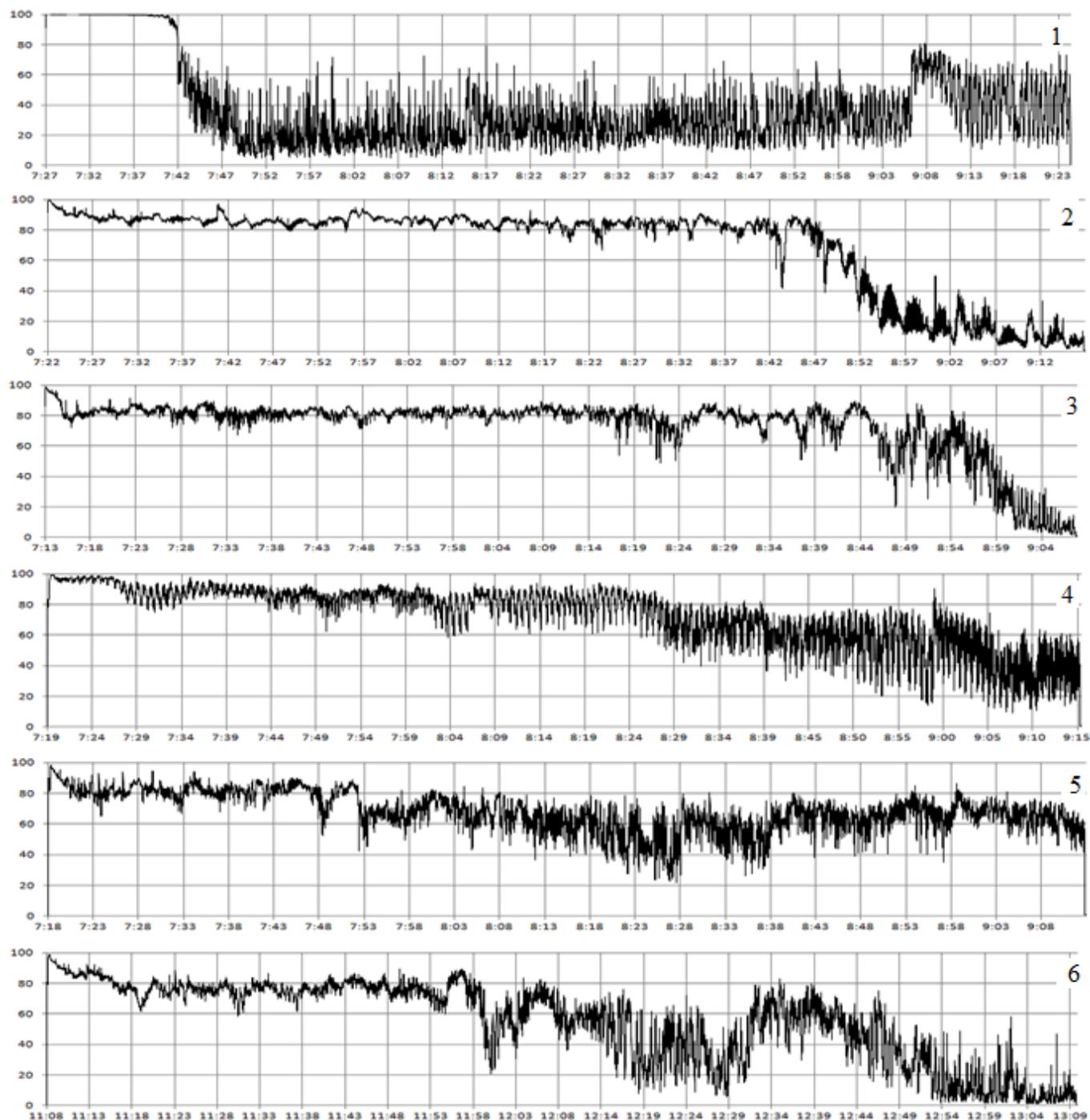


Рис.8 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления частично синтетического моторного масла Ravenol TSI 10w-40: 1-товарное масло, 2- $K_{II}=0,137$ ед; 3- $K_{II}=0,287$ ед; 4- $K_{II}=0,52$ ед; 5- $K_{II}=0,69$ ед; 6- $K_{II}=0,813$ ед.

