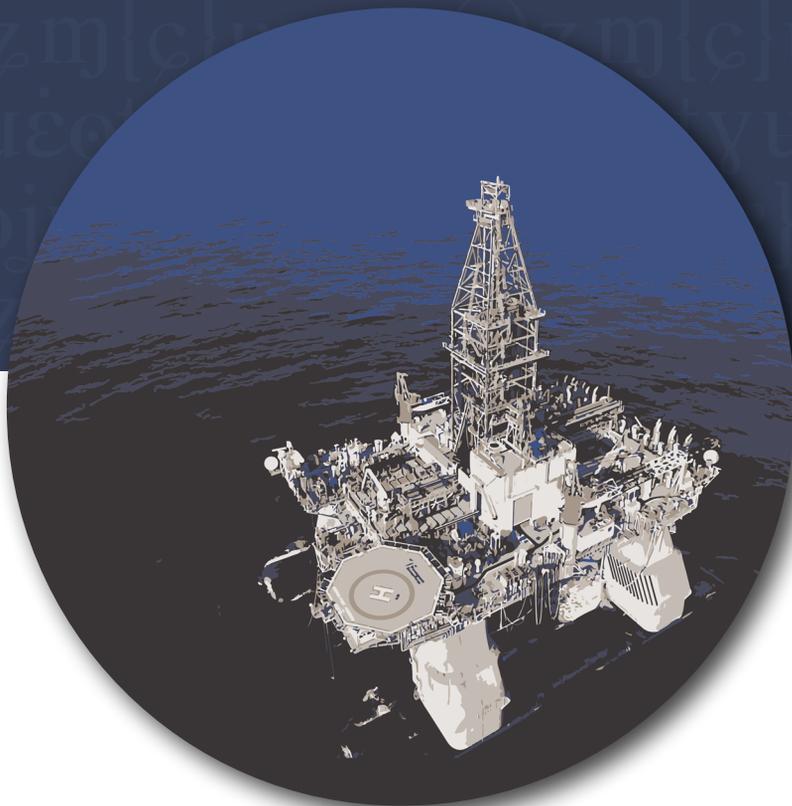




СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY



**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ
И МОТОРНЫХ МАСЕЛ
ПРИ ИХ ОКИСЛЕНИИ
И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ
И МОТОРНЫХ МАСЕЛ
ПРИ ИХ ОКИСЛЕНИИ
И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ**

Монография

Красноярск
СФУ
2017

УДК 621.892:620.19
ББК 30.82-3
М545

К о л л е к т и в а в т о р о в :

В. И. Верещагин, В. С. Янович, Б. И. Ковальский,
Ю. Н. Безбородов, В. А. Ганжа

Р е ц е н з е н т ы :

Н. И. Селиванов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» Красноярского государственного аграрного университета;

Р. И. Косаренко, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры вооружения и стрельбы Омского филиала Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева

М545 Методы контроля и результаты исследования состояния трансмиссионных и моторных масел при их окислении и триботехнических испытаниях : монография / В. И. Верещагин, В. С. Янович, Б. И. Ковальский [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 208 с.
ISBN 978-5-7638-3679-0

Представлен разработанный метод контроля состояния трансмиссионных и моторных масел, позволяющий получить дополнительную информацию при их окислении. Предложены показатели, благодаря которым осуществляется контроль за состоянием товарных и работающих масел, находящихся на кратковременном и длительном хранении, а также в период эксплуатации.

Предназначена для студентов и аспирантов технических специальностей, инженерно-технических работников, занимающихся производством смазочных материалов, проектированием, конструированием и эксплуатацией машин и механизмов.

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 621.892:620.19
ББК 30.82-3

ISBN 978-5-7638-3679-0

© Сибирский федеральный университет, 2017

|| ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ.....	7
1.1. Краткие сведения о трансмиссиях.....	7
1.2. Основные требования и классификация трансмиссионных масел	8
1.3. Важнейшие эксплуатационные свойства трансмиссионных масел.....	10
1.4. Анализ эксплуатационных факторов, влияющих на надежность трансмиссий	13
1.5. Методы контроля эксплуатационных свойств трансмиссионных масел	28
1.6. Анализ современных методов контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел	33
2. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РЕСУРС МОТОРНЫХ МАСЕЛ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ.....	39
2.1. Факторы, влияющие на ресурс моторных масел	39
2.2. Характеристика моторных масел, применяемых при эксплуатации двигателей	43
2.3. Основные виды трения и изнашивания узлов двигателей внутреннего сгорания.....	46
2.4. Современные методы контроля эксплуатационных свойств моторных масел	50
3. МЕТОД КОНТРОЛЯ МЕХАНИЗМА СТАРЕНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ И МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	55
3.1. Выбор масел для исследования	55
3.2. Основные требования к средствам контроля и измерения	55
3.3. Метод контроля трансмиссионных масел, находящихся на длительном хранении.....	62
3.4. Метод контроля отработанных и работающих моторных масел	64
3.5. Метод контроля противоизносных свойств трансмиссионных масел	68
3.6. Метод обработки экспериментальных данных	71

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ.....	75
4.1. Теоретические аспекты механизма окисления смазочных масел.....	75
4.2. Результаты исследования минерального трансмиссионного масла ТСзп-8.....	76
4.3. Результаты исследования минерального трансмиссионного масла МС-20.....	86
4.4. Результаты исследования минерального трансмиссионного масла МТ-8п при эксплуатации трансмиссий.....	96
4.5. Анализ результатов контроля минеральных трансмиссионных масел.....	105
4.6. Результаты испытания трансмиссионных масел различной базовой основы.....	111
4.7. Результаты исследования минерального трансмиссионного масла МТ-8п, находящегося в трансмиссиях при хранении техники.....	123
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ.....	127
5.1. Результаты исследования отработанных частично синтетических моторных масел.....	127
5.2. Результаты исследования отработанных синтетических моторных масел.....	134
5.3. Различия в механизме старения моторных масел различных базовых основ.....	140
5.4. Результаты исследования противоизносных свойств отработанных масел.....	143
5.5. Динамика изменения эксплуатационных свойств моторных масел за нормативный срок службы.....	149
6. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ТОВАРНЫХ И РАБОТАЮЩИХ ТРАНСМИССИОННЫХ И МОТОРНЫХ МАСЕЛ.....	154
6.1. Технология контроля состояния трансмиссионных масел парка машин длительного и кратковременного хранения.....	154
6.2. Технология контроля сопротивляемости старению работающих трансмиссионных масел.....	163
6.3. Технология контроля противоизносных свойств товарных и работающих трансмиссионных масел.....	164
6.4. Рекомендации по выбору трансмиссионных масел для трансмиссий.....	169

6.5. Рекомендации по классификации трансмиссионных масел	170
6.6. Рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел.....	173
6.7. Технология определения предельного состояния отработанных моторных масел.....	175
6.8. Технология определения текущего контроля состояния работающих моторных масел	177
6.9. Технология диагностирования состояния фильтрующих элементов системы смазки двигателя	179
6.10. Технология диагностирования технического состояния цилиндропоршневой группы	180
6.11. Технология диагностирования противоизносных свойств работающих моторных масел	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	182
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ	201

|| ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения эффективности использования трансмиссионных масел относится к одной из сложных научно-технических задач *трибологии, материаловедения и химмотологии*. Значительные трудности, возникающие при разработке теории старения смазочных масел и определении предельного состояния, связаны с большим количеством факторов, оказывающих влияние на процессы старения смазочных масел. Можно выделить два основных направления исследований в области определения предельного состояния трансмиссионных масел: лабораторные и эксплуатационные. При лабораторных исследованиях контролируются основные эксплуатационные показатели качества, к которым относятся антиокислительные, противоизносные, противозадирные, коррозионные, диспергирующие, антипенные и вязкостные свойства. На основе лабораторных исследований разрабатывают рекомендации, которые затем проверяют и корректируют в условиях эксплуатации. Система контроля состояния трансмиссионных масел в период эксплуатации техники не предусматривает применения диагностических средств контроля и поэтому, наряду со своей простотой, не позволяет обеспечить своевременный анализ состояния масел, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат. Кроме того, на неэффективность эксплуатационной системы влияют заводы-изготовители, устанавливающие ресурс трансмиссионных масел в километрах пробега. Особенно явно это выражается при эксплуатации бронетехники, которая используется периодически. При хранении такой техники процессы старения протекают с минимальной скоростью и не могут оцениваться пробегом.

В данной монографии исследованы используемые трансмиссионные и моторные масла, определены некоторые подходы к комплексному решению проблемы контроля состояния масел в зависимости от условий эксплуатации техники, находящейся на длительном и кратковременном хранении.

1

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

1.1. Краткие сведения о трансмиссиях

В период Великой Отечественной войны все серийные танки имели однопоточные механические ступенчатые трансмиссии, в состав которых входили главный фрикцион сухого трения, простая коробка передач с переключением передач с помощью кареток или зубчатых муфт, механизм поворота в виде двух ступенчатых планетарных механизмов поворота или бортовых фрикционов, механические приводы управления непосредственного действия, однорядные или двухрядные бортовые редукторы.

Высокий КПД механической трансмиссии обеспечивал большой запас хода танка, а отсутствием дифференциала достигалось устойчивое прямолинейное движение. Применение механических трансмиссий объяснялось простотой и дешевизной их изготовления, легкостью ремонта в полевых условиях [1].

Гидромеханические трансмиссии отличались от механических:

- плавной передачей от двигателя к ведущим колесам танка и непрерывным изменением крутящего момента в некоторых пределах;
- меньшим числом передач и возможностью применения более простой конструкции автоматики переключения передач;
- предотвращением произвольного глушения двигателя при преодолении вертикальных противотанковых препятствий или подводном вождении.

Преимущества электромеханических трансмиссий перед механическими заключаются:

- в улучшении тяговых характеристик;
- снижении расхода топлива (так как частота вращения коленчатого вала двигателя не зависела от скорости движения танка);
- улучшении поворотливости за счет непрерывного регулирования разности скоростей гусениц;
- улучшении тормозной характеристики за счет электродинамического торможения;
- легкости отбора мощности двигателя.

Кроме того, электромеханическая трансмиссия представляла собой передвижную электростанцию и позволяла ликвидировать дефицит электроэнергии в танке при одновременной и длительной работе многочисленных потребителей. В этой связи при создании первых послевоенных отечественных танков были определены основные направления по совершенствованию трансмиссий.

1.2. Основные требования и классификация трансмиссионных масел

Трансмиссионные масла представляют собой базовые масла, легированные различными функциональными присадками. В качестве базовых используют минеральные, частично или полностью синтетические масла. В агрегатах трансмиссий смазочное масло – это неотъемлемый элемент конструкции. Способность масла выполнять и длительно сохранять функции конструкционного материала зависит от его эксплуатационных свойств. Общие требования к трансмиссионным маслам определяются конструктивными особенностями, назначением и условиями эксплуатации агрегата трансмиссии. Трансмиссионные масла работают в режимах высоких скоростей скольжения, давлений и при широких диапазонах температур. Их пусковые свойства и длительная работоспособность должны обеспечиваться в интервале температур от -40 до $+150$ °С. Поэтому к трансмиссионным маслам предъявляют довольно жесткие требования.

Основными функциями трансмиссионных масел являются [2]:

- предохранение поверхностей трения от износа, заедания, питтинга и других повреждений;
- снижение до минимума потерь энергии на трение;
- отвод тепла от поверхностей трения;
- снижение шума и вибрации зубчатых колес, уменьшение ударных нагрузок.

Для обеспечения надежной и длительной работы агрегатов трансмиссий смазочные масла должны обладать определенными характеристиками [2]:

- иметь достаточные противозадирные, противоизносные и противопиттинговые свойства;
- обладать высокой антиокислительной стабильностью;
- иметь хорошие вязкостно-температурные свойства;
- не оказывать коррозионного воздействия на детали трансмиссии;
- иметь хорошие защитные свойства при контакте с водой;

- хорошие антипенные свойства;
- высокую физическую стабильность в условиях длительного хранения.

Все эти свойства трансмиссионного масла могут быть обеспечены за счет введения в состав базового масла соответствующих функциональных присадок: депрессорной, противозадирной, противоизносной, антиокислительной, антикоррозионной, антиржавейной, антипенной и др.

Многообразие вырабатываемых трансмиссионных масел, предназначенных для разнообразной техники, вызвало необходимость разработки и использования классификаций масел, позволяющих правильно решить вопрос о выборе сорта масла для данной конструкции трансмиссии. Отечественная классификация трансмиссионных масел отражена в ГОСТ 17479.2–85.

В зависимости от уровня кинематической вязкости при 100 °С трансмиссионные масла разделяют на четыре класса (табл. 1.1). В соответствии с классом вязкости ограничены допустимые пределы кинематической вязкости при 100 °С и отрицательная температура, при которой динамическая вязкость не превышает 150 Па·с. Эта вязкость считается предельной, так как при ней еще обеспечивается надежная работа агрегатов трансмиссий.

Таблица 1.1

Классы трансмиссионных масел по ГОСТ 17479.2–85

Класс вязкости	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	Температура, при которой динамическая вязкость не превышает 150 Па·с, °С, не выше
9	6,00–10,99	–35
12	11,00–13,99	–26
18	14,00–24,99	–18
34	25,00–41,00	–

В зависимости от эксплуатационных свойств и возможных областей применения масла для трансмиссий автомобилей, тракторов и другой мобильной техники отнесены к пяти группам (ТМ-1–ТМ-5), указанным в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Группы трансмиссионных масел по ГОСТ 17479.2–85 [2]

Группа масел по эксплуатационным свойствам	Состав масел	Рекомендуемая область применения
1	Минеральные масла без присадок	Цилиндрические, конические и червячные передачи, работающие при контактных напряжениях от 900 до 1 600 МПа и температуре масла в объеме до 90 °С

Группа масел по эксплуатационным свойствам	Состав масел	Рекомендуемая область применения
2	Минеральные масла с противоизносными присадками	То же, при контактных напряжениях до 2 100 МПа и температуре масла в объеме до 130 °С
3	Минеральные масла с противозадирными присадками умеренной эффективности	Цилиндрические, конические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях до 2 500 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С
4	Минеральные масла с противозадирными присадками высокой эффективности	Цилиндрические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях до 3 000 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С
5	Минеральные масла с противозадирными присадками высокой эффективности и многофункционального действия, а также универсальные масла	Гипоидные передачи, работающие с ударными нагрузками при контактных напряжениях выше 3 000 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С

Группу масел устанавливают по результатам оценки их свойств по ГОСТ 9490–75 при разработке новых трансмиссионных масел и постановке их на производство, а также при периодических испытаниях товарных масел один раз в два года.

По классификации ГОСТ 17479.2–85 масла маркируют по уровню напряженности работы трансмиссии и классу вязкости. Например, в маркировке масла ТМ-5-18 ТМ означает начальные буквы русского словосочетания «трансмиссионное масло», первая цифра – группу масла по эксплуатационным свойствам, вторая цифра – класс его вязкости.

1.3. Важнейшие эксплуатационные свойства трансмиссионных масел

Основной функцией трансмиссионного масла является снижение износа и предотвращение задира. Это свойство называют смазывающей способностью масла, которая возрастает при увеличении вязкости.

В зубчатых передачах реализуется гидродинамическое, смешанное и граничное трение, в подшипниках качения – эластогидродинамическое

и граничное трение. Однако гидродинамический режим трения возникает только на периферии контакта зубчатых передач. Непосредственно в полосе зацепления наблюдается режим граничного трения. При этом режиме трения под воздействием высоких температур и нагрузок защита от износа и задира обеспечивается при помощи противозадирных и противоизносных присадок, в качестве которых используют серу-фосфор-бор – содержащие вещества.

В режиме граничного трения пленка смазочного масла, разделяющего поверхности трения, очень тонкая; при этом в точках микроконтактов зубчатых колёс возникают температуры (вспышки), которые в десятитысячные доли секунды достигают и превосходят температуру плавления металла. В этих условиях активные элементы противоизносных и противозадирных присадок вступают в химическое взаимодействие с металлом, образуя модифицированные слои с более низким напряжением сдвига. В зависимости от состава присадок эти слои представляют собой сульфиды, оксиды, фосфаты или фосфиды железа. Модифицированная пленка образуется мгновенно и предотвращает задир зубчатых колес.

Вязкость масла в этих условиях не имеет принципиального значения, как, например, при режиме гидродинамического смазывания. Однако в тонком слое масла с малой вязкостью может содержаться недостаточное количество противозадирной присадки, вследствие чего возникает опасность непосредственного контакта металлических поверхностей. Поэтому при производстве маловязких трансмиссионных масел их противозадирный потенциал повышают, увеличивая концентрацию присадок в 1,5 раза.

Вязкостно-температурные свойства трансмиссионного масла имеют большое значение для его эксплуатационной характеристики. От вязкости зависят потери мощности на трение и способность масла удерживаться в смазываемом узле. Между вязкостью и потерями мощности в агрегатах трансмиссии существует прямая связь. Чем меньше вязкость масла, тем меньше потери энергии на внутреннее трение, тем выше КПД трансмиссии. Однако при уменьшении вязкости масла существует опасность увеличения задира, истирания и питтинга. Кроме того, уменьшение вязкости масла ниже определенного уровня может привести к увеличению его расхода из-за несовершенства уплотнений и недостаточной герметизации трансмиссии. В связи с этим к маслу при его разработке предъявляют противоречивые требования. Для обеспечения холодного пуска трансмиссии при низких температурах и снижения потерь на внутреннее трение вязкость масла должна быть минимальной, а для обеспечения высокой несущей способности масляной пленки и снижения утечек через уплотнения – максимальной. Однако по мере совершенствования конструкций агрегатов трансмиссий повышение интенсивности их работы производится за счет

граничного и смешанного трения, при которых вязкость масла теряет свое прежнее значение, а первостепенным является введение в масло эффективных функциональных присадок, осуществляющих защиту поверхностей трения от задира и износа. Улучшение материалов уплотнений позволяет использовать маловязкие масла в агрегатах трансмиссий.

В процессе работы зубчатых передач трансмиссионные масла интенсивно разогреваются вследствие трения. Повышенная температура в сочетании с активным действием кислорода воздуха и каталитическим действием металлических поверхностей приводит к усиленному окислению масла, образованию в нем нерастворимых веществ, выпадающих в осадок.

В результате окисления масла изменяются его физико-химические и эксплуатационные свойства: увеличивается вязкость, возрастает коррозионная активность, ухудшаются противозадирные свойства. Скорость и глубина окисления масла зависят от длительности окисления, температуры масла, каталитического действия металла, концентрации кислорода. Наибольший эффект на окисление масла оказывает температура. Состав базового масла также влияет на окисляемость трансмиссионного масла. Например, при уменьшении в основе содержания остаточного компонента наблюдается пропорциональное увеличение термоокислительной стабильности масла. При работе смазочного масла в трансмиссии окисляются все его компоненты, в том числе и присадки. При этом эксплуатационные свойства масла ухудшаются. Особенно опасно уменьшение содержания в масле противозадирной присадки, что может вызвать отказ механизма. Для замедления процесса окисления в трансмиссионные масла вводят антиокислительные присадки. Эти ингибиторы действуют в двух направлениях – одни разрушают свободные радикалы, тем самым разрывая окислительную цепь, а другие взаимодействуют с пероксидами, образующимися в процессе окисления. В моторных и трансмиссионных маслах применяют антиокислители, работающие по механизму разрушения пероксидов. К ним относятся дитиофосфаты металлов.

Для защиты деталей от коррозии в трансмиссионные масла вводят ингибиторы. Эти вещества тормозят процесс окисления, снижая в масле концентрацию агрессивных элементов, нейтрализуя образовавшиеся в масле кислые продукты; таким образом происходит образование на поверхностях трения защитной пленки, исключаяющей прямой контакт с агрессивными продуктами. Такая пленка пассивирует металл, предупреждая его каталитическое воздействие на окисление масла. Поэтому большинство ингибиторов коррозии являются дезактиваторами металла.

Во время эксплуатации трансмиссионные масла могут обводняться. Это происходит вследствие поступления влаги через зазоры уплотнений и конденсации паров воды из воздуха и создает условия для появления

электрохимической коррозии, которую устраняют введением в состав масла защитных присадок, называемых противоржавейными. Механизм действия защитных присадок сводится к вытеснению влаги и других электролитов с поверхности металла и образованию на нем прочной адсорбционной пленки, предотвращающей контакт металла с агрессивной средой.

В процессе работы зубчатых передач смазочное масло подвергается интенсивному перемешиванию, поэтому в него попадает воздух и образуется пена, а также ускоряются процессы окисления. Стойкость масел к вспениванию в значительной степени зависит от углеводородного состава масла, способа и глубины его очистки, природы функциональных присадок, давления и температуры.

В нефтяных маслах растворимость воздуха больше, чем в парафиновых. Растворимость воздуха в масле снижается при уменьшении температуры и давления. При повышении температуры процесс образования пены интенсифицируется, и тем эффективней, чем меньше вязкость масла.

Загрязняющие примеси и в некоторых случаях функциональные присадки увеличивают поверхностное натяжение пленки, повышая устойчивость пены, в результате зубчатые колеса смазываются масловоздушной смесью, что приводит к отказам зубчатых передач. Основное назначение антипенных присадок – предупреждение образования стабильной пены в работающем агрегате. Антипенные присадки вызывают уменьшение поверхностного натяжения пленок, разделяющих мелкие пузырьки воздуха, которые объединяются в более крупные и легко разрываются, и пена гасится.

Анализ важнейших эксплуатационных свойств трансмиссионных масел показал, что основными из них, влияющими на надежность агрегатов трансмиссий, являются смазывающие свойства; ресурс масла определяют термоокислительная стабильность и вязкостно-температурная характеристика. Однако продукты окисления влияют как на смазывающие свойства масла, так и на вязкость, поэтому в нашей работе основное внимание уделено изучению процессов окисления.

1.4. Анализ эксплуатационных факторов, влияющих на надежность трансмиссий

К факторам, влияющим на надежность трансмиссий, относятся нагрузка, температура и скорость скольжения. Температурные условия эксплуатации трансмиссий зависят не только от внешних условий, но главным образом от нагрузки и скорости скольжения, определяющих

температуру в зоне контакта, процессы окисления и температурную деструкцию масляного слоя, разделяющего поверхности трения.

Основными элементами трансмиссий являются зубчатые передачи и подшипники качения, в которых реализуется граничная и эластогидродинамическая смазка. При этом главный вид изнашивания – усталостное напряжение, а опасное повреждение – заедание, приводящее к необратимым разрушениям поверхностей контактирующих деталей. Эффективная мера против заеданий – легирование трансмиссионных масел противозадирными присадками, обеспечивающими формирование на поверхностях трения защитных модифицированных слоев.

На усталостную долговечность поверхностей зубьев и подшипников качения влияют вязкость масла, его вязкостно-температурные и низкотемпературные свойства.

При подборе трансмиссионных масел их кинематическая вязкость и низкотемпературные свойства определяются климатическими условиями эксплуатации и хранения техники, особенностями конструкций передач, мощностью двигателя, нагрузочными характеристиками и температурными режимами работы трансмиссий.

Для трансмиссионных масел, работающих в широком диапазоне температур [3; 4], важна пологость вязкостно-температурной кривой в области температур, где масла подчиняются закону Ньютона

$$\tau = \eta \frac{dV}{dn}, \quad (1.1)$$

где τ – напряжение внутреннего трения, Н/м; η – динамический коэффициент вязкости, Па·с; dv/dn – скорость деформации жидкости, м/с.

Зависимость кинематической вязкости от температуры [3; 4] определяется законом Вальтера

$$\lg \lg(\gamma + 0,8) = A + B \lg T, \quad (1.2)$$

где γ – кинематическая вязкость, мм²/с; A и B – константы, зависящие от углеводородного состава масла; T – температура, °С.

Индекс вязкости (ИВ) характеризует вязкостно-температурные свойства масел в области положительных температур [5]:

$$\text{ИВ} = \frac{L - U}{P} 100, \quad (1.3)$$

где L – кинематическая вязкость при 40 °С нефтепродукта с индексом вязкости D , обладающего той же кинематической вязкостью при 100 °С, что и испытуемый нефтепродукт, мм²/с; U – кинематическая вязкость при 40 °С нефтепродукта, индекс вязкости которого требуется определить, мм²/с;

$D = L - H$, где H – кинематическая вязкость при 40 °С нефтепродукта с индексом вязкости 100, обладающего той же кинематической вязкостью при 100 °С, что и испытуемый нефтепродукт, мм²/с; L и D определяются по табл. 1.3, приведенной в источнике [5]. Высокий индекс вязкости (>80) имеют хорошо очищенные масла, за исключением низко застывающих, загущенных полимерными присадками, которые независимо от углеводородного состава имеют высокий ИВ [6].

При низких температурах, близких к температуре застывания масла, вязкость зависит от градиента скорости сдвига, поэтому при динамической вязкости больше 4 000–5 000 Па·с троганье с места автомобиля без подогрева трансмиссии затруднено [7].

По К. С. Рамаяя [8], динамическая вязкость нефтяных и растительных масел удовлетворяет следующей зависимости от абсолютной температуры:

$$\eta = \exp\left(A \frac{B}{T}\right), \text{ или } \sqrt{\lg \eta} = \left(A \frac{B}{T}\right). \quad (1.4)$$

Как правило, динамическая вязкость качественных трансмиссионных масел нормируется при температуре на 5 °С выше температуры застывания.

При повышении давления вязкость масла повышается по экспоненциальному закону [8; 9]:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{dp}, \quad (1.5)$$

где η – динамическая вязкость при давлении P ; η_0 – динамическая вязкость при атмосферном давлении; e – основание натурального логарифма; d – пьезокоэффициент вязкости,

$$d = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{d\eta}{dp}.$$

При выборе трансмиссионных масел необходимо учитывать, что для трансмиссий характерны высокие нагрузки на зубья передач (до 294,3 МПа) и непостоянство режимов работы. Износ, а в некоторых случаях заедание зубьев передач при их работе на маслах без присадок свидетельствуют о том, что гидродинамические и контактно-гидродинамические законы смазки для них нехарактерны. Ощутимое повышение долговечности зубчатых передач трансмиссий достигается применением противоизносных и противозадирных присадок к маслам.

Температура начала взаимодействия химически активных противозадирных присадок с металлом определяет условия их применения и правильность выбора. Присадки не должны реагировать с металлом при температуре масла, равной объемной температуре, чтобы не вызывать коррозию, но должны вступать в реакцию при температурах, которые возникают

в контакте зубчатой передачи. Поэтому при подборе присадок и выборе масел с присадками необходимо иметь представление о температурах, возникающих на поверхностях трения. Следует отметить, что исследований в области определения температур начала действия противоизносных и противозадирных присадок на триботехнические характеристики масел очень мало.

В работе [10] предложен метод контроля влияния температуры и нагрузки на триботехнические характеристики масел, позволяющий определить температуру начала действия присадок, предотвращающего схватывание, а в работе [11] – метод управления смазывающими свойствами масел, заключающийся в изменении электрического потенциала на поверхностях трения, усиливающего процессы формирования модифицированных и граничных слоев.

Температура на поверхностях трения может быть приближенно рассчитана по формулам Блока [12; 13]. Температуру контакта на головке зуба шестерни $\theta V_{ш}$ (ножка зуба колеса) рассчитывают по формуле

$$\theta V_{ш} = 0,83 \frac{fq \left(\frac{V'_{ш} - V''_{к}}{\sqrt{V'_{ш}} + \sqrt{V''_{к}}} \right)}{\sqrt{\lambda \gamma c v_1 V_{ш}}}, \quad (1.6)$$

где f – коэффициент трения; q – погонная нагрузка на зуб, Н; $V'_{ш}$ – скорость головки зуба шестерни, м/с; $V''_{к}$ – скорость ножки зуба колеса, м/с; λ – коэффициент теплопроводности стали, кг/м³; c – удельная теплоёмкость стали, Дж/(кг·К); $v_1 V_{ш}$ – половина ширины полосы контакта на головке зуба шестерни, см.

Температуру контакта на головке зуба колеса (ножке зуба шестерни) рассчитывают по формуле

$$\theta V_{к} = 0,83 \frac{fq \left(\frac{V''_{к} - V'_{ш}}{\sqrt{V''_{к}} + \sqrt{V'_{ш}}} \right)}{\sqrt{\lambda \gamma c v_1 V_{к}}}, \quad (1.7)$$

где $V_{к}$ – скорость головки зуба колеса, м/с; $V'_{ш}$ – скорость ножки зуба шестерни, м/с; $v_1 V_{к}$ – половина ширины полосы контакта на головке колеса, см.

Расчетные значения $\theta V_{ш} = 275$ °С; $\theta V_{к} = 281$ °С.

Контактная нагрузка H на головке зуба шестерни

$$PV_{ш} = q/2v_1V_{ш}, \quad (1.8)$$

где $v_1 V_{ш}$ – половина ширины полосы контакта на головке зуба шестерни, см.

Контактная нагрузка на головке зуба колеса

$$PV_k = q/2v_1V_k. \quad (1.9)$$

Механизм заедания в зубчатых передачах по данным [14] происходит в три стадии. На первой стадии происходит разрушение эластогидродинамической пленки, разделяющей трущиеся поверхности, а при дальнейшем ужесточении режимов эксплуатации – разрушение граничных смазочных слоев. Вторая стадия заедания – это схватывание и разрушение обнажившихся вершин микронеровностей на отдельных участках поверхностей контактирующих тел. Третья стадия – необратимое схватывание и повреждение активных участков поверхностей деталей.

На первой стадии заедания [15] переход к нему осуществляется при невысоких скоростях от эластогидродинамической смазки к граничной, а затем к режиму заедания. При высоких скоростях переход происходит непосредственно от частично эластогидродинамического режима к заеданию, поэтому его можно рассматривать как кинетический, на первой стадии которого происходит разрушение смазочного слоя, а на втором – образование и разрушение адгезионных связей между контактирующими телами в процессе относительного перемещения. На третьей стадии количество образовавшихся связей возрастает до критического числа, превышение которого вызывает лавинный процесс заедания. Представленный механизм заедания показывает, какую роль играют смазочный материал и легирующие присадки, способные повысить нагрузку схватывания.

На трёхстадийную модель заедания смазанных тяжело нагруженных трибосопряжений существенное влияние оказывают температура и качество смазочного материала. Многостадийность процесса заедания подтверждается исследованиями Г. В. Виноградова [16] и И. В. Крагельского [17], которые выявили два типа заедания – холодное и горячее. Б. И. Костецкий [18] рассматривает два типа схватывания – низкотемпературное (низкоэнергетическое) и высокотемпературное (высокоэнергетическое). В. Н. Кашеев [19] различает холодный задир, в котором ведущую роль играет твердость материала, и горячий, при котором скорость изнашивания практически не зависит от исходной твердости материала. Однако границы перехода одного вида задира в другой авторами работ не установлены.

Авторы [20] считают, что существуют четыре типа катастрофического изнашивания, из которых два можно отнести к низкоэнергетическому типу, а два – к высокоэнергетическому. Задир при низкоэнергетическом изнашивании реализуется при скорости деформирования меньше 0,4 м/с, при этом твердость ядра задира будет больше твердости поверхности. Схватывание при низкоэнергетическом изнашивании реализуется при тех же скоростях деформирования, но твердость ядра будет меньше твердости поверхности.

Высокоэнергетическое изнашивание реализуется при скоростях деформирования больше 0,7 м/с, причем заедание первого рода наступает при температуре меньше критической, а заедание второго рода – при температуре больше критической. Заедание первого рода характеризуется развитием аморфного формирования адгезионно сцепленных микронеровностей с последующим их перемешиванием и размазыванием по поверхности с большим коэффициентом перекрытия. Заедание второго рода – функциональным нагревом и размягчением материала одной из поверхностей и намазыванием его на другую, более холодную поверхность. Однако в рассмотренных работах отсутствуют критерии перехода одного вида заедания в другой.

Согласно представлениям В. И. Владимирова, В. В. Рыбина и др. [21; 22] уже при сравнительно небольших деформациях дислокационный механизм сменяется дисклинационным, основанным на ротации больших структурных элементов, присущих фрагментированным структурам, образующимся в поверхностных слоях при трении [23]. Перемещаясь через весь кристалл, дислокация двигает его части на один период кристаллической решетки параллельно самим себе. Размножаясь, дислокации препятствуют взаимному перемещению, вследствие чего происходит упрочнение на поверхности трения. При плотности дислокации 10^{11} – 10^{12} см⁻² их поля напряжений взаимодействуют между собой интенсивнее, чем с внешним полем, поэтому они собираются и перемещаются коллективно как единый ансамбль [20]. Если такой ансамбль содержит дислокации разных знаков, то его перемещение приводит к повороту кристалла, т. е. осуществляется ротационная мода деформирования. При скоростях деформации меньше 0,4 м/с – дислокационная мода (низкоэнергетическое изнашивание), а при скоростях больше 0,7 м/с – аморфная деформация (высокоэнергетическое изнашивание).

Значит, если твердость адгезионного зародыша превысит твердость обеих поверхностей трения, то изнашивание развивается по механизму задира. Если поверхности близки по твердости, то смазочный материал течет кругообразно вокруг адгезионного соединения и как результат в зоне контакта стягивается в упрочненное ядро – зародыш задира. Если твердость какой-либо деформации из поверхностей трения выше твердости адгезионного зародыша, то изнашивание развивается по механизму схватывания, которое идет за счет переноса и локального аккумулялирования порций мягкого материала на продольных твердых гребнях контрповерхности. Отдельные «островки» перенесенного металла объединяются в твердый выступ, который на поздней стадии наклепа пропахивает мягкую поверхность, оставляя на ней глубокую борозду.

Таким образом, задир характеризуется пластическим деформированием обеих поверхностей трения и отсутствием макроскопического адгезионного

переноса. При задирах твердость адгезионного ядра больше твердости поверхности трения, поэтому оно служит «затравкой» для двух механически сцепленных клиньев, поочередно скользящих и развивающихся каждый на той поверхности, из материала которой он формируется.

Схватывание характеризуется пластическим деформированием и формированием расширяющихся борозд только на одной поверхности и макроскопическим адгезионным переносом материала с более мягкой поверхности на более твердую. В отличие от задира образующийся при этом нарост формируется из материала сопряженной поверхности и прочно скреплен со скоплением металла в головке борозды.

Для предупреждения задира необходимо увеличить твердость одной из поверхностей выше некоторого предела, что переведет фрикционное сопряжение в зону схватывания и тем самым повысит критическое давление и снизит износ обеих поверхностей. При этом увеличение твердости поверхности трения с большим коэффициентом перекрытия (вала) выгоднее, чем с меньшим (колодки). Устранить заедание первого рода возможно только подбором смазочного материала, а заедание второго рода – повышением теплостойкости материалов пары трения.

Известно [24], что на участках фактического контакта поверхностей трения происходит циклический переход напряжений от одного знака к другому, в результате чего постепенно создаются условия усталостного разрушения. Впереди микровыступа перемещается волна сжатия, а вслед за ним – растяжение, что является особенностью усталостного изнашивания. Поэтому установление закономерностей и количественных характеристик фрикционной усталости – актуальная задача триботехники.

Методы оценки усталости материала при трении можно разделить на три группы [24]:

- 1) методы оценки характеристик фрикционной усталости без триботехнических испытаний;
- 2) триботехнические испытания на износ;
- 3) регистрация косвенных параметров при триботехнических испытаниях.

К первой группе методов относятся:

- метод оценки характеристик усталостного разрушения по испытаниям на объемную усталость [25; 26];
- метод [27], связывающий долговечность с прочностью флуктуации температуры;
- расчетные методы определения параметров фрикционной усталости, основанные на оценке напряжений при трении скольжения и прочностных материалов [28].

Методы второй группы при испытании на износ предусматривают использование машин трения, позволяющих определить число циклов фрикционного нагружения материала единичным индентором [29; 30] до появления частиц износа.

К третьей группе относятся методы определения характеристик фрикционной усталости на стандартных машинах трения с ускоренными испытаниями на износостойкость. Наиболее распространен метод оценки характеристик усталостного разрушения при трении с использованием измерения ширины рентгеновских дифракционных линий β [31; 32]. Авторами [32] установлено, что изменение ширины указанных линий, характеризующих зависимость плотности дислокаций в материале от числа проходов контртела по поверхности образцов, носит трехстадийный характер: упругопластическая стадия; пластически деструкционная; появление и распространение магистральной трещины. В качестве структурно-чувствительного параметра, контролирующего процесс усталости при трении скольжения, использовалось контактное электросопротивление [33–35]. Отмечено наличие корреляции между периодическими изменениями контактного электросопротивления с шириной дифракционной линии.

В исследовании [36] в качестве параметра, характеризующего усталостное разрушение, принята работа выхода электрона. Этот параметр обладает высокой чувствительностью к явлениям, сопровождающим процесс трения в зоне фрикционного контакта: пластическому деформированию, обновлению поверхности, адсорбции, окислению, фазовым переходам, перераспределению легирующих компонентов сплава [37–39]. Эффективность применения данного параметра доказана в работах [40–42].

В работе [43] рассмотрено влияние параметров трения на энергию активации трибохимического разложения смазочных материалов в зоне трения качения. Показано, что ресурс подшипника качения с одноразовой закладкой смазки связан не с усталостным изнашиванием, заеданием или износом, а со скоростью протекания реакций трибопревращений смазочного материала, которая значительно выше, чем износостойкость контактирующих поверхностей [44].

В результате испытания подшипников качения на продолжительность работоспособности смазочного материала в зависимости от температуры, нагрузки и скорости вращения с одноразовой закладкой смазки на пятишариковой машине трения установлено следующее:

- связь между предельной работоспособностью τ и объемной температурой узла трения T при постоянной нагрузке и скорости вращения описывается уравнением Аррениуса;

• при прочих равных условиях чем больше среднее контактное напряжение σ и скоростной фактор d_n , тем меньше продолжительность работоспособности смазочного материала.

Состав продуктов и основные закономерности трибопревращений смазочного материала в зоне трения изучались с использованием методов разделения и анализа [45; 46]. Установлено, что смолообразные продукты способны поддерживать работоспособность масел, а коксообразные резко ее снижают.

Энергия активации, вычисляемая по уравнению Аррениуса, включает в себя значение теплоты адсорбции и химического взаимодействия смазочного материала с материалами тел качения и дорожками качения:

$$\frac{1}{\tau} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1.10)$$

где $1/\tau$ – константа скорости химической реакции; A – const; E – суммарная энергия активации; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура;

При этом

$$A = \ln\left(\frac{1}{\tau}\right). \quad (1.11)$$

$$E = E_1 + a_1\sigma + a_2d_n, \quad (1.12)$$

где E_1 – константа, a_1 , a_2 – коэффициенты, характеризующие влияние контактного напряжения σ и скоростного фактора d_n на суммарную энергию активации E .

Чем больше величина суммарной энергии активации E для принятых условий испытания, тем более триботехнически стабильным будет смазочный материал. Константа E_1 отражает вклад в суммарную энергию активации срабатывания смазочного материала факторов, не связанных с параметрами трения: испарение, окисление, термический распад и растекание смазочного материала, характеризующее величиной поверхностного натяжения. Величины E и E_1 при испытании в вакууме снижаются по сравнению с испытаниями в атмосферном воздухе.

При граничной смазке металлический контакт трущихся тел предотвращается за счет образования на поверхностях трения граничных слоев различного происхождения. Они образуются в результате взаимодействия рабочих поверхностей, активированных процессом трения, с активными компонентами смазочного материала [47]. Способность смазочного материала образовывать прочные граничные слои достаточной толщины за короткое время (температурные вспышки) в значительной степени определяет долговечность тяжело нагруженных трибосопряжений, работающих постоянно или периодически в режиме граничной смазки [48]. Среди известных образований и разрушений граничных слоев важное место занимают кине-

тические модели, позволяющие описать взаимосвязь термодинамических и кинетических параметров процессов образования и разрушения граничных слоев в зависимости от параметров нагружения.

Кинетические модели граничной смазки можно условно подразделить на группы:

- 1) модели разрушения граничных слоев вследствие порчи смазочной среды своих активных элементов;
- 2) модели образования граничных слоев за время, предоставленное трибологическим процессом;
- 3) модели перехода к заеданию при превышении скорости разрушения граничных слоев над скоростью их образования;
- 4) модели изнашивания при граничной смазке [48].

И. Ленгмюром, В. Бюхе и Б. В. Дерягиным [49] установлено, что участвующий в трибологическом процессе смазочный материал постепенно стареет и не может в дальнейшем выполнять свои функции, поскольку его активные компоненты адсорбируются на продукты износа и уносятся вместе с ними из контакта либо взаимодействуют с металлической поверхностью вследствие триботехнических превращений под влиянием тепловой энергии, генерируемой в процессе трения, и каталитического воздействия свежей обнаженной поверхности металла (группа 1). В таких случаях противозадирные свойства смазочного материала не играют решающей роли в обеспечении работоспособности узла трения. В работе [50] предложен метод оценки кинетических характеристик этого процесса, учитывающий, что заедание имеет место в случае, когда скорость $V_{пр}$ превращений смазочного материала в продукты, не обладающие смазочной способностью, превышает скорость $V_{п}$ поступления смазочного материала в зону трения. Скорость разложения оценивается по закону Аррениуса

$$\lg V_{пр} = A - (E / 2,3RT), \quad (1.13)$$

где A – постоянная; T – абсолютная температура в контакте; E – энергия активации процесса трибологических испытаний; R – газовая постоянная.

Связь между $V_{пр}$ и скоростью относительного перемещения трущихся тел V_0 можно выразить уравнением [48]

$$V_{пр} = V_0 / L, \quad (1.14)$$

где L – длина герцовского контакта, графически оцениваемая параметром аппроксимации линейной зависимости $\ln(V_0/L)$ и $1/T$.

Таким образом можно определить энергию активации E процесса деградации смазочного материала как произведение тангенса угла наклона этой зависимости на величину газовой постоянной R .

Модели образования граничных слоев за время, предоставленное трибологическим процессом (группа 2), достаточно упрощенные и предна-

значены не столько для описания трибологического процесса, сколько для оценки кинетической характеристики процесса, используемой с целью оптимизации либо состава смазочного материала, либо микрогеометрии трибологического контакта.

В работе [50] выведено кинетическое уравнение для расчета энергии активации процесса образования модифицированного слоя на основе сравнения времени, необходимого для достижения модифицированным слоем в трибологическом контакте толщины, достаточной для эффективного снижения коэффициента трения и замены интенсивного адгезионного изнашивания более мягким коррозионно-механическим, и времени между последовательными контактами микронеровностей, за которое возможен рост этого слоя. Модель позволяет оценить температуру начала эффективного действия химически активных присадок и предельную температуру, при которой граничная смазка полностью теряет эффективность. В этой связи необходимо отметить, что испытания смазочных материалов при низких температурах могут исказить их действительные противозносные свойства в условиях граничной смазки.

Модели перехода к заеданию (группа 3) при превышении скорости разрушения граничных слоев над скоростью их образования можно разделить на две подгруппы. К первой относятся модели, основанные на представлении о том, что разрушения граничного слоя достаточно для реализации заедания узла трения, ко второй – модели, при применении которых для реализации заедания сопряжения необходимо достижение критического цикла адгезионных связей между контактирующими поверхностями на участках металлического контакта, образовавшихся вследствие разрушения граничного слоя, причем рост числа связей рассматривается как кинетический процесс.