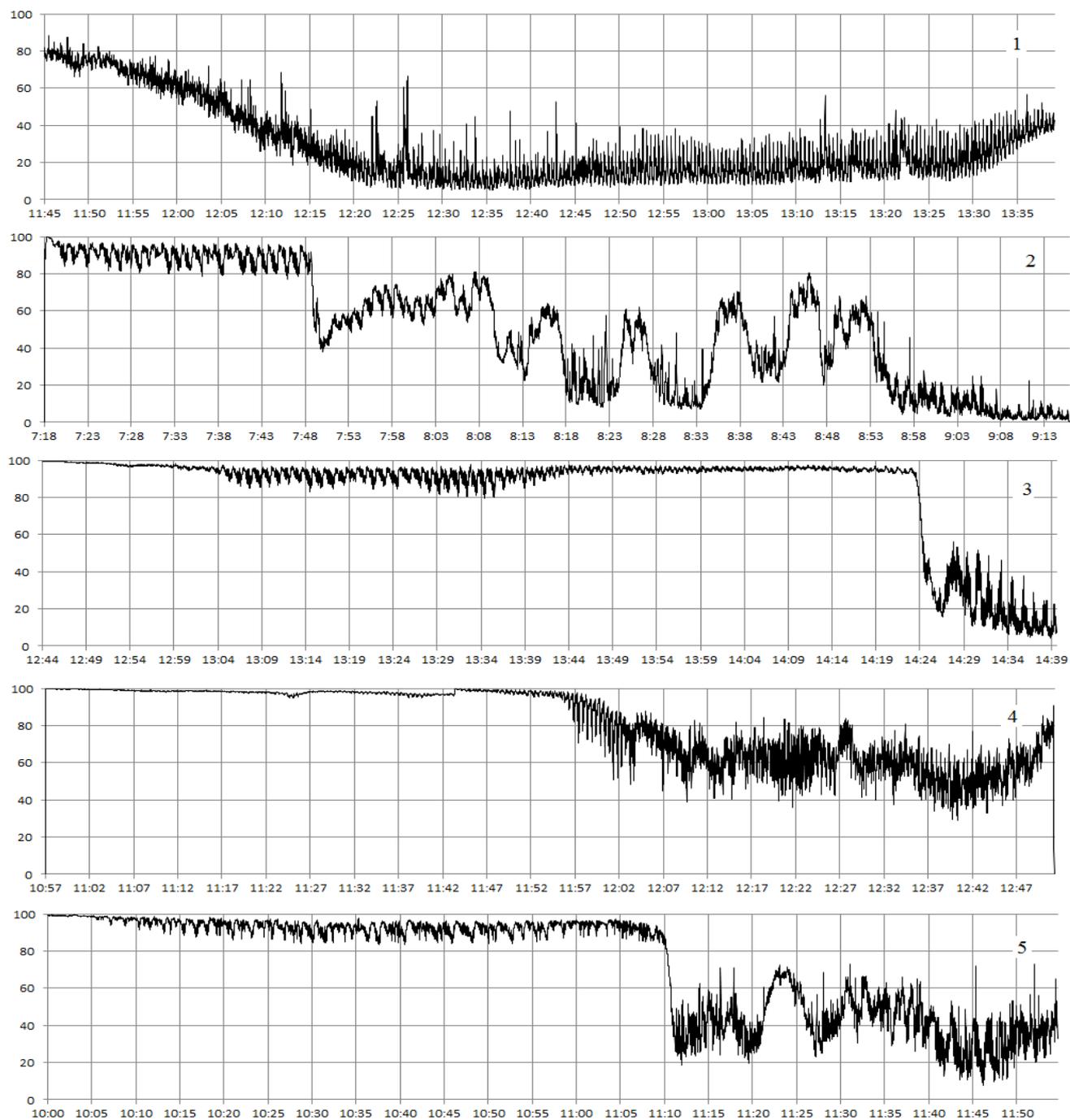


Рис.9 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления синтетического моторного масла и Mobil Super Syn 0w-40 SJ/SL/CF New Life: 1-товарное масло, 2- $K_{II}=0,1$ ед; 3- $K_{II}=0,317$ ед; 4- $K_{II}=0,727$ ед; 5- $K_{II}=0,873$ ед.

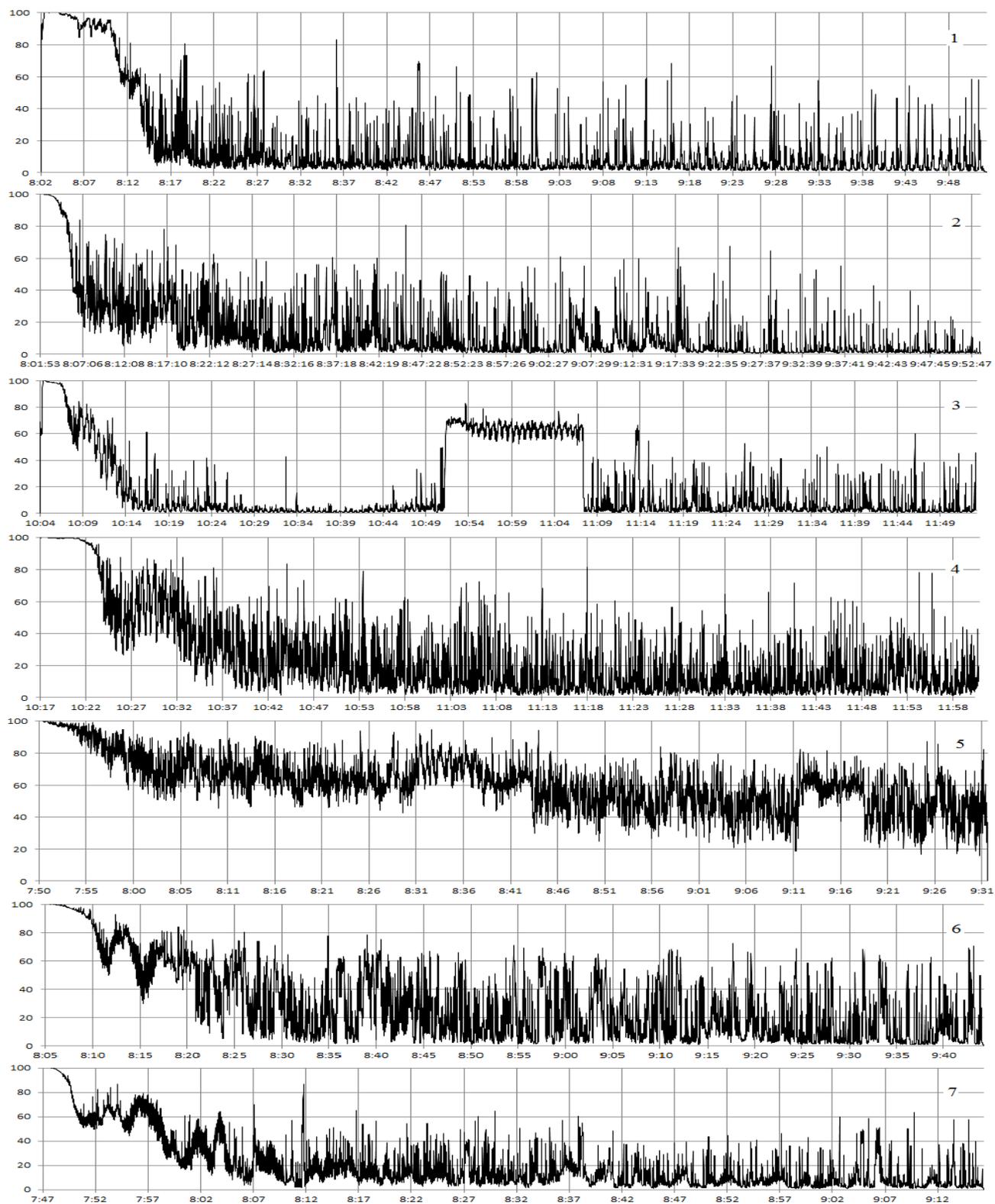


Рис.10 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления синтетического моторного масла Mobil Super 3000 5w-40 SK/CF: 1-товарное масло, 2- $K_{II}=0,183$ ед; 3- $K_{II}=0,277$ ед; 4- $K_{II}=0,57$ ед; 5- $K_{II}=0,643$ ед; 6- $K_{II}=0,68$ ед; 7- $K_{II}=0,82$ ед.