Модели третьей группы можно классифицировать по происхождению граничного слоя, разрушение которого является одним из необходимых этапов для реализации заедания. Процессы разрушения граничного слоя происходят вследствие конкуренции адсорбции и десорбции молекул поверхностно-активных веществ. Разрушения модифицированного слоя рассматриваются как кинетические, а их скорости обуславливаются химической кинетикой. Заедание трибосопряжения возникает при температуре, когда скорость разрушения модифицированных слоев превышает скорость их образования. Температура вызывает термическое разложение модифицированных слоев, скорость их разложения описывается уравнением Аррениуса.

Кинетические модели изнашивания при граничной смазке (группа 4) достаточно изучены. Поскольку первичным этапом образования граничных слоев будет адсорбция активных компонентов смазочного материала на поверхностях трения, то можно ожидать, что при невысоких нагрузках

и контактных температурах будут эффективны модели изнашивания, основанные на адсорбционных представлениях.

Кинетическая модель Б. И. Костецкого [18] включает три стадии: 1 – адсорбция молекул реагента на поверхностях трения; 2 – взаимодействие этих молекул с поверхностным слоем металла и образованием модифицированного слоя; 3 – разрушение этого слоя с обнажением поверхности активированного металла, готового к дальнейшему взаимодействию со средой. Исходя из этого было предложено уравнение для оценки интенсивности (I) механического изнашивания при граничной смазке

$$I = 2h_{\mu} \gamma k^p \sqrt{\frac{(sh_{\mu} / \Gamma h_{\text{ад}}) k_1^A}{k_2^D + k^M}}, \quad (1.15)$$

где h_{μ} – толщина модифицированного слоя; γ – удельная масса вторичных структур; k^p , k_1^A , k_2^D , k^M – контакты скорости разрушения, адсорбции, десорбции и модификации соответственно; S – площадь пятна контакта; Γ – адсорбция; $h_{\text{ад}}$ – толщина адсорбционного слоя.

Однако применение данного уравнения на практике затруднительно из-за отсутствия значений констант.

На долговечность узлов трансмиссий существенно влияют органические отложения. Известно [51], что при трении в режиме граничной смазки на поверхностях формируются слой физически адсорбированных молекул смазочного материала, относительно слабо связанных с поверхностью (A -слой); хемосорбционный слой, прочно связанный с поверхностью органических отложений, образуемый преимущественно продуктами окисления и деструкции смазочного материала (D -слой), а также химически модифицированный слой на базовом металле при прямых химических реакциях металла с молекулами присадок (M -слой).

Большое количество работ посвящено изучению состава, структуры и толщины A - и M -слоев и в значительно меньшей степени изучены свойства D -слоев. Их формирование зафиксировано для многих типов контактных пар трения при различных условиях эксплуатации, включая трение основных и благородных металлов в условиях как повышенных, так и невысоких температур [52]; фреттинг в условиях без существенного повышения температур [53]; контакт смазочного материала с горячей поверхностью металла. При динамическом контакте определение вклада D -слоя в уровень регистрируемых фрикционных характеристик, как и вообще его обнаружение, затруднено. Для изучения свойств D -слоев используются методы электрофизического зондирования [54]. Модельные эксперименты доказали, что как химически активные присадки минерального масла, так и его инертные компоненты могут формировать D -слои при контакте с умеренно

нагретой (≈ 220 °C) поверхностью стали. При комнатной температуре *D*-слои повышают несущую способность контакта при нормальном нагружении, а их антифрикционные свойства и износостойкость при трении скольжения зависят от природы смазочного материала и условий формирования этих слоев. Однако механизм образования *D*-слоев изучен недостаточно. Анализ полученных данных показывает, что при режимах эксплуатации узла трения, когда химически модифицированные слои на поверхностях трения за счет прямых реакций с присадками не образуются, формирование *D*-слоев может оказать определенное влияние на фрикционное поведение контакта.

Образование защитных слоев, вторичных структур, выход дислокаций на поверхность – все эти процессы выступают элементами самоорганизации трибосистемы, в которой участвуют пара материалов трения и смазочный материал. Поэтому трение есть классический пример неравновесного процесса, который можно рассматривать с позиции теории самоорганизации необратимых процессов [55]. Из кажущейся хаотичности процессов, происходящих при трении, выделяются те, которые всегда имеют место. Это, во-первых, изнашивание, во-вторых, образование вторичных структур.

Стабилизация параметров трения и снижения износа сопровождаются образованием и стабилизацией состава вторичных структур, которые осуществляют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействия внутри твердых тел и препятствуя их непосредственному взаимодействию. Трибосистема стремится сосредоточить все виды взаимодействия в тонких поверхностных слоях. Согласно данным Б. И. Костецкого [56], от 90 до 98 % энергии трения аккумулируется во вторичных структурах, поэтому они служат зоной преимущественного рассеивания энергии.

При трении внешние воздействия не позволяют трибосистеме достичь состояния равновесия, поэтому с помощью уравнений равновесий термодинамики затруднительно описать процессы, протекающие при трении. Управляющие параметры характеризуются тем, что при превышении ими некоторого критического значения в системе происходят процессы самоорганизации. В трибосистеме таким управляющим параметром будет скорость скольжения, которая приводит к неравновесной ситуации за счет подвода энергии. Если при трении вторичные структуры не образуются, то энергия распределяется по телу согласно монотонно убывающей функции и в зависимости от расстояния до зоны трения.

В процессе трения к телу может подводиться такое количество энергии, которое не успевает диссипироваться по всему трущемуся телу (тепло- и электропроводность, диффузия и др.). Это может привести либо к катастрофическому износу при схватывании, либо к появлению и образованию

вторичных структур около поверхности трения, с образованием которых в трущемся теле происходит перераспределение энергии. Следовательно, процесс образования вторичных структур, приводящий обычно к снижению коэффициента трения и, значит, к интенсивности изнашивания, соответствует процессам самоорганизации и образования диссипативных структур. Вторичные структуры – это устойчивые защитные образования на трущихся поверхностях, состав которых определяется составом трущихся материалов. Таким образом, защитные функции трибосистемы определяют ее способность к адаптации к внешним взаимодействиям. Сущность структурной приспособляемости заключается в том, что при ее реализации все взаимодействия трущихся тел и среды локализуются в тонких слоях вторичных структур трения, образующихся на исходных материалах вследствие их структурной перестройки и взаимодействия со средой [57].

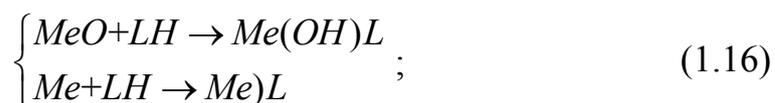
Вторым характерным для любых процессов трения можно считать явление поверхностного разрушения. При трении материал не разрушается, а трансформируется в некие структуры, осуществляющие защитные функции. Л. И. Бершадский [47] показал, что минимальная интенсивность изнашивания соответствует области минимального производства энтропии трибосистемы. Необходимо отметить, что трибохимические реакции отличаются от термоактивируемых способом подвода энергии к реагентам. Механоактивация в условиях функционального взаимодействия происходит за счет широкого спектра физических и физико-химических явлений, порождаемых трением и объединенных понятием «трибоплазма» [58] – особо высоковозбужденного состояния вещества, время существования которого в зонах физического контакта твердых тел составляет $\approx 10^{-7}$ с. В ходе трибохимических реакций при граничном трении могут преодолеваются значительно более высокие, чем у термоактивируемых реакций, энергетические уровни. Длительность переходных состояний у термоактивируемых реакций составляет 10^{-11} – 10^{-13} с, а длительность трибоплазмы – 10^{-7} с в зонах фрикционного контакта. Поскольку процесс трения сопровождается непрерывным образованием и разрывом адгезионных связей, то взаимодействие твердых тел с адсорбированными на их поверхностях молекулами смазочного материала в условиях граничного трения приводит к инверсной обратимости по сравнению с термоактивированными реакциями и обуславливает их хаотическое распределение по поверхности фрикционного контакта.

Свойства трибосистемы, работающей в условиях граничного трения, определяются в первую очередь теми продуктами, которые идентифицируются на поверхности трущихся тел после трения различными физическими методами, а непрерывно генерируемым и постоянно существующим

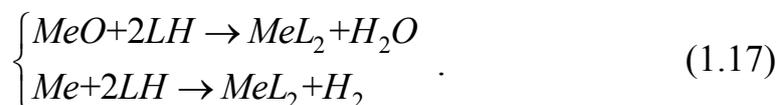
в трибосистеме в возбужденном состоянии является вещество, реализующееся только в условиях фрикционного взаимодействия. Таким образом, процесс граничного трения сопровождается непрерывной механической «подкачкой» возбужденных состояний в трибосистеме.

Поскольку количество накапливающейся в системе энергии конечно, то необходим стационарный (или периодический) сброс избыточной энергии с верхних уровней на нижележащие, а так как процесс трения необратим и система не может вернуться в исходное состояние, то существуют промежуточные энергетические уровни. Поэтому в простейшем случае, при неизменных внешних условиях функционирования, трибосистема – это как минимум система трехуровневого типа, что напоминает принцип работы лазера. В трибосистемах с граничным трением особую роль играет трибокоординация – образование координационных соединений на поверхности трущихся тел и в объеме смазочного материала, протекающие по следующим общим схемам:

реакции на поверхности трения



реакции в смазочном материале



Здесь MeO и Me – оксидные или металлические поверхностные слои трущихся тел или частицы износа; LH – свободный лиганд, специально введенный в состав смазочного материала или образующийся в нем в процессе трения за счет трибодеструкции и (или) трибоокисления основы смазочного материала; $Me(OH)L$, MeL – поверхностные соединения лиганда с оксидом металла или металлом; MeL_2 – координационные соединения металлов трущейся пары в объеме смазочного материала.

Поскольку эволюция трибосистемы сопровождается переходом из одного стационарного состояния в другое, то с учетом трибокоординации первоначальный сброс избыточной энергии трибосистемы на ее промежуточные энергетические уровни с участием лигандов LH протекает согласно реакции обмена лигандов объема смазочного материала с лигандами поверхностных комплексов по следующей схеме:



В этой реакции механически возбужденный поверхностный комплекс $Me(OH)L^*$ обменивается лигандом $L'H$ из смазочного материала,

а уходящий в объем смазочного материала возбужденный лиганд LH^* уносит с собой избыточную энергию, диссипирует ее по тепловому или излучательному каналам в поверхность или объем смазочного материала, т. е. лиганд – своеобразный молекулярный энергетический контейнер. Помимо химической дезактивации должны реализовываться другие механизмы диссипации избыточной энергии, например сброс за счет накопления структурных дефектов в контактирующих твердых телах. При экспериментальных исследованиях стали 45 изменение электрического сопротивления фрикционного контакта однозначно коррелирует с изменением силы трения. Структура и свойства граничного слоя в процессе трения не остаются неизменными: в местах фактического контакта они другие по сравнению с остальной поверхностью. В момент перехода от одного стационарного состояния в другое толщина граничной пленки и ее энергонапряженность меняется скачкообразно. Каждое стационарное состояние в процессе самоорганизации реализуется в строго определенных условиях трения и не наблюдается при выходе за границы этих условий.

1.5. Методы контроля эксплуатационных свойств трансмиссионных масел

Для решения задач контроля эксплуатационных свойств трансмиссионных масел и определения предельного состояния в процессе эксплуатации техники необходимо разработать мероприятия по созданию на предприятиях специальных групп диагностики смазочных масел, обеспечению их средствами контроля. Задачи групп диагностики – это текущее планирование отбора проб масел, проведение анализа товарных и работающих масел и определение сроков замены. Основное требование к средствам контроля заключается в возможности анализа малых объемов проб масел.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствует контроль товарных масел на предприятиях, поэтому эксплуатационники пользуются данными классификации масел, предусматривающей их разделение на классы вязкости, определяющие климатические условия применения, и группы по уровню эксплуатационных свойств, указывающие применение масел по степени нагруженности агрегатов трансмиссий. Такая информация для проектировщиков трансмиссий не всегда объективно отражает качество трансмиссионных масел, так как не содержит данных по температурной области работоспособности, ресурсу, скорости окисления, возможности формировать на поверхностях трения защитных граничных слоев,

увеличивающих нагрузку схватывания. Поэтому для выбора трансмиссионных масел их испытывают на машинах трения, стендах или агрегатах трансмиссий.

При эксплуатации трансмиссий масла окисляются вследствие интенсивного перемешивания. Окислительные процессы более активно протекают на поверхностях трения из-за высоких температур, кроме того, давление в контакте подвергает их температурной деструкции. Образующиеся в этих условиях низкомолекулярные кислоты способны улучшать противоизносные свойства за счет образования хемосорбционных слоев на поверхностях трения, представляющих собой химические соединения металлов с продуктами окисления и легирующими присадками [59–63].

Качество работающих трансмиссионных масел определяется концентрацией противоизносных, противозадирных и других присадок, содержащихся в маслах, а наличие эксплуатационных примесей является основанием для разработки методов, направленных на оценку отработанного ресурса. Данные методы можно подразделить на количественные и качественные.

Количественные методы определяют массу твердых загрязнений в масле и регламентируются стандартами (ГОСТ 6370–83 и ГОСТ 12275–66). При большой концентрации твердых частиц используют объемные методы оценки (стандарт США ASTM D 2272, нормаль H8016–60) с применением центрифугирования, однако точность их невысока.

Гранулометрический состав загрязнения масел определяется седиментационными и микроскопическими методами [64]. Широкое применение находят оптические методы седиментационного анализа, основанные на фотоколориметрическом способе измерения количества оседающих частиц: их используют при контроле технологических процессов производства масел, а также определении размеров частиц износа, присутствующих в масле [65; 66]. Электрооптический метод позволяет установить дисперсный состав частиц износа [67; 68] при создании статического электрического поля, а затем при его снятии.

Микроскопические и ультразвуковые методы определения гранулометрического состава загрязнений масел основаны на подсчете количества частиц износа и измерении скорости распространения ультразвука.

Стандартные методы контроля качества смазочного материала включают определение кислотного числа (ГОСТ 11362–96, ИСО 6619–88), щелочного числа (ГОСТ 113 62–96, ИСО 6619–88), кинематической вязкости (ГОСТ 33–2000, ИСО 3104–94) и температуры вспышки (ГОСТ 4333–87). Для более глубокого анализа рабочих свойств масел используют широкий спектр лабораторных методов – от электрохимического анализа продуктов гидролиза до масс спектроскопии структуры углеводородов [69].

Количественный анализ позволяет определить химический состав масла, содержание нерастворимых компонентов и концентрацию присадок. Однако лабораторные методы, хотя и обладают высокой информативностью, чувствительностью и точностью, требуют значительных затрат времени, поэтому не оперативны. Значит, для оптимизации контроля состояния масел, своевременной их замены и обеспечения надежной работы трансмиссий необходимо использовать методы непрерывного или периодического контроля, характеризующиеся низкой стоимостью и достаточной достоверностью анализа.

Авторы [69] рекомендуют следующие показатели качества масел для оперативного контроля: кинематическая вязкость, диэлектрическая проницаемость, проводимость, коррозионная активность, кислотное и щелочное числа, спектральное поглощение, оптическая плотность и флуоресценция. Они позволяют определить степень окисления, загрязнения масла, отсутствие или наличие присадок и воды.

Основное влияние на снижение ресурса смазочных масел, в том числе трансмиссионных, оказывает вода, обнаружение которой будет одним из сигналов потенциально возможного катастрофического износа оборудования. Она попадает в масляную систему вследствие конденсации влаги из воздуха, проникающего через уплотнения. В зоне трения вода вытесняет масло и нарушает режим смазки, вступает в химические реакции с рядом присадок и стимулирует химическую коррозию поверхностей.

Вода может присутствовать в масле в состояниях [70–72]:

- 1) растворённом – молекулы воды связаны посредством водородных связей с углеводородными молекулами масла, присадок и продуктами окисления;
- 2) эмульсионном – пересыщенный раствор, в котором вода не полностью отделена от масла, при этом масло становится мутным;
- 3) свободном – перенасыщенный раствор, в котором вода содержится в каплях и отделяется от масла.

Растворимость воды возрастает при увеличении отработанного ресурса [73]. Чистые минеральные масла насыщаются водой при ее концентрации 0,0001 масс %, трансформаторные – при 0,0001–0,0003 масс %, гидравлические жидкости – при 0,01–0,10 масс %, промышленные – при содержании воды 0,06–0,50 масс %, а автомобильные масла – при концентрации воды 1–5 масс % [73]. Растворимость воды в масле экспоненциально увеличивается с ростом температуры [72].

Лабораторный метод определения содержания концентрации воды – это инфракрасная Фурье-спектроскопия [74], основанная на поглощении молекулами воды (гидроксильная группа) определенного спектра длин волн. Фотоакустическая спектроскопия [75] позволяет обнаруживать низкие

концентрации воды в трансмиссионных маслах (0,0045 масс %), гидравлических (0,006 масс %) и синтетических моторных маслах (0,0515 масс %). Метод К. Фишера (метод титриметрии) [76] основан на реакции специального реагента с водой в присутствии метилового спирта; при этом оценивается концентрация воды выше 0,03 масс %.

Проще в реализации стандартный метод определения содержания растворенной воды с использованием реакций взаимодействия пробы масла с гидридом кальция [77]. Весовое количество продукта реакции, например, образующихся кислоты и газа, пропорционально весовому содержанию воды в пробе [78].

Работоспособность трансмиссионных масел оценивают по предельным значениям групп единичных показателей качества, в число которых входит вязкость. Она зависит от степени загрязнения масла нерастворимыми продуктами и от его диспергирующе-стабилизирующих свойств.

Для оценки концентрации противоизносных и противозадирных присадок применяют водородный показатель РН, служащий индикатором появления кислот, наличие которых не допускается из-за активации коррозионного изнашивания.

Состояние узлов трения можно диагностировать на основе анализа частиц износа и свойств смазочной среды. Параметры частиц износа отражают природу и степень износа трущихся поверхностей, а их размер и концентрация будут надежным индикатором состояния агрегата или машины в целом. Концентрация частиц износа в пробе масла и распределение их по размерам характеризуют скорость изнашивания и степень износа [79; 80].

Вид изнашивания по параметрам частиц износа принят в классификации по международному «Атласу частиц износа» [81]. Здесь параметры частиц связаны с их происхождением, на основе которого разработаны методы контроля качества смазочных масел. Так, при адгезионном изнашивании образуются чешуйчатые частицы размером до 15 мкм и толщиной 0,25–1,0 мкм. При усталостном изнашивании, характерном для зубчатых передач и подшипников качения, частицы износа приобретают сферическую форму размером более 3 мкм. Механизм образования таких частиц многие авторы связывают с попаданием в зону контакта крупных частиц износа, которые выкрашиваются при развитии усталостных микротрещин. Возникающее при этом высокое давление вызывает локальную вспышку температур, расплавляющих частицы, и формирует их в виде сферы [82–84].

Методы диагностики состояния механизмов, основанные на анализе частиц износа, включают два класса: внешнего анализа (переносные устройства) и методы, предусматривающие использование диагностических

средств, встроенных в масляную систему (бортовые). Характеристики этих методов и их возможности представлены в табл. 1.3 [85].

Таблица 1.3

Методы диагностики смазочных материалов [85]

Метод анализа	Параметр оценки загрязненности					Непрерывность контроля	Использование экспресс-приборов
	Состав частиц	Концентрация частиц	Фракционный состав	Морфология	Общая загрязненность среды		
Эмиссионная спектрофотометрия	+	+	–	–	–	–	–
Атомно-адсорбционная спектрометрия	+	+		–	–	–	–
Атомно-флуоресцентная спектрометрия	+	+	–	–	–	–	–
ИК-спектроскопия	–	–	–	–	+	–	–
Адсорбционная спектрофотометрия	–	+	–	–	+	–	+
Прямое фотометрирование		–	–	–	+	–	+
Электролитический метод	–	+	+	–	–	–	–
Микроскопия	–	+	+	+	–	–	–
Светорассеивание	–	+	–	–	–	–	–
Проточная ультрамикроскопия	–	+	+	–	–	+	–
Феррография	–	+	+	–	–	+	+
Магнитометрия	–	+	–	–	–	–	+
Метод ядерного магнитного резонанса	–	+	–	–	–	–	–
Нейтронно-активационный анализ	–	+	–	–	–	–	–
Акустический анализ	–	+	+	–	–	+	–
Седиментометрия	–	+	+	–	–	–	–
Полярография	+	+	–	–	–	–	–

Физические и физико-химические методы контроля частиц износа требуют дорогостоящего оборудования и высококвалифицированных специалистов, поэтому они не нашли широкого применения на эксплуатационных предприятиях, которые рассматривают наработку механизма как основной показатель ресурса масел различного назначения, установленный заводом-изготовителем техники. В этой связи очевидна необходимость разработки простых и доступных по стоимости приборов и методов контроля как товарных, так и работающих трансмиссионных масел и масел другого назначения. Качество товарных и работающих масел определяется по коэффициенту поглощения светового потока; концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения (окисления); кинематической вязкости; испаряемости; концентрации в масле воды и ферромагнитных примесей; противоизносным свойствам и сопротивлению окислению.

1.6. Анализ современных методов контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел

Температура – это весомый фактор, определяющий ресурс смазочного материала, а значит, и надежность трибосистемы, которая определяет интенсивность химических реакций, термоокислительную стабильность; температурную стойкость вызывают изменение вязкости, кислотного и щелочного числа, накопление продуктов старения. Поэтому термоокислительной стабильности как показателю эксплуатационных свойств уделяется особое внимание, однако окислительные процессы представляют собой сложный механизм, который изучен недостаточно.

Термоокислительные процессы в базовом масле и в маслах с присадками служат причиной его старения и представляют собой комплекс сложных многостадийных реакций углеводородов с кислородом воздуха, растворенного в жидкости и находящегося в молекулах взаимодействующих веществ, а также продуктов этого процесса с металлическими поверхностями. Процесс окисления включает следующие стадии [86–91]: инициирование молекул тепловой энергией, что может приводить к диссоциации и разрыву химических связей с образованием радикалов (части молекул, имеющих на конце неспаренный электрон); взаимодействие активированных фрагментов молекул один с другим и другими молекулами в виде цепной реакции автоокисления с образованием радикалов перекисей RO_2 и гидрперекисей $ROOH$.

Определение термоокислительной стабильности некоторых видов масел регламентируется ГОСТ 13300–67 [92], устанавливающим метод определения их коррозионных свойств и окисляемости. Метод позволяет установить испаряемость масла, оцениваемую по разности количества масла до и после испытания и выражаемую в процентах.

Окисляемость масел определяют после двух часов испытания по количеству нерастворимого в петролейном эфире осадка. Для этого 5–10 г отработанного масла растворяют в 10–30-кратном количестве петролейного эфира, раствор выдерживают в темном месте не более 10–12 ч и затем фильтруют через бумажный фильтр «синяя лента». После перенесения всего осадка на фильтр его промывают раствором до тех пор, пока фильтр не станет бесцветным. По окончании промывки фильтр с осадком переносят в бюкс и доводят до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 150 °С.

Содержание образовавшегося осадка (X_1) в процентах вычисляют по формуле

$$X_1 = \frac{m_1 - m_2}{m} 100 \%, \quad (1.19)$$

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

ГОСТ 11063–7 [93] предусматривает окисление масла при 200 °С в приборе ДК–НАМИ в течение времени, указанного в нормативной документации, с последующим определением осадка в окисленном масле и относительного изменения его вязкости. Прирост вязкости масла при 50 и 100 °С в результате окисления вычисляют по формуле

$$\Delta V = \frac{V - V_0}{V_0} 100 \%, \quad (1.20)$$

где V – кинематическая вязкость окисленного масла, мм²/с; V_0 – кинематическая вязкость товарного масла, мм²/с.

Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [94] предусматривает их нагревание в присутствии воздуха, перемешивание и установление параметров оценки процесса окисления по таким показателям, как скорость образования растворимых и нерастворимых продуктов окисления и температура начала окисления.

Прибор для оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов [95] предназначен для определения термоокислительной стабильности, температурной области работоспособности, скорости окисления и коррозионной активности в зависимости от времени и температуры испытания.

Способ [96] определения термоокислительной стабильности смазочных материалов включает нагревание смазочного масла в присутствии воздуха, перемешивание, фотометрирование и установление параметров оценки процесса окисления по времени образования нерастворимых продуктов и ресурса работоспособности исследуемого масла по предельному значению коэффициента поглощения светового потока. Способ [97] определения работоспособности смазочных масел предназначен для выявления отработанного ресурса по таким показателям, как вязкость, коэффициент поглощения светового потока до и после центрифугирования окисленного масла. Способ [98] определения термоокислительной стабильности смазочных материалов предусматривает использование комплексного показателя термоокислительной стабильности, учитывающего изменение вязкости и коэффициента поглощения светового потока при фотометрировании исследуемого масла, а также скорости образования растворимых и нерастворимых продуктов окисления. В работе [99] термоокислительная стабильность определяется по критической температуре работоспособности, температуре начала окисления и температуре начала испарения. Данный

способ более информативный и позволяет идентифицировать масла по группам эксплуатационных свойств.

Комплексная оценка термоокислительной стабильности смазочных масел может осуществляться в приборе [100], включающем узел предварительного окисления масла в объеме и узел окисления в тонком слое.

ГОСТ 18136–72 [101; 102] предусматривает определение термоокислительной стабильности смазочных масел по таким показателям, как кислотное число, число омыления, вязкость, коксуемость, содержание смол и нерастворимого осадка, тангенс угла диэлектрических потерь, удельное электрическое сопротивление, цвет и масса катализатора, внешний вид, цвет и масса конденсата.

Широкое применение находит фотометрический метод контроля термоокислительной стабильности смазочных масел различного назначения, позволяющий исследовать как товарные, так и работающие масла. Способ [103] предусматривает термостатирование масел в температурном интервале с повышением и понижением температуры, определение коэффициента поглощения светового потока, испаряемости, скорости окисления и ее приращение, а термоокислительную стабильность определяют по количеству циклов колебаний приращения скорости окисления до установленного значения коэффициента поглощения светового потока и предельной температуре работоспособности, при которой приращения скорости окисления и испарения равны нулю.

Способ [104] определения термоокислительной стабильности предусматривает термостатирование масел минимум при трех температурах ниже критической. При этом относительную вязкость находят как отношение вязкости окисленного масла к вязкости товарного, а термоокислительную стабильность определяют по показателю отношения коэффициента поглощения светового потока к относительной вязкости, устанавливающему однородность состава продуктов окисления и температурную область работоспособности исследуемого масла.

Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [105] заключается в том, что пробу смазочного материала термостатируют в присутствии кислорода воздуха и через равные промежутки времени взвешивают, определяют массу испарившегося масла, коэффициент испарения K_G из соотношения $K_G = m / M$, где m – масса испарившегося масла при окислении; M – масса пробы после окисления; $E_{\text{п}}$ – коэффициент энергии превращения в продукты окисления

$$E_{\text{п}} = K_{\text{п}} + K_G, \quad (1.21)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент поглощения светового потока; K_G – коэффициент испарения. Затем строят графическую зависимость $E_{\text{п}} = f(K_{\text{п}})$, продлевают

линию зависимости до пересечения с осью ординат и по ординате этой точки находят величину энергии начала превращения тепловой энергии в продукты окисления, а термоокислительную стабильность определяют по коэффициенту сопротивления окислению K_{co} из выражения

$$K_{co} = (E_{п} - A) / K, \quad (1.22)$$

где A – коэффициент, характеризующий начало превращения тепловой энергии. Данный способ позволяет по коэффициенту сопротивления окислению сравнивать различные масла, имеющие одну группу эксплуатационных свойств.

Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [106] включает нагревание масла в присутствии воздуха, перемешивание, испытание без катализатора и с катализатором при циклическом изменении температуры испытания в зависимости от температуры начала окисления до предельной температуры, а затем понижение температуры от предельной до температуры начала окисления в течение постоянного времени. Причем после каждой температуры испытания с катализатором и без катализатора пробы взвешивают, определяют массу испарившегося масла и коэффициент испаряемости как отношение пробы после окисления, фотометрированием находят коэффициент поглощения светового потока без катализатора и с катализатором, устанавливают коэффициент термоокислительной стабильности как сумму коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости, затем находят коэффициент каталитического влияния катализатора $K_{вк}$ на окислительные процессы по формуле

$$K_{вк} = K_{к} / K, \quad (1.23)$$

где $K_{к}$ и K – коэффициенты термоокислительной стабильности проб окисленного масла с катализатором и без катализатора соответственно. А термоокислительную стабильность смазочных масел определяют по значениям коэффициента влияния катализатора на процессы окисления. Данный метод позволяет определять влияние конструкционных материалов на процессы окисления и учитывать эти данные при установлении ресурса смазочных масел.

При способе определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [107] находят коэффициент поглощения светового потока, а термоокислительную стабильность определяют по температуре термостатирования с наименьшим коэффициентом поглощения светового потока.

Важное значение при окислении трансмиссионных масел имеет установление влияния продуктов окисления на их противоизносные свойства. Известен способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов [108], предусматривающий разделение проб окисленного масла на две части: первую фотометрируют, определяют коэффициент по-

глощения светового потока, а вторую испытывают на трехшариковой машине трения со схемой «шар – цилиндр» не менее двух часов. Затем измеряют среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах, строят графическую зависимость размера пятна износа от коэффициента поглощения светового потока, по которой определяют влияние продуктов окисления на противоизносные свойства испытуемого смазочного материала.

Способ определения качества смазочных масел [109] позволяет установить влияние сталей на процессы окисления и противоизносные свойства масел, окисленных со сталью. С этой целью предложен коэффициент $K_{в.с}$ влияния стали на процессы окисления и триботехнические характеристики масел, устанавливаемый по формуле

$$K_{в.с} = (V_{п} - V_{п.с})/V_{п} 100 \%, \quad (1.24)$$

где $V_{п}$ и $V_{п.с}$ – соответственно скорости изменения коэффициента противоизносных свойств масел, испытанных без стали и со сталью.

Коэффициент противоизносных свойств Π (мм^{-1}) определяется как частное

$$\Pi = K_{п}/U, \quad (1.25)$$

где $K_{п}$ – коэффициент поглощения светового потока; U – параметр износа при триботехнических испытаниях окисленного масла.

Способ определения качества смазочных масел [110] позволяет установить влияние продуктов окисления на противоизносные свойства окисленных масел, при этом вводится коэффициент противоизносных свойств, рассчитываемый по формуле (1.26). По тангенсу угла наклона графической зависимости коэффициента противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока к оси абсцисс определяют качество окисленных масел: чем больше тангенс угла наклона, тем выше противоизносные свойства испытанных масел.

Способ расчета работоспособности смазочных масел [111] заключается в том, что отбирают пробу работавшего масла, делят её на три части. Первую часть пробы используют для определения вязкости, вторую подвергают центрифугированию с последующим фотометрированием и находят коэффициент поглощения светового потока от центрифугированной пробы масла, третью испытывают на термоокислительную стабильность не более двух часов при температуре, соответствующей температуре базовой основы смазочного масла. Затем рассчитывают коэффициент поглощения светового потока и вязкость окисленной пробы, а работоспособность используемого смазочного масла Π_p определяют из выражения

$$\Pi_p = (K_{по} - K_{пц})\eta_o / \eta, \quad (1.26)$$

где $K_{\text{по}}$ – коэффициент поглощения светового потока пробы окисленного масла; $K_{\text{пц}}$ – коэффициент поглощения светового потока пробы работавшего масла после центрифугирования; η_0 и η – соответственно вязкость окисленной и исходной проб работавшего масла.

Применение данного способа позволяет устанавливать качество товарного масла, периодически осуществлять контроль за его состоянием в процессе применения и хранения и рассчитывать остаточный ресурс работы масла, сравнив с предельным значением коэффициента работоспособности.

Применение фотометрического метода контроля термоокислительной стабильности апробировано для различных трансмиссионных масел [112–117].

2

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РЕСУРС МОТОРНЫХ МАСЕЛ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ

2.1. Факторы, влияющие на ресурс моторных масел

Реализация технико-экономического потенциала автомобиля, заложенного в двигателе и трансмиссии, возможна только при использовании смазочного материала, полностью соответствующего по эксплуатационным свойствам их конструкционным особенностям и условиям работы.

Выбор оптимального смазочного материала в условиях современного рынка осложняется наличием нескольких систем классификации и маркировки (API, ACEA, CCMC, ILSAC, SAE, ГОСТ). Затруднения возникают также и в результате применения разнообразной терминологии при описании состава и свойств смазочных материалов.

Моторное масло в двигателе служит для снижения температуры, трения и износа трущихся деталей двигателя за счёт создания на их поверхностях прочной масляной плёнки. Одновременно моторные масла должны обеспечить:

- уплотнение зазоров в сопряжениях работающего двигателя;
- эффективный отвод тепла от трущихся деталей, удаление из зон трения продуктов износа;
- надёжную защиту рабочих поверхностей деталей двигателя от коррозионного воздействия продуктов окисления масла и сгорания топлива;
- предотвращение образования всех видов отложений (нагары, лаки, зольные отложения, шламы) на деталях двигателя при его работе на различных режимах;
- сохранение первоначальных свойств как в многообразных условиях применения, так и при длительном хранении;
- малый расход масла при работе двигателя;
- большой срок службы масла до замены без ущерба для надёжности двигателя.

Выполнение указанных функций моторными маслами возможно только в том случае, если их качество будет удовлетворять перечисленным эксплуатационным требованиям. Это:

- высокая моющая, диспергирующе-стабилизирующая способность по отношению к различным нерастворимым загрязнениям, обеспечивающая чистоту деталей двигателя;
- высокая термическая и термоокислительная стабильность, что позволяет повысить предельную температуру нагрева масла в картере и увеличить срок замены;
- достаточные противоизносные свойства, обеспечиваемые прочностью масляной пленки, нужной вязкостью при высокой температуре и высоким градиенте скорости сдвига, способностью химически модифицировать поверхность металла при граничном трении, нейтрализовать кислоты, образующиеся при окислении масла и продуктов сгорания топлива;
- надёжная защита трущихся поверхностей и других металлических деталей от коррозионного воздействия как во время работы, так и при хранении автомобилей;
- стойкость к старению, способность противостоять внешним воздействиям с минимальным ухудшением свойств;
- пологость вязкостно-температурной характеристики, обеспечение холодного пуска, прокачиваемости при нем и надежного смазывания в экстремальных условиях при высоких нагрузках и температуре окружающей среды;
- высокая стабильность при транспортировании и хранении в регламентированных условиях;
- малая испаряемость, низкий расход на угар.

Особые дополнительные требования предъявляют к некоторым маслам. Масла, загущенные макрополимерными присадками, должны обладать требуемой стойкостью к механической и термической деструкции; для судовых дизельных масел особенно важна влагостойкость присадок и малая эмульгируемость с водой; для энергосберегающих – антифрикционность, благоприятные реологические свойства.

Эксплуатация транспортных средств, машин и механизмов неизбежно связана с изменениями качественных и количественных показателей применяемых в них масел. Заложенный в процессе производства потенциальный ресурс смазочных материалов расходуется в процессе эксплуатации. Интенсивность этого процесса связана с эксплуатационными факторами и степенью их влияния на процесс старения масел.

Ресурс смазочных материалов определяется качественными показателями товарных масел; техническим состоянием механических систем, в которых оно применяется; нагрузочными и скоростными режимами работы; температурными режимами; степенью воздействия окружающей среды на процесс эксплуатации техники и производительностью системы фильтрации. Качественные показатели товарных масел зависят от базовой

основы и комплекта присадок. Базовые моторные и трансмиссионные масла подразделяют на минеральные, частично синтетические и синтетические, а вводимые комплекты присадок обеспечивают требуемые параметры эксплуатационного качества.

Термическая стойкость, термоокислительная стабильность, смазывающие свойства и вязкость – это основные параметры, характеризующие качество смазочного материала. Данные показатели используют при выборе смазочного материала и обосновании ресурса. Сроки замены моторного масла определяет производитель двигателя (по пробегу либо временному интервалу). При такой системе замены не учитывается фактическое состояние смазочного материала. Проводимые исследования по оценке термостойкости, термоокислительной стабильности и смазывающим свойствам смазочных материалов различных базовых основ показывают, что потенциальный ресурс синтетических, частично синтетических и минеральных масел различен, значит, сроки эксплуатации этих смазочных материалов также будут различными, однако в реальных условиях эксплуатации техники это не учитывается [118–135].

В двигателях внутреннего сгорания масло должно соответствовать конструкции смазочной системы двигателя, условиям эксплуатации, качеству применяемого топлива. Условия работы масел в ДВС постоянно ужесточаются. Формирование нагрузочных и скоростных режимов двигателей, уменьшение удельной емкости системы смазки приводят к росту температуры основных деталей и, как следствие, к интенсификации процессов окисления масел и снижению ресурса.

Основное влияние на ресурс смазочных материалов оказывают условия работы силовых установок, трансмиссий, редукторов и других механических систем. Нагрузочный и скоростной режимы работы двигателей и трансмиссии устанавливаются в зависимости от эксплуатационных температурных параметров и условий движения транспортных средств. В этом случае сохраняется оптимальный расход ресурса как машины в целом, так и смазывающего материала в частности. Увеличенная скорость движения приводит к значительным нагрузкам на силовую установку, трансмиссию и ходовую часть, что в свою очередь ведет к повышению температурных режимов их работы, снижению технического и эксплуатационного ресурса механических систем и смазочного материала. Температурный режим работы двигателей, трансмиссий, редукторов и других механических систем является определяющим параметром, который влияет на ресурс применяемого смазочного материала. Тепловое состояние двигателей 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 пара-

метром оценки остается температура охлаждающей жидкости. Конструктивно системы смазки механических систем по способу подачи масла к трущимся деталям могут быть с подачей масла разбрызгиванием, непрерывной подачей масла под давлением, комбинированным способом. В процессе эксплуатации в системе смазки происходят изменения, приводящие к нарушению работоспособности. Основными признаками неисправности систем смазки являются перегрев смазочного материала, низкое давление в системе, загрязненность смазочного материала.

Нарушение работоспособности системы смазки снижает ресурс смазочного материала, что приводит к выходу из строя техники. Низкое давление масла в системе может быть вызвано недостаточным количеством его в системе смазки, перегрузкой или изношенностью двигателей, трансмиссий, редукторов, загрязненностью масляных радиаторов или корпусов редукторов, что нарушает теплоотвод, а также неисправностью редукционных клапанов масляных насосов. В период прогрева двигателей температура масла далеко не соответствует действительному тепловому состоянию подшипников, оцениваемому по температуре масла в зазоре. При низкой температуре масло плохо прокачивается в системе, дольше задерживается в зазорах сопряженных деталей, плохо отводит от них тепло, что приводит к перегреву деталей и масляной пленки на их поверхностях. Как показывают результаты исследований [118; 135], предельное значение температуры масла в подшипниках ограничивается рабочей температурой его антифрикционного слоя, которая составляет $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.1).

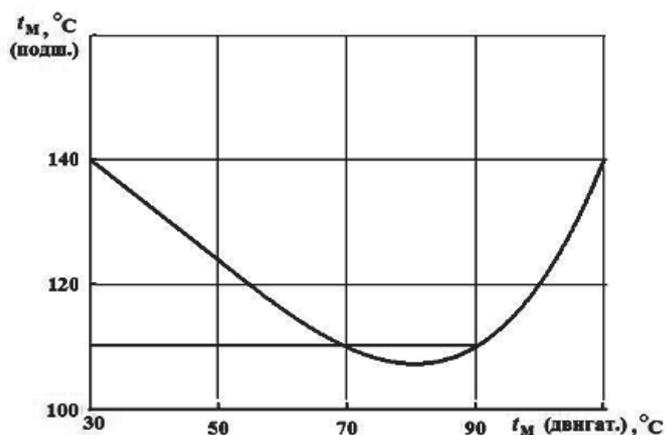


Рис. 2.1. Зависимость температуры масла в подшипниках от температуры масла на выходе из двигателя [118]

Следовательно, такой режим обеспечивается при температуре выходящего масла от 30 до $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Система смазки надежно работает при температуре масла 55 – $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этот диапазон температур соответствует минимальному нагреву масла в подшипниках. Резкое увеличение температуры масла в подшипниках, когда она на выходе из двигателя превышает $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, объясняется ухудшением теплоотвода от подшипников.

Длительная работа масла в системе смазки сопряжена с изменениями его состава и прежде всего с разжижением масла топливом, как следствие – нарушением тепловых режимов работы двигателя и значительным его износом, а также загрязнением продуктами окисления, 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 снижают их 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 служит причиной интенсивного износа трущихся деталей. Попадая в смазочный материал, она является основным компонентом его загрязнения. Работа двигателей и агрегатов трансмиссии в условиях запыленности приводит к повышению тепловых режимов эксплуатации. Процесс теплоотвода нарушается из-за оседания пыли на агрегатах, узлах и механизмах. Для улучшения условий работы системы смазки необходимо непрерывно очищать масло от вредных примесей. Его очистка производится фильтрацией, центрифугированием и отстаиванием. Степень очистки масла зависит от конструкции системы и предусматривает периодичность ее технического обслуживания.

На определение ресурса смазочных материалов влияют периодичность технического обслуживания систем смазки, качество и чистота применяемых масел, герметичность систем и отсутствие подсоса неочищенного воздуха, своевременная промывка фильтров. На основе проведенного анализа установлено, что ресурс моторных масел зависит от их сопротивляемости механическим, температурным и химическим воздействиям, герметичности масляной системы, частоты доливов, степени износа цилиндропоршневой группы, производительности системы фильтрации. Поэтому основным направлением в увеличении ресурса и надёжности двигателей является организация периодического контроля состояния моторного масла.

2.2. Характеристика моторных масел, применяемых при эксплуатации двигателей

Проблема повышения износостойкости деталей двигателей относится к проблемам, не теряющим своей актуальности и в настоящее время. Несмотря на постоянное совершенствование конструкции двигате-

лей внутреннего сгорания (ДВС) и технологии производства, вопросы износостойкости деталей во многом ещё не решены и находятся в центре внимания конструкторов, технологов и эксплуатационников. Сложность решения данной задачи заключается в том, что износостойкость – непостоянная величина для данного материала. Она определяется его исходной структурой и составом вторичных структур, образующихся на поверхностях в процессе трения [136–144]. Повышение износостойкости материалов только за счёт улучшения их механических свойств в настоящее время не полностью решает эту задачу. Необходимо учитывать среду, в которой работает пара трения, и условия эксплуатации. При выборе материалов пары трения следует учитывать их совместимость и приспособляемость друг к другу при изменении параметров трения и среды [139–141]. В двигателестроении применяется большой ассортимент материалов для изготовления деталей, работающих в различных условиях.

В качестве смазки в двигателях используют рекомендуемый заводом-изготовителем один сорт моторного масла, редко указывается заменитель, причём в процессе эксплуатации оно претерпевает изменения, которые также оказывают влияние на триботехнические характеристики. Моторные масла согласно действующей классификации (ГОСТ 17479.1–85) по вязкостно-температурным показателям подразделяются на 22 класса: четыре зимних класса (3з,4з,5з,6з), восемь летних (6,8,10,12,14,16,20,24) и десять всесезонных (3з/8 –6з/16). Номер класса соответствует численной величине средней кинематической вязкости масла данного класса. По уровню эксплуатационных свойств моторные масла подразделяются на шесть групп (А–Е), пять из которых (Б–Е) – на две подгруппы каждая, одна из которых предназначена для бензиновых двигателей (индекс 1), другая – для дизелей (индекс 2). Когда масло универсальное и применяется как в бензиновых, так и дизельных двигателях, индекс опускается. Наибольшее распространение получили моторные масла групп Б, В и Г, предназначенные для мало-, средне- и высокофорсированных двигателей соответственно.