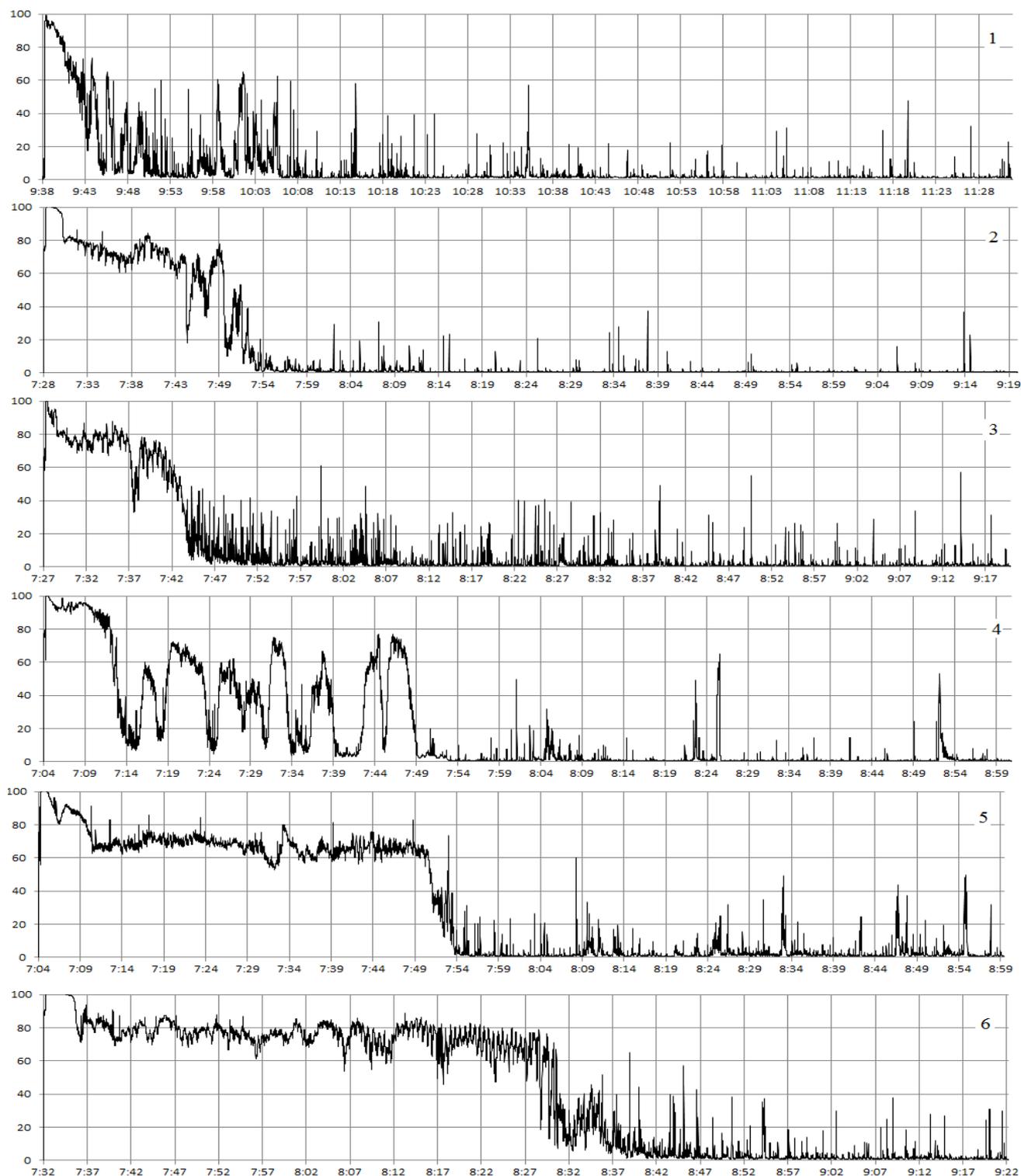


Рис.11 - Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт в зависимости от степени окисления синтетического моторного масла Agip Tec sint 5w-30 SJ/CF: 1-товарное масло, 2- $K_{II}=0,127$ ед; 3- $K_{II}=0,28$ ед; 4- $K_{II}=0,487$ ед; 5- $K_{II}=0,627$ ед; 6- $K_{II}=0,843$ ед.