Рассмотренная классификация содержит базовые требования к моторным маслам, согласованные и принятые ведущими производителями техники. Однако многие фирмы пользуются своим правом дополнять базовые требования классификаций собственными, которые бывают обусловлены спецификой конструкции двигателей, использованием редко применяемых конструкционных материалов и др. Такие дополнительные требования излагают в фирменных спецификациях моторных масел, а выполнение их проверяют специальными (фирменными) методами испытаний в двигателях, выпускаемых данной фирмой.

Современные моторные масла – это легированные материалы, состоящие из основы (базового масла и синтетических добавок) и присадок, улучшающих свойства базового масла. В настоящее время выпускают масла на синтетической, синтетическо-нефтяной и нефтяной основах. Наиболее распространены нефтяные масла. Их получают путём переработки нефтяного сырья, они имеют основу, состоящую из смеси изопарафиновых, нафтеновых, ароматических и нафтеноароматических углеводородов [142; 143]. Недостатки минеральных масел на нефтяной основе: плохие низкотемпературные свойства, неудовлетворительная термическая и окислительная стабильность. Преимуществами минеральных масел считается хорошая растворяющая способность по отношению к присадкам и совместимость с материалами уплотнений.

Синтетические масла содержат смесь низко- и высокомолекулярных молекул углеводородов. Синтетические масла выдерживают высокие рабочие температуры без заметного разложения и испарения, сохраняют подвижность при низких температурах, имеют в несколько раз больший срок службы, обеспечивают хорошее состояние двигателя, так как характеризуются лучшими антиокислительными, диспергирующими свойствами и механической стабильностью, равными или лучшими противоизносными и противозадирными свойствами и меньшим расходом на угар, что сокращает расход масла.

Наряду с чисто нефтяными или синтетическими маслами всё чаще используют их смеси, так называемые частично синтетические масла. В настоящее время требования к эксплуатационным свойствам масел значительно ужесточились, что привело к необходимости введения в базовую основу масла тех или иных добавок из ряда специальных присадок [144]: моющих, диспергирующих, антиокислительных, антифрикционных, противокоррозионных, противоизносных, противозадирных, загущающих, противопенных.

Разработкой новых типов присадок, их испытанием и рекомендациями к применению в двигателях занимается новая прикладная отрасль науки – *химмотология*. Как наука химмотология пока не ответила, какие моющие, антикоррозионные и противоизносные присадки наиболее эффективны. Влияние присадок на повышение тех или иных свойств масел не может определяться однозначно, а метод их оценки – быть универсальным.

Таким образом, в современных двигателях внутреннего сгорания применяются различные материалы с широким диапазоном физико-механических свойств. Детали, изготовленные из них, подвержены различным скоростным, нагрузочным и температурным условиям. Нормальная работа трибосопряжений осложнена изменением свойств масляной среды в результате окисления, полимеризации и накопления примесей различного происхождения. Кроме того, исследования износостойкости мате-

риалов пар трения представляет сложность ввиду одновременного проявления различных видов изнашивания.

2.3. Основные виды трения и изнашивания узлов двигателей внутреннего сгорания

Для обеспечения требуемой надежности механических систем необходим правильный выбор смазочных масел и износостойких материалов в соответствии с условиями их работы и режимами смазки. Важное значение для обеспечения износостойкости и приспособляемости материалов пары трения имеет смазочный материал, влияние которого сказывается на рельефе, структуре и механических свойствах поверхностного слоя при изнашивании. В процессе эксплуатации механических систем смазочный материал подвергается старению, что приводит к изменению его свойств. Влияние процессов старения на долговечность трибосопряжений изучено недостаточно [145]. Известно, что смазочный материал предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей, охлаждает их и уносит продукты износа и окисления. Кроме того, материал вступает во взаимодействие с металлами и существенно изменяет механические свойства, износостойкость и усталостную прочность поверхностных слоев [145]. В зоне фрикционного контакта прочность смазочного слоя зависит от нагрузки, скорости скольжения, температуры, механических свойств материалов и состояния поверхности, толщины слоя и его состава. Поэтому данные факторы определяют виды трения: жидкостное, граничное, эластогидродинамическое и трение без смазки. Такое деление условно, так как детали двигателей внутреннего сгорания, трансмиссий и гидроприводов работают в смешанных режимах трения, где реализуются различные виды механического и коррозионно-механического изнашивания.

Более сложные процессы, зависящие от условий работы, происходят при изнашивании деталей двигателей внутреннего сгорания. Из внешних факторов наибольшее влияние на интенсивность изнашивания оказывают абразивные частицы и температуры в зоне фрикционного контакта. Особо неблагоприятные условия трения в цилиндре двигателя возникают при реверсировании в зонах минимальных скоростей движения поршня, особенно у камеры сгорания, где температура поверхностей трения цилиндра и колец достигает 350 °С, максимальное давление 6–16 МПа, а минимальная толщина масляной пленки, которая разжижается рабочей смесью, выгорает в период воспламенения и выдувается из-под верхних колец в момент такта сжатия [146]. Поэтому возле мертвых точек всегда наблюдается полное разрушение масляной пленки.

Радиографические снимки зеркала цилиндрических втулок показывают, что по всей длине происходит взаимный перенос металла сопряженных деталей. Массоперенос с одной поверхности на другую происходит с различной интенсивностью и разными размерами разрушения, реализуемые в макро-, микро- и субмикрообъемах [146]. Наибольшая интенсивность массопереноса имеет место в верхней и нижней зонах цилиндра.

При реверсивном трении происходит разупрочнение поверхностного слоя, поэтому износ больше в 1,5–2 раза, чем при однонаправленном трении. При повышении температуры возрастает роль термической активации и ускоряется процесс схватывания даже при наличии пленок, экранирующих поверхность, так как они теряют свои разделяющие функции, но при этом повышается значение вторичных структур. Среди сложных поврежденных втулок и поршневых колец можно выделить адгезионные, усталостные и абразивные. Для исследованных слоев на поверхностях трения цилиндропоршневой группы общей закономерностью является наличие разупрочненных слоев у самой поверхности с малой концентрацией дислокаций и высокой концентрацией вакансий, лежащих вблизи пластифицированного слоя, за ними следуют слои вторичных структур сложного фазового состава и далее слой с постепенно затухающей вглубь деформацией. Таким образом, работа трения посредством пластической деформации, тепла трения, фазовых превращений, химических и диффузионных процессов вызывает появление новых защитных структур в поверхностном слое, обладающих большей сопротивляемостью износу, чем исходный материал; тем самым возникает эффект приспособляемости [147].

Основные виды изнашивания цилиндропоршневой группы – абразивное, усталостное и окислительное. На интенсивность коррозионно-механического изнашивания оказывают влияние продукты сгорания топлива, особенно соединения серы и ванадия. Это приводит к изменению механических свойств поверхностных слоев материалов, их охрупчиванию и отделению частиц в результате фрикционного взаимодействия. На интенсивность изнашивания кроме условий работы оказывают влияние конструктивные особенности деталей, физико-механические свойства металла, качество поверхностей трения и свойства масел. Исследование этих факторов направлено на повышение ресурса сопряжений цилиндропоршневой группы.

Условия трения поршневого пальца характеризуются вращательным и возвратно-поступательным движением. В зависимости от способа крепления плавающие пальцы работают в лучших условиях трения и более надежны, так как в случае заедания в одном из сопряжений качение шатуна не прекращается. При изменении величины и направления давления поршневой палец перемещается и прилегает к различным сторонам отверстий бобышек и втулки шатуна. Скорость перемещения деталей относительно

друг друга невелика, поэтому толщина масляного слоя не является достаточной и детали работают в основном в режиме граничного трения.

Износ поверхностей поршневого пальца протекает за счет молекулярного схватывания в момент прорыва масляной пленки при локальном перегреве, вибрации, абразивном действии частиц, застрявших в мягком материале втулки вкладыша и бобышек поршня. Кроме того, интенсивность изнашивания поршневого пальца неодинакова по периметру вследствие различных условий трения, вызванных деформацией деталей, неодинаковыми температурами, силовыми режимами и антифрикционными свойствами материалов сопряжений. Эффективное решение повышения износостойкости поршневого пальца – это повышение твердости поверхности и вязкости сердцевины. Правильный выбор зазоров и обеспечение постоянного слоя смазки позволяют смягчить ударные нагрузки и обеспечить надежную работу узла.

Работа коленчатого вала в паре с коренными и шатунными подшипниками характеризуется знакопеременной нагрузкой и различиями в скоростях скольжения. Пара трения «вал–подшипник» работает в условиях жидкостного трения. Для обеспечения данного режима необходимо правильно рассчитать толщину масляного слоя с учетом отклонений геометрической формы и шероховатости поверхности. Расчет работы подшипника скольжения при жидкостном трении производится согласно методикам, основанным на упругогидродинамической теории смазки [146; 147]. Гидродинамическая подъемная сила масляного слоя зависит от скорости скольжения, вязкости масла, рационального зазора, нагрузки и конструктивных параметров вала и подшипника. В реальных условиях эксплуатации жидкостное трение наступает при установившемся режиме трения. При пусках и остановках двигателя или работе на малых оборотах жидкостное трение переходит в граничное.

Износ шеек коленчатого вала зависит от степени загрязнения моторных масел абразивными частицами, которые внедряются в мягкие антифрикционные материалы подшипников и царапают поверхности шеек. В зонах выхода смазки из отверстий шеек вала всегда образуются кольцевые выработки, что подтверждает наличие эффекта шаржирования подшипников абразивными частицами. Для уменьшения износа шеек коленчатого вала, особенно шатунных, необходимо применять меры по очистке масел от твердых абразивных частиц. Кроме того, на износ шеек оказывает влияние жесткость валов. В тяжелых режимах трения работает сопряжение: кулачок распределительного вала – тарелки толкателя. Изнашивание поверхностей кулачка и тарелки толкателя происходит под действием сил трения скольжения и качения. Наиболее подвержена изнашиванию вершина кулачка, а затем области, соответствующие началу набегания и сбегания.

Кулачок распределительного вала воспринимает ударную нагрузку, которая возрастает с увеличением зазора между толкателем и клапаном. В связи с этим повышается интенсивность износа торца клапана, тарелки толкателя, кулачка распределительного вала и гнезда клапана.

Сопряжение кулачок распределительного вала – тарелка толкателя работает в условиях граничной смазки. В процессе трения происходит схватывание поверхностей кулачка и тарелки толкателя с образованием задиров на поверхности тарелки. Вследствие различия контактных давлений наблюдается неодинаковое изнашивание впускных и выпускных кулачков распределительного вала и тарелок толкателей. Также на интенсивность изнашивания оказывают влияние температурные условия газораспределительного механизма. Долговечность пары трения определяется физико-химическим и механическим воздействием смазочного материала на материалы пары трения. Так, при жидкостном трении на интенсивность изнашивания оказывают влияние только свойства масел, определяющие окислительный и коррозионный виды изнашивания. Триботехнические характеристики контакта определяются толщиной смазочного слоя масла и его вязкостью [147; 148]. При этом в масляном слое происходит скольжение между молекулярными слоями, что является отличительным фактором жидкостного трения. Установленная связь между дислокационной структурой поверхностного слоя и свойством смазочного материала служит важным звеном в исследовании прочностных характеристик поверхностного слоя, определяемых внешним и внутренним эффектами Ребиндера.

При тяжелых режимах трения положительная роль смазки заключается в поставке молекулярного кислорода и продуктов окисления масла в зону трения [149]. Свежеобразованные слои металла взаимодействуют с окислителями и образуют окисные слои, повышающие несущую способность сопряжения. Наличие окисных пленок не позволяет определить истинное значение коэффициента трения для данной пары трения, что искажает результаты сопоставления зависимости коэффициента трения от природы материалов трущихся тел. Для поддержания низкого уровня износа при легких режимах трения необходимым условием является равенство скоростей образования и разрушения окисных пленок. Увеличение скорости окисления поверхности металла приводит к увеличению толщины окисного слоя, ослаблению его связи с основным металлом, растрескиванию и усилению износа. В этом случае смазка выполняет полезную функцию, ограничивая окисление металла кислородом, находящимся в газовой фазе. Для обеспечения динамического равновесия скоростей образования и разрушения окисных пленок смазочные материалы легируют антиокислительными и противозадирными присадками, роль которых заключается

в ускорении или замедлении скорости образования защитных слоев в зависимости от механических воздействий [150–152].

Отсутствие строгой однозначной зависимости влияния свойств смазки на фрикционные характеристики материала не позволяет без экспериментальных исследований определить допустимую область их использования в зависимости от условий работы узла трения.

2.4. Современные методы контроля эксплуатационных свойств моторных масел

Подбор смазочных материалов для двигателей внутреннего сгорания, агрегатов трансмиссий, систем гидропривода и других механических систем осуществляется с учетом основных эксплуатационных свойств масел. Это вязкость, моющие, противоизносные и противозадирные, диспергирующие, антикоррозионные, антиокислительные и нейтрализующие свойства. Наличие такого количества свойств, изменяющихся в процессе эксплуатации двигателя, усложняет решение задачи контроля качества смазочных материалов.

Методы оценки эксплуатационных свойств базируются на анализе изменения физико-химических свойств масла [135; 153–155]. Оптические методы находят широкое применение при контроле технологических процессов в производстве масел [156; 157], а также определении частиц износа диаметром более 3 мкм, присутствующих в отработанном масле. Электрические методы используют для определения гранулометрического состава загрязнений масел. Широко применяют счетчики Каутлера – Коунтера, действие которых основано на принципе электрического контраста. Основной проблемой при проведении исследований гранулометрического состава загрязнений на фильтрах является подбор элементов из-за неоднородности состава современных смазочных материалов [155]. Химический анализ загрязнений проводится для определения химического состава примесей методами масс-спектропии с абсорбционной спектроскопией, атомарной абсорбции, рентгеновской фотометрии и т. п.

Эмиссионная спектрометрия как метод исследования позволяет оценить концентрацию продуктов износа трущихся деталей, находящихся в смазочном материале. Здесь возможно применение ИК-спектроскопии [158], обнаруживающей продукты окисления, соли карбоновых кислот, сульфаты и неорганические нитриты. Метод количественного молекулярного спектрального анализа, основанный на законе Бугера – Ламберта – Бера, позволяет установить связь между интенсивностями падающего и прошедшего через вещество света в зависимости от толщины поглощающего

слоя и концентрации вещества. Данный метод дает возможность определить концентрацию частиц износа в работающем масле [155]. Применение метода прямого фотометрирования позволяет использовать в качестве показателя, характеризующего пригодность смазочного материала, степень общего загрязнения продуктами окисления, эксплуатации и износа.

Проточная ультрамикроскопия даёт возможность определить концентрацию и распределение по размерам частиц износа. При этом методе проба смазочного материала, разбавленная для снижения вязкости и уменьшения коагуляции частиц, проходит через капилляр, на выходе которого через истекающий поток пропускается оптическое излучение, сфокусированное в некотором объеме. Регистрация частиц износа осуществляется в счетной зоне. Используя метод феррографии, можно оценить дисперсионный состав ферро- и парамагнитных частиц работавшего смазочного материала. Метод включает в себя два этапа: осаждение частиц в магнитном поле и получение количественной информации. Анализ феррограмм для определения наличия продуктов окисления проводят измерением оптической плотности феррограммы, полученной на стекле, методом прямого считывания, измерением размера частиц износа под микроскопом, исследованием в бихроматическом микроскопе.

Определение концентрации магнитных частиц износа проводят с применением метода магнитометрии. Работа магнитометрических устройств основана на регистрации изменения величины приложенного магнитного поля при его взаимодействии с магнитным моментом измеряемой пробы. Метод ядерного магнитного резонанса обладает высокой чувствительностью к малым концентрациям ферромагнитных частиц работавшего смазочного материала. Данный метод достаточно сложен и трудоемок, но к его достоинствам относится перспективность диагностирования смазочных материалов на ранней стадии.

Акустический анализ применяется для оценки концентрации продуктов загрязнения и окисления в смазочных материалах. Он основан на регистрации сигналов акустической системы. По параметрам сигнала оцениваются размер и количество частиц в единицу времени. Метод может быть реализован только в лабораторных условиях, так как акустическая система чувствительна к шумам окружающей среды.

Методом полярографии определяют элементный состав исследуемой пробы и концентрацию продуктов загрязнения в смазочном материале. Разрешающая способность полярографического анализа существенно повышается при наложении переменного поляризующего напряжения. Методики полярографического анализа применимы для анализа отработанных масел, определения химического состава и концентрации продуктов старения и загрязнения в лабораторных условиях.

Диспергирующие свойства смазочных материалов оценивают, используя метод хроматографии на фильтровальной бумаге. С помощью фотоэлектрического фотометра осуществляется анализ полученных хроматограмм с оценкой качества смазочного материала и степени его загрязненности. При оценке качества смазочных материалов целесообразно использование методов определения количества воды, содержащейся в масле. Для этой цели в лабораторных условиях применяют методы, основанные на испарении воды с последующей конденсацией, а также на взаимодействии ее с некоторыми веществами, например гидридом кальция. По количеству выделенного водорода при реакции гидрида кальция с содержащейся в масле водой определяют количество воды. Измерение количества выделенного тепла в ходе реакции лежит в основе метода, описанного в работе [159]. Сравнительно прост метод определения наличия и количества воды в масле с применением фотометрии и глицерина. Глицерин поглощает воду, поэтому фотометрирование пробы масла до и после смешивания с глицерином изменяет показания фотометра [154]. Весьма разнообразны инструментальные методы определения содержания воды в маслах. К их числу относят метод измерения диэлектрической проницаемости масла, электрометрические, гидротермические и другие методы.

Масла для двигателей внутреннего сгорания производятся в соответствии с государственными стандартами и техническими условиями. Использование представленных методов оценки эксплуатационных свойств смазочных материалов на стадии их производства позволяет установить показатели качества товарных масел. Сравнительный анализ возможностей рассматриваемых методов был представлен в табл. 1.3.

В ходе эксплуатации масел меняются как количественные, так и качественные показатели. Оценка работоспособности смазочных материалов по предельным значениям параметров качества устанавливается экспериментально. Сроки замены смазочного материала указывают в технической документации; они связаны со временем наработки двигателя в моточасах или пробегом транспортных средств в километрах пройденного пути. Сегодня известно большое количество критериев оценки качества масла. Особое внимание при этом уделяется их корреляции с темпом износа. Авторы [160; 161] рекомендуют брать в качестве критерия оценки количество отложений на деталях двигателя. В общем случае эти критерии можно разделить на две группы.

Первая группа оценивает смазочные свойства по показателям давления, при котором происходит схватывание; скорости скольжения, вызывающей повышение температуры; десорбции смазки и схватывания; скорости износа и силы трения; температурной стойкости масла.

Вторая группа показателей включает комплексную оценку масел по таким браковочным показателям: вязкость, плотность, температура вспышки, диспергирующая способность, наличие воды, содержание серы в топливе. В качестве критерия оценки работоспособности смазочного материала при граничном трении рекомендована критическая температура [162; 163].

В результате обобщения стендовых и эксплуатационных исследований, проведенных на различных двигателях внутреннего сгорания, были установлены показатели предельного состояния качества моторных масел, по которым можно дать предварительную оценку срока службы масел в двигателе (см. табл. 1.2). Для тепловозных двигателей, РЖД разработана методика оценки качества масел по браковочным показателям (табл. 2.2). Аналогичная система предложена для контроля моторных масел судовых двигателей [164]. За рубежом в качестве браковочных показателей рекомендуются загрязненность и диспергирующая способность масла, коксуемость, оптическая плотность и др. Данные по Германии приведены в табл. 2.3 [160].

Таблица 2.2

**Браковочные показатели работавших моторных масел
для тепловозных дизелей**

Показатель	Предельная величина показателя
Общее щелочное число, мг КОН/г, менее	25±0,5
Водородный показатель, рН, менее	5,5
Вязкость, сСт, при 100 °С, %	±20
Температура вспышки, °С, менее	170
Загрязненность масла, более	450
Диспергирующая способность масла по пятну, более	3
Наличие воды, %, более	0,05

Таблица 2.3

**Браковочные показатели качества работавшего моторного масла
применяемые в Германии**

Показатель, %	Максимальное значение, при котором может быть допущена работа двигателя	Браковочное значение, рекомендуемое для замены масла
Нерастворимые в бензине примеси	3,0	2,5
Содержание топлива	1,0	0,8
Содержание воды	0,8	0,5
Прирост вязкости	38	35

Рассмотренные методы и критерии оценки качества масел используют в основном при лабораторных и стендовых испытаниях. На базе анализа

и обобщения результатов исследований показано, что на долговечность узлов трения, наряду с физико-механическими свойствами материалов, большое влияние оказывают смазочные материалы. Таким образом, в процессе работы механических систем качество смазочного материала изменяется вследствие образования примесей и отложений, ухудшающих режим работы и подачу смазки к узлам трения. Разработанные методы и критерии оценки не всегда эффективны для применения в условиях эксплуатации техники, поэтому очевидна необходимость разработки научно обоснованных экспрессивных методов и критериев оценки качества масел.

Кроме того, анализ квалификационных методов оценки качества смазочных материалов и большого количества инструментальных методов показывает, что для решения проблемы оценки качества работающих масел необходимы комплексный метод и критерии, учитывающие связь между основными показателями качества, в том числе триботехническими. В работе предлагается комплексный подход к оценке работоспособности смазочных материалов, включающий методы определения концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения, термоокислительной стабильности и триботехнических свойств.

3

МЕТОД КОНТРОЛЯ МЕХАНИЗМА СТАРЕНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ И МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1. Выбор масел для исследования

Выбор трансмиссионных масел основан на рекомендациях заводов-изготовителей техники и включает моторно-трансмиссионное масло МТ-8п. Оценка влияния сроков хранения на состояние трансмиссионных масел проводилась на данном масле. Для сравнения механизма старения трансмиссионных масел при хранении и термостатировании в лабораторных условиях выбраны товарные масла МТ-8п, ТСзп-8, МС-20 и масла различной базовой основы: минеральное BIZOL80W-90GL4; частично-синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90GL4, GL5; синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90GL5.

Для исследования влияния сроков хранения на механизм старения трансмиссионных масел пробы отбирались непосредственно с трансмиссий после полигонных испытаний, обеспечивающих их перемешивание в объеме 1,5 л. При оценке показателей старения масел на средствах измерения пробы тщательно перемешивали.

3.2. Основные требования к средствам контроля и измерения

Важную роль в обеспечении надежности техники играет смазочный материал, качество которого в процессе эксплуатации практически не контролируется. Однако на ресурс смазочных материалов оказывают влияние не только режимы и условия эксплуатации, но и частота доливов масел, техническое состояние топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы, систем фильтрации и охлаждения.

При эксплуатации моторных масел в двигателях образуются продукты окисления в виде асфальтосмолистых соединений, нагаров, лаков, воды и т. п. С целью предотвращения выпадения в осадок продуктов окисления в масло вводят моюще-диспергирующие присадки, представляющие поверхностно-активные вещества, которые удерживают их в коллоидном

состоянии, поэтому резкое снижение эксплуатационных характеристик моторных масел наступает, когда израсходованы присадки. В этих условиях продукты окисления начинают выпадать в осадок и нарушать теплообмен, снижать производительность системы фильтрации, увеличивать вязкость масла и влиять на его противоизносные свойства и ресурс. Такое состояние масла свидетельствует о необходимости замены. Кроме того, отработанные моторные масла относятся к нефилтруемым [146], так как при фильтрации наблюдается весьма незначительный эффект очистки от продуктов окисления.

Одним из направлений обеспечения надежности машин является изучение интенсивности старения моторных масел при различных условиях эксплуатации и продления срока их службы. В этой связи предлагается каждому транспортному предприятию использовать возможность экономить моторные масла, для чего следует организовать посты по сбору, очистке моторных масел и контролю их качества. Накопление механических примесей – это основной фактор ухудшения качества масел.

Физические методы очистки наиболее просты, не требуют значительных финансовых и трудовых затрат. Так, применение центробежной очистки позволяет повысить ресурс моторных масел в 2–3 раза, обеспечить благоприятные условия работы трибосопряжений, повысить их надежность и долговечность, снизить эксплуатационные затраты и повысить эффективность использования техники. Для исследования изменения эксплуатационных свойств моторных масел при эксплуатации или хранении техники необходимо осуществлять отбор проб. Однако отбор в больших объемах приводит к искажению действительной картины старения масла, поэтому основное требование к средствам контроля – использование малых объёмов проб масел с целью исключения влияния доливов, а также выбор методов контроля, определяющих конструкцию прибора и объем используемого масла, который можно возвращать в масляную систему. Исходя из основных эксплуатационных свойств моторных масел выбраны основные параметры качества: термоокислительная стабильность, моюще-диспергирующие свойства, вязкость, испаряемость, противоизносные свойства, которые служат основанием для разработки новых и применения стандартных приборов.

Для исследования эксплуатационных свойств моторных масел выбраны прибор для определения оптических свойств, прибор для термостабилизации, малообъемный вискозиметр, центрифуга, электронные весы, трехшариковая машина трения со схемой трения «шар–цилиндр» и шлифовальная машина для переточки цилиндра, микроскоп электронный «Альтами» Мет-1М.

Прибор для определения оптических свойств смазочных материалов предназначен для прямого фотометрирования и оценки степени окисления товарных и работающих масел. Внешний вид прибора представлен на рис. 3.1, техническая характеристика приведена в табл. 3.1.



Рис. 3.1. Прибор для определения оптических свойств смазочных материалов: 1 – блок измерения; 2 – фотометрическая кювета

Показателем степени окисления (старения) масла принят коэффициент поглощения светового потока $K_{\text{п}}$, определяемый по формуле

$$K_{\text{п}} = (300 - \Pi)/300, \quad (3.1)$$

где 300 – фототок, генерируемый фотоэлементом при отсутствии масла в кювете, мкА; Π – фототок при наличии масла в кювете, мкА.

Таблица 3.1

Техническая характеристика прибора для определения оптических свойств

Параметры	Значения параметров
Диапазон измерения, мкА	0–300
Фотоэлемент	Сф 2-1А
Погрешность измерения, %	$\pm 2,0$
Время одного измерения с учетом вспомогательного, мин	$3,0 \pm 0,1$
Время непосредственного измерения, с	$5,0 \pm 1$
Толщина фотометрируемого слоя при фотометрировании, мм: моторных масел: дизельных двигателей бензиновых двигателей	 0,03 0,15
Напряжение питания, В	9
Потребляемая мощность, ВА	$0,2 \pm 0,01$
Время нагрева прибора для нормальной работы, мин	$3,0 \pm 0,5$
Габариты, мм	$105 \times 225 \times 40$

Этот прибор включает блок измерения и фотометрическую кювету, предназначенную для прямого фотометрирования масел различной оптической плотности. Толщина фотометрируемого слоя – 0,03; 0,15; 2 и 8 мм, что обеспечивает фотометрирование моторных, трансмиссионных, гидрав-

лических и промышленных масел. Фотометрические кюветы заполняют путём нанесения нескольких капель масла на стекло с помощью мерного щупа, вынимаемого из картера двигателя. Принцип работы прибора основан на пропускании монохроматического светового потока через слой исследуемого масла, который регистрируется фотоприемником. В зависимости от концентрации нерастворимых продуктов окисления (старения) в масле обратно пропорционально изменяется величина фототока. Световой поток, преобразованный в электрический сигнал, регистрируется индикатором, по величине которого рассчитывают результат измерения в виде коэффициента поглощения светового потока. Чем больше примесей, тем ниже показания прибора. Браковочные показатели по механическим примесям устанавливают экспериментально для каждого сорта масла и типа двигателя [165–168].

Прибор для термостатирования смазочных материалов предназначен для определения термоокислительной стабильности товарных и рабочих масел. Внешний вид прибора представлен на рис. 3.2, техническая характеристика приведена в табл. 3.2. Термоокислительная стабильность характеризует склонность масел к окислению и образованию продуктов окисления. При термостатировании смазочных материалов изменяются их оптические свойства, вязкость и испаряемость.

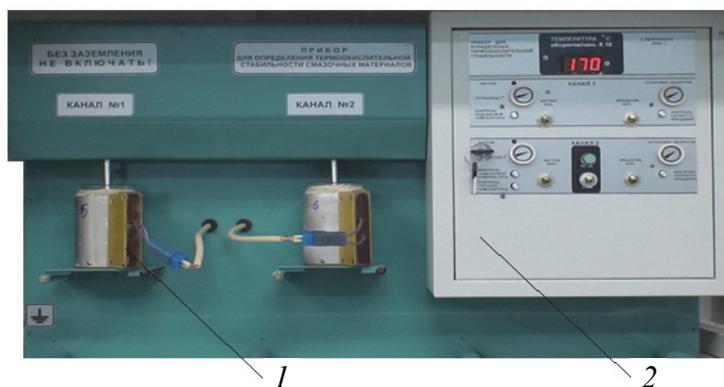


Рис. 3.2. Общий вид прибора для термостатирования смазочных материалов: 1 – механический блок; 2 – блок измерения и управления

В табл. 3.2 представлена техническая характеристика прибора для термостатирования.

Прибор состоит из механического блока 1, обеспечивающего нагрев и перемешивание пробы масла, и измерительного блока 2 с органами управления, установленными на передней панели [169; 170]. Механический блок (рис. 3.3) включает стеклянный стакан 1, на наружной поверхности которого установлен нагревательный элемент 2, изолированный термоизоляцией 3 и установленный в корпус 4. Стакан 1 устанавливают на шарнирной платформе 5, выполненной поворотной и фиксируемой в горизонтальном положении фиксатором 6. В стакан 1 погружают стеклянную мешалку 7, закрепленную на валу 8, установленном на подшипниках 9

в подшипниковом узле *10*, закрытым крышкой *11*. Вал *8* с помощью упругой муфты *12* соединен с микроэлектродвигателем *13*, установленным в кронштейне *14*. Для обеспечения соосности валов мешалки и электродвигателя подшипниковый узел установлен в кронштейне *16*. Оба кронштейна *14* и *16* крепятся к передней панели с помощью винтов *15* и *17*. Температура исследуемого масла измеряется с помощью термопары *18* (хромель-копель). Измерительный блок включает схемы питания, задания и сравнения температуры, настройки частоты вращения мешалки и автоматического поддержания температуры.

Таблица 3.2

Техническая характеристика прибора для термостатирования

Параметр	Значение параметра
Напряжение питания, В	$\sim 220 \pm 10 \%$
Потребляемая мощность, ВА	$400 \pm 10 \%$
Частота вращения мешалки (регулируемая), об/мин	$300 \pm 5 \%$
Температурный диапазон, °С	От 50 до 200
Масса испытуемого масла, г	$100 \pm 0,1$
Датчик температуры	Хромель-копель
Габариты, мм:	
высота	$450 \pm 5,0$
длина	$170 \pm 5,0$
ширина	$740 \pm 5,0$
Масса, кг	$8,5 \pm 0,5$

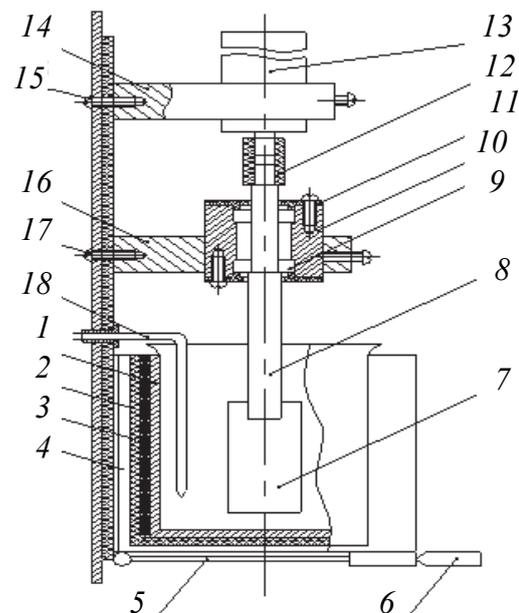


Рис. 3.3. Механический блок прибора для термостатирования смазочных масел: *1* – стакан для испытуемого масла; *2* – нагреватель; *3* – теплоизоляция; *4* – кожух; *5* – платформа; *6* – фиксатор платформы; *7* – мешалка; *8* – вал; *9* – подшипник; *10* – узел подшипниковый; *11* – крышка; *12* – муфта; *13* – микроэлектродвигатель; *14*, *16* – кронштейн; *15*, *17* – винт; *18* – термопара

Органы управления, регистрации и установки температуры вынесены на лицевую панель. Защита элементов измерительного блока от пере-

падов напряжения сети обеспечивается предохранительным устройством. Температура испытуемого масла регистрируется цифровым индикатором, а необходимая температура задается дискретно и в процессе испытания поддерживается автоматически с точностью ± 1 °С. Напряжение питания на нагревательный элемент подается через штепсельный разъем от измерительного блока. Частота вращения мешалки устанавливается дискретно, регистрируется цифровым индикатором и в процессе испытания поддерживается автоматически с точностью ± 5 об/мин. После каждого испытания отбирается проба масла для оценки текущих параметров. Проба масла взвешивается для определения испаряемости, измеряется вязкость масла, а также оцениваются изменения оптических свойств масла.

Малообъемный вискозиметр [166] предназначен для измерения вязкости малых объемов нефтепродуктов при 100 и 50 °С. Общий вид прибора представлен на рис. 3.4, а техническая характеристика – в табл. 3.3. Прибор состоит из механического и электронного блоков, расположенных соответственно в верхней и нижней частях модуля.



Рис. 3.4. Общий вид малообъемного вискозиметра

Таблица 3.3

Техническая характеристика малообъемного вискозиметра

Параметры	Значение параметра
Напряжение питания, В	12 \pm 0,5
Максимальная мощность нагревателя, Вт	42 \pm 1,0
Погрешность измерения, %	\pm 0,2
Объем испытуемого масла (РЖ), мл	8,5 \pm 0,1
Температура измерения вязкости, °С:	
моторных и трансмиссионных масел	100 \pm 0,1
гидравлических и промышленных масел	50 \pm 0,1
Время одного измерения, мин	5 \pm 1

Работа прибора заключается в измерении времени погружения плоского диска под собственным весом в нефтепродукт при его заданной температуре на заданную глубину. Измерительная схема прибора предусмат-

ривает за 1 °С до заданной температуры (50 или 100 °С) 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 температуры электромагнитная система обесточивается. При этом диск под собственным весом опускается. Время его опускания зависит от вязкости жидкости [166; 167].

Кинематическая вязкость определяется по формуле

$$\mu = (\Pi - K) / \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.2)$$

где μ – коэффициент кинематической вязкости, мм²/с; Π – показания прибора, имп; K и $\operatorname{tg} \alpha$ – коэффициенты, которые определяются при тарировке прибора и зависят от его конструктивных особенностей (диаметр диска, высота его опускания).

Малообъемная центрифуга [166] предназначена для отделения эксплуатационных примесей при центрифугировании исследуемого масла и определения его диспергирующих свойств по количеству и плотности осадка. Частота вращения ротора – 8 000 об/мин. Используется совместно с фотометром.

Электронные весы предназначены для контроля, измерения массы заливаемого в прибор смазочного материала и для определения термоокислительной стабильности с точностью $\pm 0,1$ г и массы испарившегося масла при испытании.

Трехшариковая машина трения (рис. 3.5) относится к испытательной технике и предназначена для определения противоизносных свойств товарных, отработанных, окисленных и термостатированных смазочных масел. Машина трения выполнена по схеме «шар – цилиндр», причем каждый из трех шаров взаимодействует с цилиндром по индивидуальной дорожке трения, т. е. позволяет исследовать и фотографировать рельеф изношенной поверхности.

В качестве испытательных образцов используются шары от шарикоподшипника № 204 (ГОСТ 8338) диаметром 9,5 мм и обойма роликового подшипника № 42416 (ГОСТ 8328) диаметром 80 мм, изготовленные из стали ШХ15. Для исследования процессов формирования и разрушения граничных слоев на поверхностях трения через один из шаров пропускают ток от внешнего стабилизированного источника питания 3В, который через аналоговый преобразователь подавался на компьютер для записи в виде диаграммы [171]. Параметры трения выбраны [172] с максимальной чувствительностью на изменение свойств масел и составили нагрузку 13 Н, ско-

рость скольжения 0,68 м/с, температуру масла 80 °С, время испытания 2 ч. Испытательные образцы использовались многократно: шары проворачивались в держателях, подводя новую поверхность, а цилиндр перетачивался на установке (рис. 3.6) тремя абразивными лентами разной зернистости, обеспечивая шероховатость 0,8 мкм. Диаметры пятен износа замерялись на оптическом микроскопе «Альтами» Мет-1М, имеющем возможность фотографирования рельефа пятен износа (рис. 3.7).



Рис. 3.5. Трехшариковая машина трения [92]



Рис. 3.6. Шлифовальная машина



Рис. 3.7. Микроскоп электронный «Альтами» Мет1М

Противоизносные свойства смазочных масел оценивались по следующим параметрам: среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трех шарах; току, протекающему через фрикционный контакт, записанному в виде диаграмм; продолжительности пластической, упруго-пластической и упругой деформаций; средней скорости формирования пятна износа.

3.3. Метод контроля трансмиссионных масел, находящихся на длительном хранении

Исследования проводились на минеральном трансмиссионном масле МТ-8п длительного хранения, находящемся в бронетехнике. Для определения состояния масел при длительном хранении применялись следующие средства испытания и измерения: фотометрическое устройство для определения оптических свойств масел по коэффициенту поглощения светового потока, характеризующего концентрацию общих продуктов старения; центрифуга, обеспечивающая совместно с фотометром определение концентраций в масле растворимых и нерастворимых продуктов старения ($K_{пр}$ и $K_{пн}$); вискозиметр – для измерения кинематической вязкости масел; прибор для термостатирования масел, используемый для установления

концентраций легких фракций, воды и сопротивляемости окислению. Пробы масел отбирались из трансмиссий после полигонных испытаний бронетехники в объеме 1,5 л (рис. 3.8).

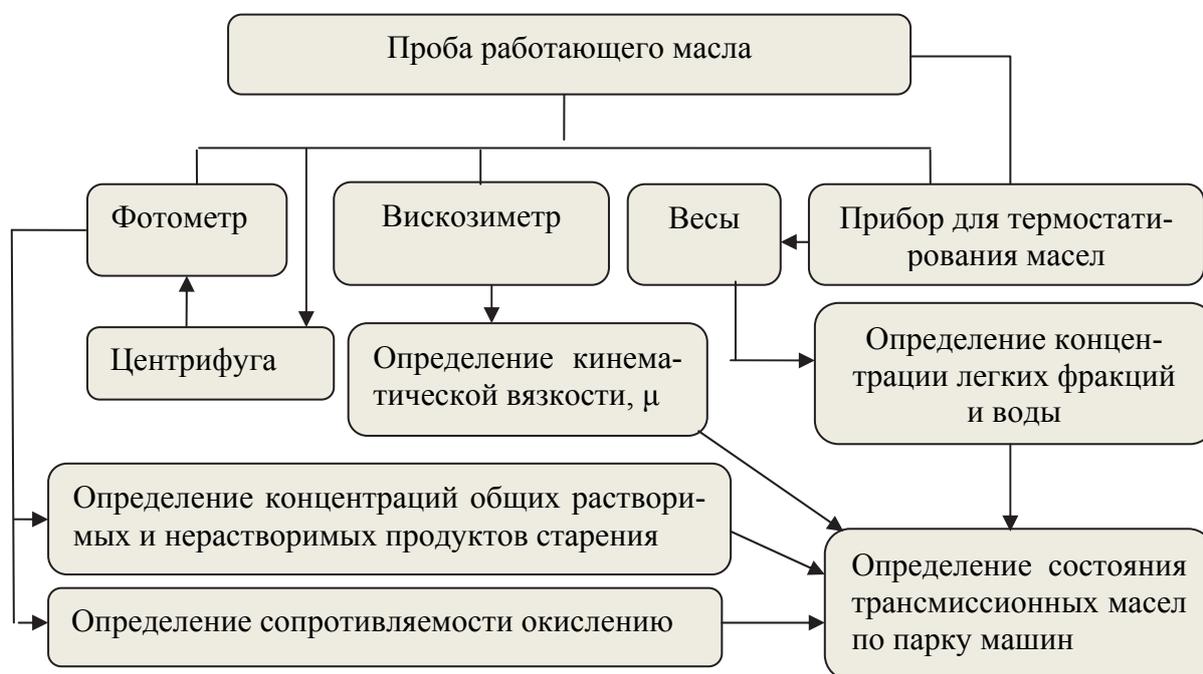


Рис. 3.8. Схема методики контроля состояния работающих трансмиссионных масел

Сущность методики контроля масел, находящихся на длительном хранении в технике, заключается в следующем (рис. 3.8): отобранные пробы масел из трансмиссий тщательно перемешивают, отбирают часть пробы для прямого фотометрирования и определения концентрации общих продуктов старения при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм. Часть пробы (8 г) центрифугируется в течение 1 ч, после чего фотометрируется для определения концентрации растворимых продуктов старения, причем пробу масла с кюветы центрифуги отбирают с верхнего слоя масла. По разности коэффициентов поглощения светового потока до и после центрифугирования определяют концентрацию нерастворимых продуктов старения $K_{пн}$ по формуле

$$K_{пн} = K_{п} - K_{пр}, \quad (3.3)$$

где $K_{п}$ и $K_{пр}$ – соответственно коэффициенты поглощения светового потока, характеризующие концентрации общих и растворимых продуктов старения.

Часть пробы работавшего масла используется для определения кинематической вязкости. Этот показатель не должен превышать вязкость товарного масла на 30–35 % или быть ниже 20 % и применяется для установления отработанного ресурса.

В отработанных маслах определяют наличие легких фракций, образующихся в результате механической и температурной деструкции, и воды. Их термостатируют в приборе при температуре 120 °С в течение 20 мин, после чего пробу взвешивают на весах. Разность масс пробы до и после термостатирования показывает массу легких фракций и воды в масле.

Прибор для термостатирования масел используется для определения сопротивляемости работающих трансмиссионных масел окислению. Технология определения приведена в подразделе 2.3 с той лишь разницей, что время термостатирования составляет 3 ч. По данным термостатирования определяется изменение состояния масел по парку машин. По полученным экспериментальным данным строят кривые распределения концентраций общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения, кинематической вязкости, концентрации легких фракций и воды, изменения потенциального ресурса при термостатировании масел от количества проб и формулируют заключение о состоянии трансмиссионных масел в парке машин, выявляют машины, требующие замены масел, и назначают время очередного контроля для масел, ресурс которых на исходе. Данная методика апробирована в работах [112; 117; 173–175].

3.4. Метод контроля отработанных и работающих моторных масел

Способность масел защищать трущиеся поверхности от износа, обеспечивать снижение потерь на трение и температуру в зоне контакта определяет надежность и долговечность деталей машин, которые при правильной эксплуатации определяются тремя основными факторами: конструкцией, технологией изготовления и смазкой. Если конструированию деталей машин и механизмов отведена существенная роль в науке, то вопросы смазки деталей по-прежнему остаются малоизученными. Эффективность смазочных материалов зависит от свойств, которые изменяются в процессе эксплуатации, состояния трущихся поверхностей, параметров трения (скорость, нагрузка, температура) [176–179]. Известно, что смазочное масло способно обеспечивать заданный ресурс только при точном соответствии его свойств конструкции агрегата и режиму его эксплуатации. В качестве объекта исследования выбраны всесезонные синтетические и частично синтетические товарные и отработанные моторные масла. Характеристики масел, выбранных для исследования, приведены в табл. 3.4, 3.5.

При оценке качества выпускаемых моторных масел основными эксплуатационными показателями являются термоокислительная стабильность и противоизносные свойства. Термоокислительная стабильность оп-

ределяет сопротивляемость моторного масла температурным воздействиям, и чем она выше, тем с меньшей скоростью образуются продукты окисления, загрязняются детали двигателя, увеличивается ресурс системы фильтрации и в конечном счете ресурс самого масла. Противоизносные свойства масел определяют долговечность самого двигателя [180–184].

Таблица 3.4

Характеристики товарных синтетических моторных масел

Показатель \ Марка масла	Texaco Havoline Synthetic 5W-40 SJ/CF	Esso Ultron 5W-40 SJ/CF	BP Visco 5000 5W-40 SL/CF	Castrol GTX Magnatec 10W-40 SL/CF
Плотность при 15 °С, г/см ³	0,850	0,855	0,855	0,870
Вязкость при 40 °С, мм/с	86,8	84	–	105,2
Вязкость при 100 °С, мм/с	13,8	14,2	14,3	15,2
Индекс вязкости	163	175	175	145
Температура вспышки, °С	230	220	220	195
Температура застывания, °С	51	39	39	39
Щелочное число, мг КОН/г	9,7	–	10,0	8,7

Таблица 3.5

Характеристики товарных частично синтетических моторных масел

Показатель \ Марка масла	Texaco Havoline Extra 10W-40 SJ/CF	Esso Ultra 10W-40SJ/CF	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	Ravenol TSI10W-40 SM/CF
Плотность при 15 °С, г/см ³	0,870	0,878	0,878	0,871
Вязкость при 40 °С, мм/с	100	97	–	92,4
Вязкость при 100 °С, мм/с	14,6	14,4	14,3	14
Индекс вязкости	151	156	155	154
Температура вспышки, °С	224	–	218	216
Температура застывания, °С	27	31	36	36
Щелочное число, мг КОН/г	7,7	–	8,2	7,6

Основная концепция методики, которая легла в основу метода контроля состояния моторных масел, заключается в определении концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения, вязкости и испаряемости, склонности к образованию в процессе эксплуатации двигателей продуктов старения. Методика исследования позволяет выявить закономерности изменения концентрации продуктов старения при эксплуатации двигателя и оценить противоизносные свойства масла. Пригодность масла для дальнейшего использования определяется путём сравнения параметров работавшего масла с предельно допустимыми (браковочными)

значениями, установленными и обоснованными данной методикой. Смену масла в двигателе рекомендуется проводить при предельном значении одного или нескольких браковочных показателей, причём плановость системы смены сохраняется с корректировкой сроков технического обслуживания. Методика предусматривает исследование отработанных и работающих моторных масел различной базовой основы в два этапа (рис. 3.9).

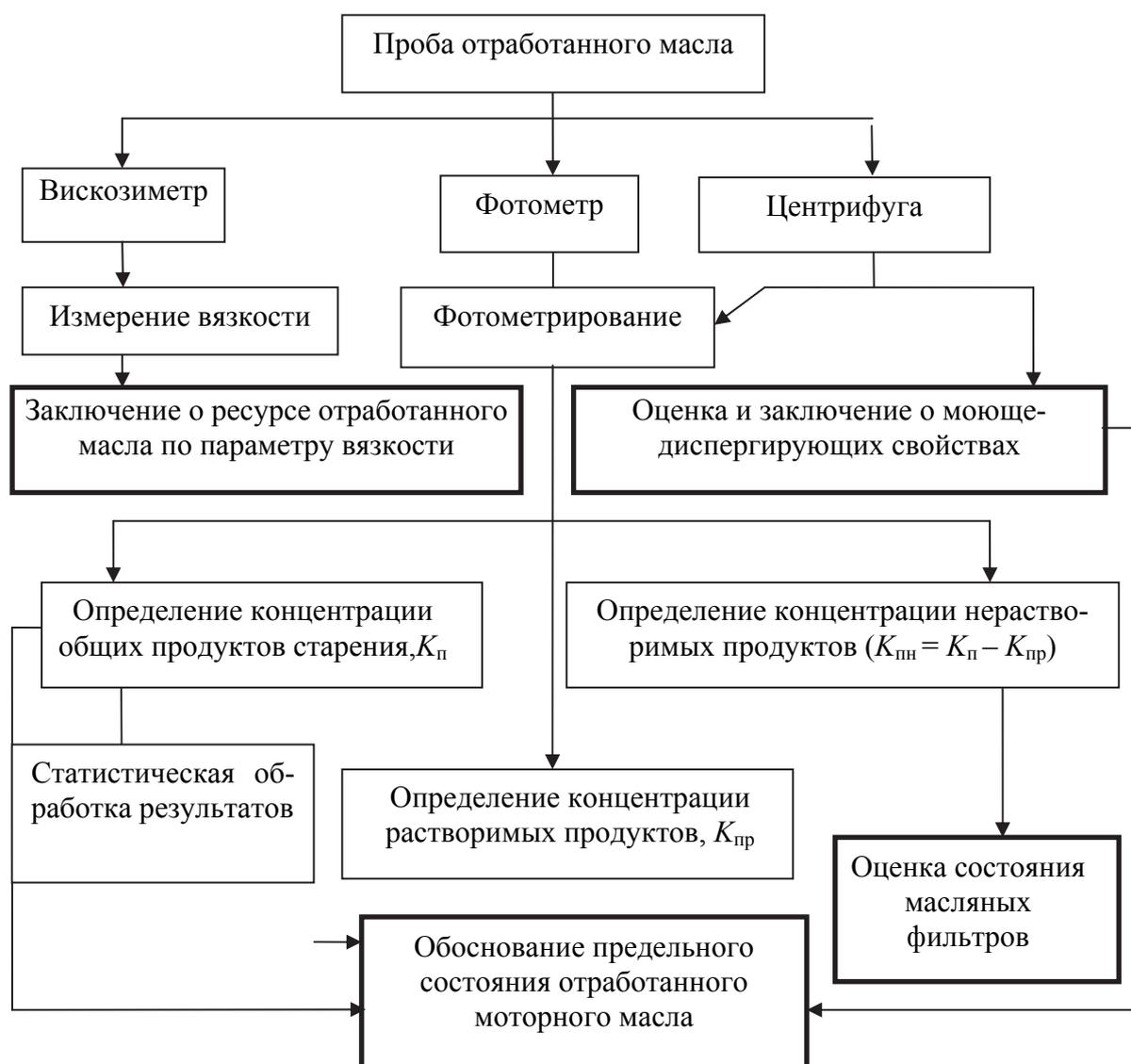


Рис. 3.9. Схема испытания отработанных моторных масел: $K_{п}$ – коэффициент поглощения светового потока, определяющий концентрацию общих продуктов старения в отработанном масле; $K_{пр}$ – коэффициент, характеризующий концентрацию растворимых продуктов; $K_{пн}$ – коэффициент, характеризующий концентрацию нерастворимых продуктов

На первом этапе отбирались отработавшие регламентируемый заводами-изготовителями срок пробы масел в объёме 0,2 л, слитые из двигате-

лей парка машин при техническом обслуживании. Пробу масла делили на части. После тщательного перемешивания первую часть пробы использовали для измерения вязкости (при 100 °С), по которой определяли отработанный маслом ресурс (вязкость не должна превышать вязкость товарного масла на 30–35 %). Вторую часть фотометрировали при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм для определения концентрации общих продуктов старения. Третью часть центрифугировали с частотой вращения ротора 8 000 об/мин в течение одного часа и с последующим фотометрированием и определением концентрации растворимых продуктов старения, а разность между концентрациями общих и растворимых продуктов определяла концентрацию нерастворимых продуктов старения, по которой производилась диагностика состояния фильтрующих элементов. По плотности осадка на днище кюветы центрифуги определяли наличие в масле моющих присадок. По результатам оценки концентрации общих продуктов старения проводили статистическую обработку данных по парку машин, на основании которой предварительно устанавливали предельное состояние исследуемых масел.

Второй этап исследования отработанных моторных масел заключался в корректировке предельного состояния, установленного на первом этапе, с учётом испытаний их на термоокислительную стабильность для определения запаса ресурса (рис. 3.10). Методика предусматривала нагрев в стеклянном стакане и перемешивание стеклянной мешалкой (с частотой вращения 300 об/мин) пробы отработанного моторного масла постоянной массы (100±1 г). Температура испытания составляла 180±2 °С и поддерживалась автоматически. Время испытания – 20 ч. Причём после 3, 8, 14 и 20 ч испытания стакан с испытуемым маслом взвешивают с точностью 0,1 г и определяют массу испарившегося масла. Оценка степени окисления моторных масел проводилась прямым фотометрированием по коэффициенту поглощения светового потока $K_{пт}$ термостатированной пробы, изменению вязкости и испаряемости, что позволило определить сопротивляемость отработанных масел окислению и установить резерв их ресурса. С целью апробации предложенной методики и проверки соответствия установленного предельного состояния моторных масел проводились исследования синтетического моторного масла RavenolVSI 5W–40 SM/CF, работавшего в двигателе от залива товарного до слива отработанного, при нормативном пробеге применительно к условиям эксплуатации. С этой целью из картера двигателя отбирали пробу масла массой 30 г и подвергали испытанию согласно представленной на рис. 3.10 схемы, включая испытания на машине трения.

По результатам изменения вязкости, испаряемости, коэффициента поглощения светового потока и противоизносных свойств строили графи-

ческие зависимости, которые использовали для поиска критерия оценки состояния исследуемого масла.

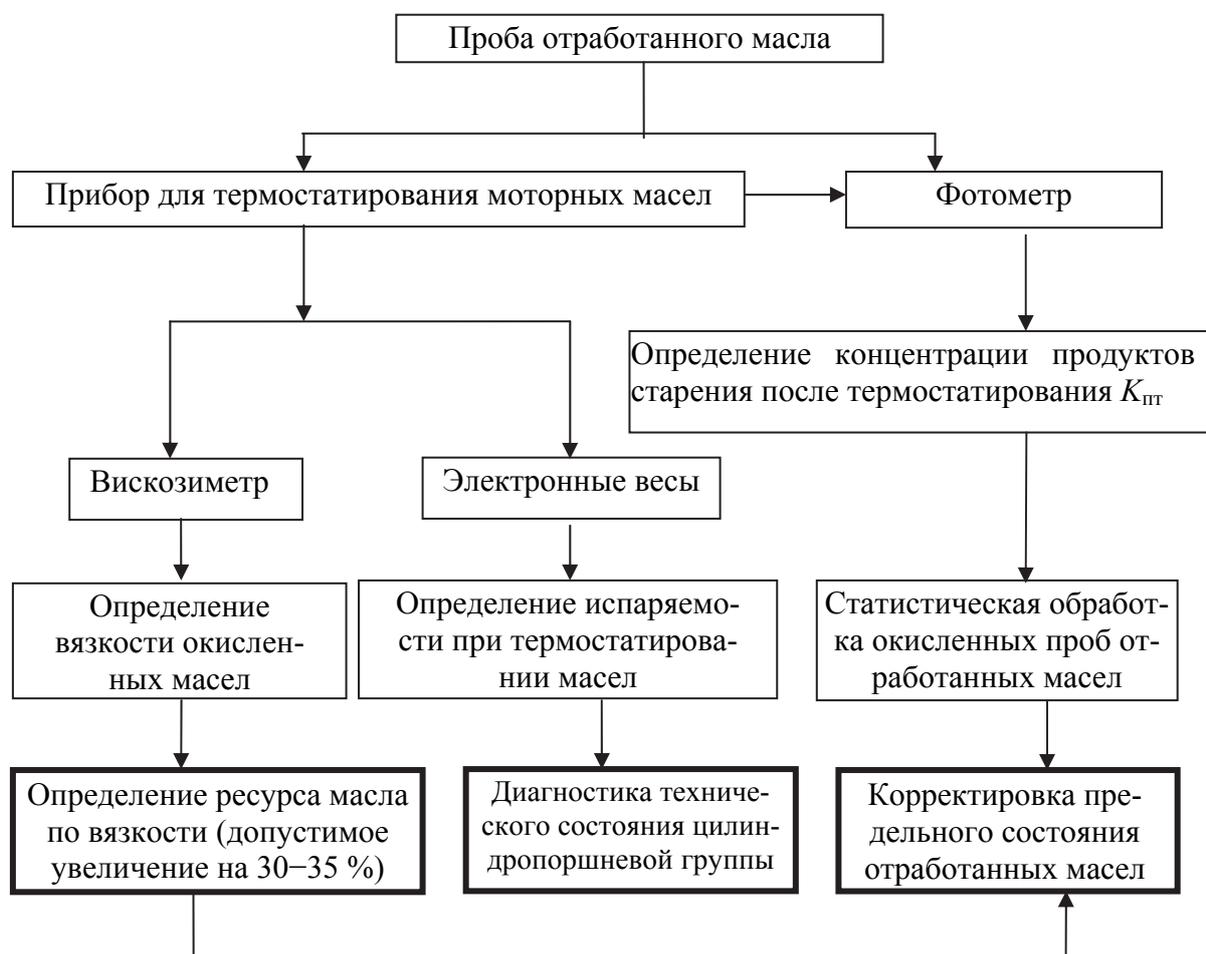


Рис. 3.10. Схема испытания отработанных моторных масел на термоокислительную стабильность

Разработанная методика позволила установить предельное состояние любых масел разных базовых основ и групп эксплуатационных свойств. Это даёт возможность корректировать сроки замены в зависимости от индивидуальных особенностей эксплуатации, технического состояния в различных механизмах.

3.5. Метод контроля противоизносных свойств трансмиссионных масел

Противоизносные свойства масел зависят от химического состава, полярности базовой основы, композиции присадок и их концентрации, вязкостно-температурной характеристики, свойств граничных

слоев, механических свойств материалов деталей и способности масла химически модифицировать поверхности сопряженных деталей, а также от концентрации продуктов окисления или старения, концентрации продуктов износа и загрязнений, попадающих извне.

Множество факторов, влияющих на износ деталей трансмиссий, затрудняет оптимизацию установления предельных показателей триботехнических характеристик с учетом физико-химических свойств смазочного материала. Поэтому для повышения противоизносных и противозадирных свойств трансмиссионных масел их легируют присадками, содержащими серу, фосфор, галогены, бор. Триботехнические характеристики для малого количества масел нормированы стандартами и техническими условиями, определяются на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) ГОСТ 9490–75 и проводятся для контроля в процессе производства. Важной характеристикой масел по снижению коррозионного износа является их нейтрализующая способность, показателем которой в нормативной документации служит щелочное (кислотное) число.

В монографии для оценки влияния продуктов окисления на противоизносные свойства товарных трансмиссионных масел применена трехшариковая машина трения со схемой «шар – цилиндр», что позволило определить влияние базовой основы на их триботехнические характеристики и сравнить с результатами испытания работающих масел, находящихся на хранении в технике.

Методика контроля триботехнических характеристик заключалась в следующем (рис. 3.11). После тщательного перемешивания пробу масла (после окисления, отработанная) объемом 20 мл заливали в емкость машины трения, которую устанавливали в термостат. С помощью программы терморегулятора ТРМ-101 задавали температура 80 °С. Запускали вращение цилиндрического образца, который смачивался испытываемым маслом, залитым в емкость, а три шара до набора температуры не соприкасались с цилиндром. При наборе заданной температуры (80 °С) шары опускали плавно на цилиндр с нагрузкой 13 Н и регистрировали время начала испытания. Температуру масла измеряли термопарой «хромель – копель» и поддерживали автоматически с точностью ± 2 °С. После двухчасовых испытаний шары с оправкой промывали в бензине и протирали ветошью, смоченной в спирте, затем на оптическом микроскопе производили измерения диаметров пятен износа по максимальному и минимальному диаметру, определяли средний диаметр пятна износа и среднеарифметическое значение на трех шарах. Испытания проводились дважды на одном и том же масле. По полученным результатам износа строили графические зависимости от коэффициента поглощения светового потока, по которым сравнивали товарные масла различной базовой основы, и работающие, а также

находили критерий противоизносных свойств в зависимости от концентрации продуктов окисления или старения.

После каждого испытания ванночку (ёмкость) для масла промывали бензином и вытирали насухо, а шары проворачивали на небольшой угол в оправках для подведения новой поверхности и контролировали с помощью оптического микроскопа, а цилиндр перетачивали на стенде тремя абразивными лентами разной зернистости до шероховатости 0,8 мм, что повышало точность экспериментальных результатов. После переточки цилиндр промывали и устанавливали на машину трения.



Рис. 3.11. Схема контроля противоизносных свойств трансмиссионных масел

Для контроля интенсивности процессов, протекающих на фрикционном контакте, через пару трения пропускался постоянный ток (100 мкА) от внешнего стабилизированного источника напряжения 3 В, что позволило по диаграммам записи изменения тока при изнашивании определить продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций и оценить влияние продуктов окисления и старения на интенсивность этих процессов и величину износа, а также обосновать критерий противоизносных свойств. Данная методика изложена в работах [152; 185–188].

3.6. Метод обработки экспериментальных данных

Сопоставимость экспериментальных данных и достоверность показаний приборов по определению коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости, испаряемости и противоизносных свойств проверяли по результатам пяти опытов на одном масле МТ-8п при температуре 150 °С. При этом использовалась литература [189–191]. Обработывали экспериментальные данные при помощи лицензионной программы Advanced Grapher [192].

Для оценки величины случайной ошибки результата измерения рассчитана среднеквадратическая ошибка по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (3.4)$$

где n – число измерений; \bar{x} – среднеарифметическое значение показателя; x_i – результаты измерений.

Значение измеряемой величины находили как среднеарифметическое из полученных результатов измерений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.5)$$

Погрешность i -го измерения Δx_i каждого прибора определяли как разность между среднеарифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при измерении, по формуле

$$\Delta x_i = [\bar{x} - x_i]. \quad (3.6)$$

Среднюю относительную погрешность (%) рассчитывали по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} 100. \quad (3.7)$$

Статистические данные обработки результатов испытаний приведены в табл. 3.6–3.8.

Принимаем, что в доверительные интервалы будут укладываться 90 % результатов всех измерений. Значения средней относительной погрешности каждого измерения и средней погрешности аппроксимации не превышают 9 %. Достоверность результатов измерения вязкости оценивалась при десятикратном испытании одного сорта масла. Среднее значение вязкости определяли как среднеарифметическое из 10 измерений.

**Данные статистической обработки и регрессионного анализа
результатов испытания товарного масла МТ-8п при температуре 150 °С**

Показатель	Коэффициент поглощения светового потока, K_{Π}								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Время испытания, ч									
Опыт 1	0,103	0,167	0,223	0,28	0,343	0,43	0,503	0,61	0,693
Опыт 2	0,099	0,162	0,221	0,278	0,34	0,445	0,5	0,59	0,69
Опыт 3	0,098	0,165	0,22	0,28	0,34	0,44	0,51	0,6	0,68
Опыт 4	0,101	0,17	0,224	0,285	0,339	0,43	0,49	0,6	0,69
Опыт 5	0,1	0,169	0,222	0,282	0,34	0,44	0,499	0,61	0,685
Среднее значение K_{Π} , \bar{x}	0,1002	0,1666	0,222	0,2804	0,3404	0,437	0,5004	0,602	0,6876
Средняя квадратичная погрешность S_n	0,0019	0,0032	0,0016	0,0036	0,0015	0,0067	0,0072	0,0084	0,0051
Средняя относительная погрешность, %	1,44	1,49	0,54	0,88	0,31	1,28	0,98	1,06	0,59
Доверительный интервал $\Delta t \bar{x}$	$\pm 0,004$	$\pm 0,006$	$\pm 0,003$	$\pm 0,007$	$\pm 0,003$	$\pm 0,013$	$\pm 0,014$	$\pm 0,017$	$\pm 0,01$
Уравнение регрессии	$K_{\Pi} = 9,89 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,01 \cdot t + 0,03$								
Коэффициент корреляции	0,9997								
Среднее квадратическое отклонение	0,26								
Средняя погрешность аппроксимации	0,39								
Показатель	Коэффициент относительной вязкости, K_{μ}								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Опыт 1	0,843	0,814	0,835	0,843	0,907	0,917	0,924	0,962	0,97
Опыт 2	0,84	0,82	0,83	0,85	0,86	0,92	0,93	1,004	0,99
Опыт 3	0,837	0,814	0,831	0,852	0,89	0,922	0,935	1,02	1,03
Опыт 4	0,842	0,822	0,84	0,845	0,898	0,91	0,934	0,99	1,05
Опыт 5	0,835	0,81	0,838	0,85	0,9	0,91	0,92	1,02	1,02
Среднее значение K_{μ} , \bar{x}	0,8394	0,816	0,8348	0,848	0,891	0,9158	0,9286	0,9992	1,012
Средняя квадратичная погрешность S_n	0,0034	0,0049	0,0043	0,0038	0,0184	0,0056	0,0065	0,0243	0,0319
Средняя относительная погрешность %	0,32	0,49	0,41	0,38	1,44	0,51	0,57	1,86	2,53
Доверительный интервал $\Delta t \bar{x}$	$\pm 0,007$	$\pm 0,01$	$\pm 0,009$	$\pm 0,008$	$\pm 0,037$	$\pm 0,011$	$\pm 0,013$	$\pm 0,049$	$\pm 0,064$
Уравнение регрессии	$K_{\mu} = -(6,236 \cdot 10^{-9}) \cdot t^5 + (1,1432 \cdot 10^{-6}) \cdot t^4 - (7,9307 \cdot 10^{-5}) \cdot t^3 + 0,0025 \cdot t^2 - 0,0316 \cdot t + 0,9465$								
Коэффициент корреляции	0,9675								
Среднее квадратическое отклонение	0,54								
Средняя погрешность аппроксимации	0,66								

Окончание табл. 3.6

Показатель	Испаряемость G , г								
	Опыт 1	0,8	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5
Опыт 2	0,9	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4
Опыт 3	0,85	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4
Опыт 4	0,7	0,7	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
Опыт 5	0,7	0,6	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Среднее значение G , \bar{x}	0,64	0,6	0,44	0,54	0,46	0,48	0,42	0,52	0,42
Средняя квадратичная погрешность, S_n	0,114	0,0707	0,0548	0,0548	0,0548	0,0447	0,0447	0,0447	0,0447
Средняя относительная погрешность, %	5,71	6,67	10,91	8,89	10,43	6,67	7,62	6,15	7,62
Доверительный интервал $\Delta t \bar{x}$	$\pm 0,228$	$\pm 0,141$	$\pm 0,11$	$\pm 0,11$	$\pm 0,11$	$\pm 0,089$	$\pm 0,089$	$\pm 0,089$	$\pm 0,089$
Уравнение регрессии	$G = - (7,3194 \cdot 10^{-4}) \cdot t^2 + 0,1353 \cdot t + 0,4937$								
Коэффициент корреляции	0,9974								
Среднее квадратическое отклонение	0,04								
Средняя погрешность аппроксимации	8,13								

Таблица 3.7

**Показания вискозиметра при температуре 100 °С минерального масла
МТ-8п и результаты статической обработки**

Показатель	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
Показания вискозиметра, сСт	9,3	9,1	9,3	9,5	9,3
	9,3	9,1	9,1	9,1	9,3
	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
	9,1	8,9	8,9	8,9	9,1
	9,1	8,9	9,1	8,9	9,1
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Среднее значение вязкости, сСт	9,06	8,98	9,02	9,02	9,06
Средняя квадратичная ошибка, S_n	0,16	0,1	0,14	0,19	0,16
Средняя относительная погрешность, %	2	1	2	2	2
Доверительный интервал $\Delta t \bar{x}$	$\pm 0,32$	$\pm 0,2$	$\pm 0,28$	$\pm 0,38$	$\pm 0,32$

Таким образом, при испытании на изнашивание достаточно проводить два опыта; при этом абсолютная погрешность не будет превышать 3 %.

**Данные статической обработки результатов испытания
трансмиссионного масла МТ-8п на противоизносные свойства**

Показатель	Износ U , мм			
	левый шар	центральный шар	правый шар	среднее значение
Опыт № 1	0,30	0,26	0,28	0,280
Опыт № 2	0,28	0,30	0,28	0,287
Опыт № 3	0,26	0,30	0,30	0,287
Опыт № 4	0,26	0,28	0,30	0,280
Опыт № 5	0,30	0,30	0,28	0,293
Среднее значение	–	–	–	0,2854
Абсолютная погрешность опыта	Минимальная 1,89 %			
	Максимальная 2,66 %			

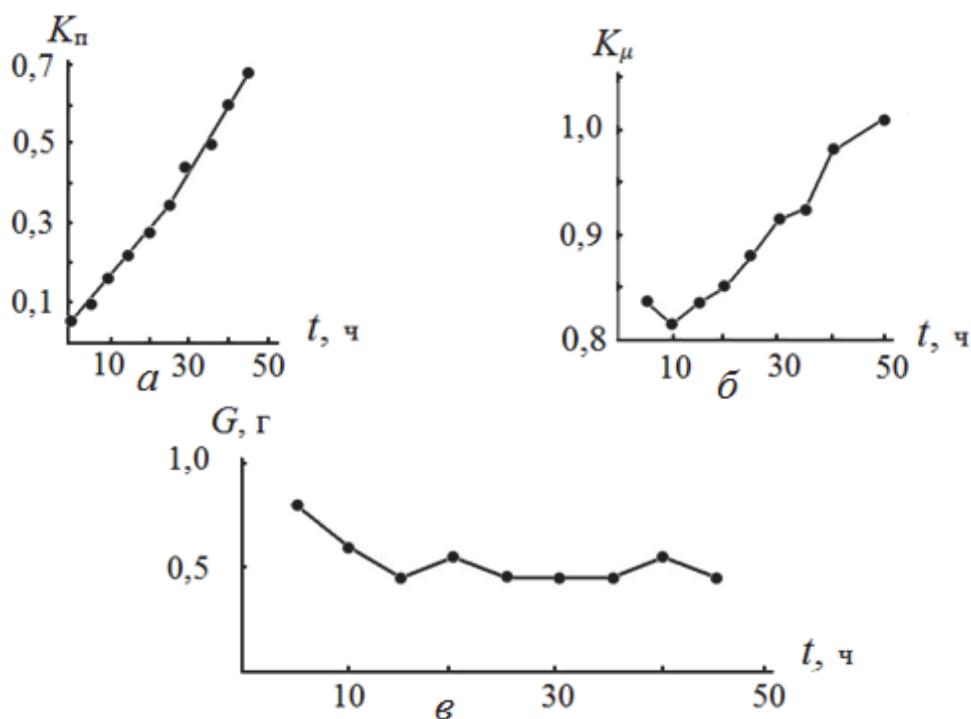


Рис. 3.12. Зависимости коэффициента поглощения светового потока K_p (а), коэффициента относительной вязкости K_μ (б) и испаряемости G (е) от времени окисления минерального трансмиссионного масла МТ-8п при статистической обработке данных

Графические данные изменения коэффициента поглощения светового потока, коэффициента относительной вязкости и испаряемости минерального трансмиссионного масла МТ-8п при окислении после статистической обработки представлены на рис. 3.12.

4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

4.1. Теоретические аспекты механизма окисления смазочных масел

Фундаментальные исследования термоокислительных процессов в масле проведены Н. И. Черножуковым и С. Э. Крейном [193]. Ими установлено, что не все углеводороды, входящие в состав моторного масла, обладают одинаковой термоокислительной стабильностью. Наиболее устойчивы ароматические углеводороды без боковых цепей, затем цикланы, а самыми неустойчивыми являются алканы. Всем перечисленным группам углеводородов свойственно уменьшение термоокислительной стабильности по мере увеличения числа атомов углерода в молекуле, а ароматическим и цикланам – при наличии боковых цепей. Термоокислительная стабильность алканов резко снижается при температурах выше 200 °С, т. е. при температурах, характерных для некоторых деталей двигателей внутреннего сгорания. Моторное масло представляет собой сложную смесь различных углеводородов, основную часть которых составляют полицикланы. Наличие в маслах ароматических углеводородов повышает их термоокислительную стабильность, причем для каждого группового состава масла существует оптимальная концентрация ароматических углеводородов, при которой термоокислительная стабильность масла достигает максимума. В реальных условиях работы масла в двигателях наблюдается действие катализаторов, которыми являются в основном металлические мелкодиспергированные продукты изнашивания двигателя и результат действия ингибиторов окислительных процессов. Ингибирующими свойствами обладают сами продукты окислительной полимеризации, например смолы. При небольшой концентрации в масле смолы бывают эффективными антиокислителями. Основным фактором, определяющим интенсивность окислительных процессов, происходящих в моторном масле – это температура. При низких температурах (до 30–40 °С) процессы окисления масел идут настолько медленно, что практически их можно не учитывать. Масла в этих условиях могут храниться годами в резервуарах и бочках, не изменяя своих свойств. Но уже при повышении температуры до 70–80 °С (т. е. до значений температуры масла в поддоне картера двигателя) окислитель-

ные процессы резко ускоряются, вызывая интенсивное старение масла. Особенно быстро и глубоко происходит окисление масла при высоких температурах и мелкораспыленном его состоянии, т. е. в условиях, характерных для двигателей. В системе смазки масло находится в состоянии интенсивной циркуляции, барботажа и тонкодисперсионного распыливания при непрерывном контакте с воздухом. В зонах поршневых колец, направляющих клапанов, на поверхности поршней и цилиндров, в зазорах подшпиков масла находится в виде тонких пленок на горячих металлических поверхностях. Все это создает условия для его окисления и окислительной полимеризации. Неблагоприятно на работоспособность масла влияют продукты, образующиеся в процессе его работы: нагар, лакообразные пленки и липкий вязкий осадок (шлам).

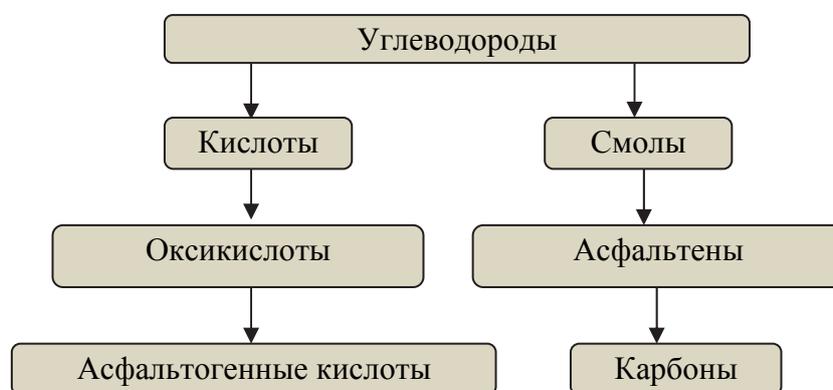


Рис. 4.1. Схема окисления моторных масел

Общепринят порядок окисления масел в двигателе, представленный на рис. 4.1.

4.2. Результаты испытания минерального трансмиссионного масла ТСзп-8

Данное масло производится по ТУ 38.1011280–89 и является маловязким, низкозастывающим, загущенным стойкой против деструкции вязкостной присадкой, содержащим также противозадирную, противоизносную, антиокислительную и антипенную присадки. Предназначено для смазывания агрегатов трансмиссий, имеющих планетарные редукторы, коробок передач и некоторых систем гидроуправления мобильных транспортных средств [194]. По классификации трансмиссионных масел (ГОСТ 17479.2–85) масло ТСзп-8 относится к группе ТМ-3-9. Рекомендуемая область применения: цилиндрические, конические, спирально-конические и гипоидные

передачи, работающие при контактных напряжениях до 2 500 МПа и температуре масла в объёме до 150 °С.

На рис. 4.2 представлен результат испытания трансмиссионного масла ТСзп-8.

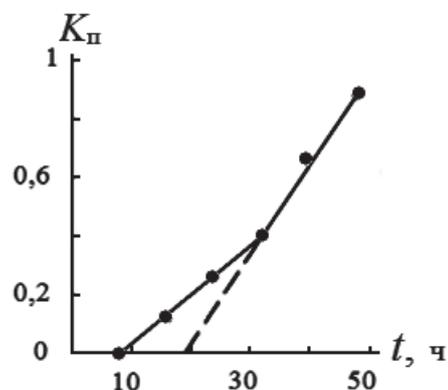


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента поглощения светового потока от времени окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 при температуре 150 °С

Вязкость окисленного масла оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_{μ} по выражению

$$K_{\mu} = \mu_{\text{ок}} / \mu_{\text{тов}}, \quad (4.1)$$

где $\mu_{\text{ок}}$ и $\mu_{\text{т}}$ – соответственно вязкости окисленного и товарного масел, сСт ($\text{мм}^2/\text{с}$).

Установлено (рис. 4.3, а), что вязкость при окислении масла увеличивается по линейной зависимости и за 48 ч испытания она вырастает на 20 %. Известно [195], что вязкость масел в процессе эксплуатации не должна увеличиваться более чем на 20–30 %, поскольку это увеличивает потери на трение и снижает КПД трансмиссии. Испаряемость масла (рис. 4.3, б) увеличивается по экспоненте. За 48 ч испытания она составила 21,1 г, а за первые 8 ч – 6,1 г.

Полученные результаты исследования показали, что термоокислительная стабильность масла зависит от скоростей изменения коэффициента поглощения светового потока и испаряемости, так как вязкость окисляемого масла определяется концентрацией продуктов окисления, их составом, а также массой испарившихся лёгких фракций и деструкцией вязкостной присадки. В этой связи для оценки термоокислительной стабильности смазочных масел предложен коэффициент $E_{\text{тос}}$, учитывающий эти два параметра [105; 115; 117; 121; 126; 196–198]

$$E_{\text{тос}} = K_{\text{п}} + K_{\text{Г}}, \quad (4.2)$$

где $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{Г}}$ – коэффициенты поглощения светового потока и испаряемости,

$$K_{\text{Г}} = m/M, \quad (4.3)$$

где m – масса испарившегося масла за определённый отрезок времени; M – масса пробы масла после окисления за тот же период окисления.

Коэффициент $E_{\text{тос}}$ безразмерная величина (рис. 4.4). Тенденция изменения коэффициента термоокислительной стабильности аналогична зависимости $K_{\text{п}} = f(t)$ (рис. 4.2). Различия заключаются лишь в том, что область сопротивляемости окислению сократилась с 8 до 5 ч, а начало образования продуктов окисления с бóльшей оптической плотностью сократилось с 20 до 14 ч за счёт влияния испаряемости масла при окислении.

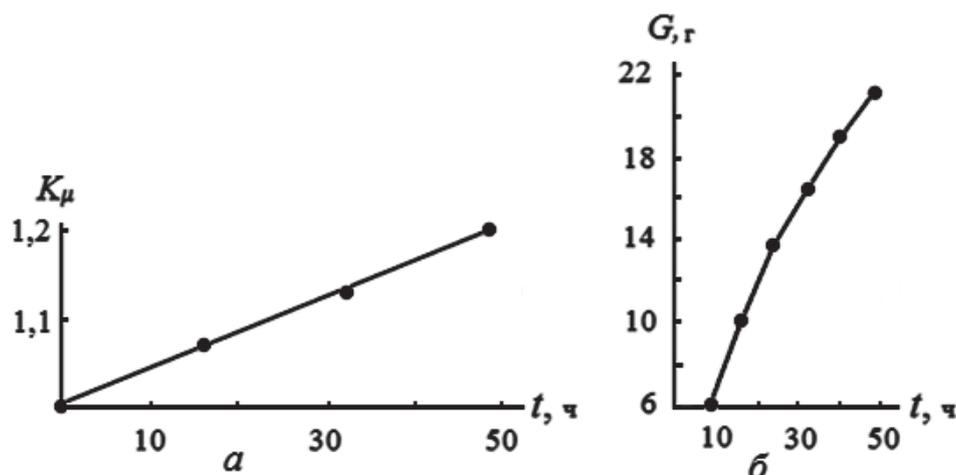


Рис. 4.3. Зависимости коэффициента относительной вязкости $K_{\mu}(a)$ и испаряемости G (б) от времени окисления трансмиссионного масла ТСзп-8

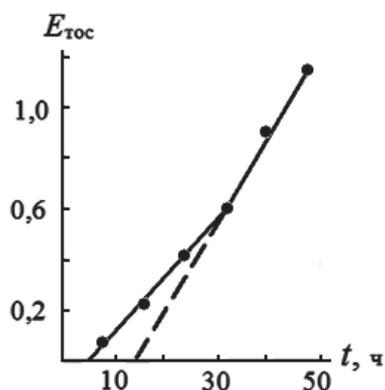


Рис. 4.4. Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8

Процессы окисления и испарения оценивались скоростью их изменения во времени (рис. 4.5, а и б). Установлено, что скорость окисления и испарения непостоянны. Объясняется этот факт процессами самоорганизации [57; 58], согласно которым избыточная тепловая энергия поглощается продуктами окисления и испарения, а в процессе окисления происходит ее перераспределение между продуктами с различной оптической плотностью и испарения. Так, при увеличении скорости окисления $V_{K_{\text{п}}}$ происходит уменьшение скорости испарения V_G .

Перераспределение избыточной энергии наблюдается при переходе начальных продуктов окисления в более энергоёмкие (с большей оптической плотностью), при этом скорость окисления уменьшается (рис. 4.5, *a*, время 24–32 ч). Поэтому можно утверждать, что процесс окисления является периодическим: вначале образуются менее энергоёмкие продукты, при достижении определённой концентрации часть их переходит в более энергоёмкие. Этот процесс характеризуется колебанием концентрации начальных продуктов окисления и периодическим увеличением концентрации энергоёмких продуктов окисления. Интенсивность процесса самоорганизации предложено оценивать коэффициентом K_c , (Γ^{-1}) по выражению [120]

$$K = VK_{\Pi} / V_G, \quad (4.4)$$

где VK_{Π} и V_G – скорости окисления и испаряемости соответственно.

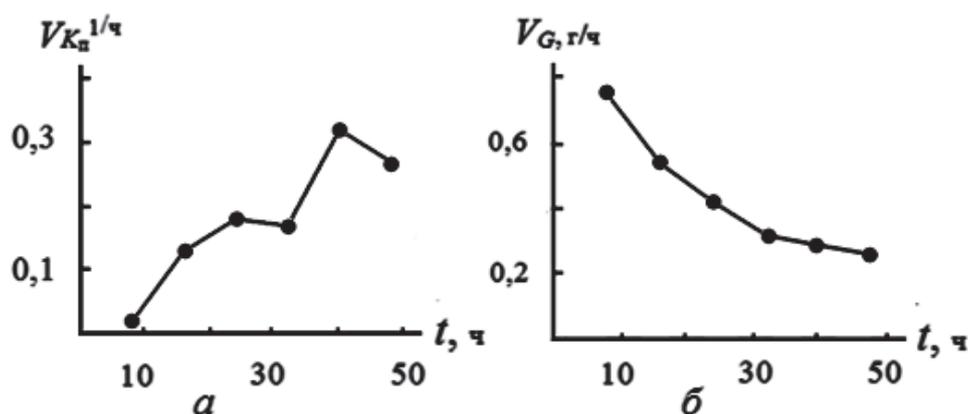


Рис. 4.5. Зависимости скоростей окисления VK_{Π} (*a*) и испаряемости V_G (*б*) от времени испытания трансмиссионного масла ТСзп-8

Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации (рис. 4.6) представляет ломаную кривую, подтверждающую наличие перераспределения тепловой энергии. Так, в период времени испытания от 8 до 16 ч соотношение скоростей окисления и испаряемости уменьшается одинаково, в период от 16 до 32 ч скорость окисления преобладает над скоростью испарения, от 32 до 40 ч (в момент образования более энергоёмких продуктов окисления) скорость окисления резко увеличивается, а в период времени от 40 до 48 ч соотношение уменьшается за счет увеличения испаряемости масла.

Динамика окисления трансмиссионного масла при циклическом изменении температуры испытания [99; 103] представлена зависимостями коэффициента поглощения светового потока от температуры и времени испытания (рис. 4.7). Масло выдержало пять циклов: три цикла повышения температуры от 120 до 150 °С и два цикла понижения температуры от 150

до 120 °С в течение 138 ч. При этом коэффициент $K_{\text{п}}$ составил 0,8 ед. Установлено, что процесс окисления начинается при температуре 140 °С (или после 24 ч испытаний).

Применение метода циклического изменения температуры при оценке термоокислительной стабильности позволяет сравнивать различные смазочные материалы по количеству циклов повышения и понижения температуры испытания, а по скоростям окисления и испарения в каждом из циклов определять температуры, при которых эти параметры минимальны.

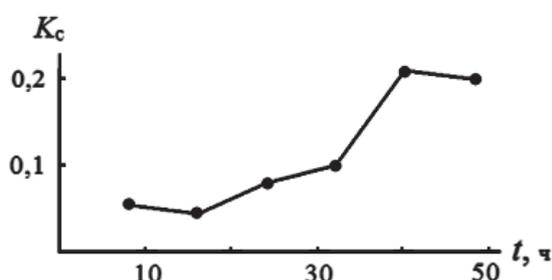


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента интенсивности процесса самоорганизации от времени окисления трансмиссионного масла ТСЗп-8

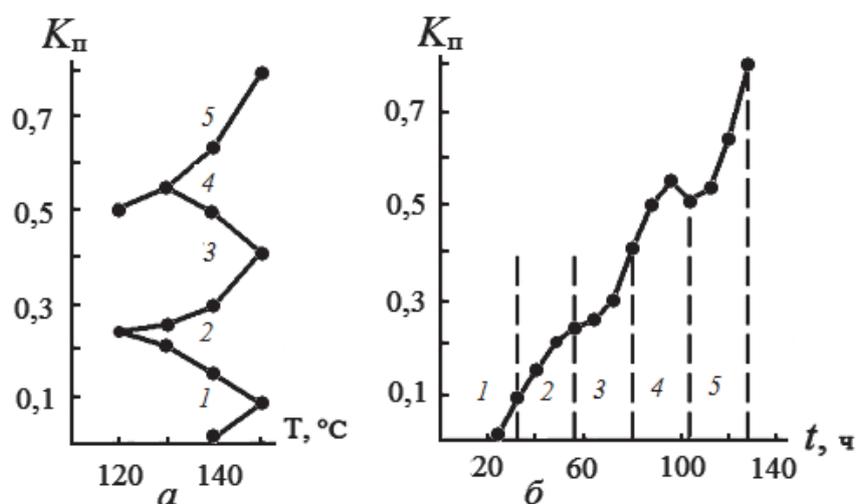


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента поглощения светового потока от температуры термостатирования (а) и времени испытания (б) при циклическом изменении температуры: чётные цифры – циклы понижения температуры; нечётные – циклы повышения температуры

Влияние температуры на процессы окисления и испарения оценивалось их скоростями (рис. 4.8, а, б). Показано, что во втором цикле понижения температуры до 120 °С окислительные процессы продолжают, однако в четвёртом цикле понижения температуры скорость окисления приобретает отрицательное значение. Испаряемость масла в циклах понижения

температуры до 120 °С не прекращается, поэтому температура работоспособности масла ТСзп-8 должна быть ниже 150 °С, что не соответствует требованиям ГОСТ 17479.2–85. Второй метод обоснования критерия термоокислительной стабильности основан на физической имитационной модели, заключающейся в том, что сброс избыточной тепловой энергии происходит по двум каналам: изменению оптических свойств смазочного масла и испаряемости. Изменения этих показателей зависят от сопротивляемости смазочного масла температурным воздействиям, а так как эти процессы протекают одновременно и параллельно, то эквивалентное сопротивление R_3 можно определить, применив законы электротехники при параллельном соединении сопротивлений

$$R_3 = \frac{K_{\Pi} K_G}{K_{\Pi} + K_G}, \quad (4.5)$$

где K_{Π} и K_G – коэффициенты поглощения светового потока и испаряемости.

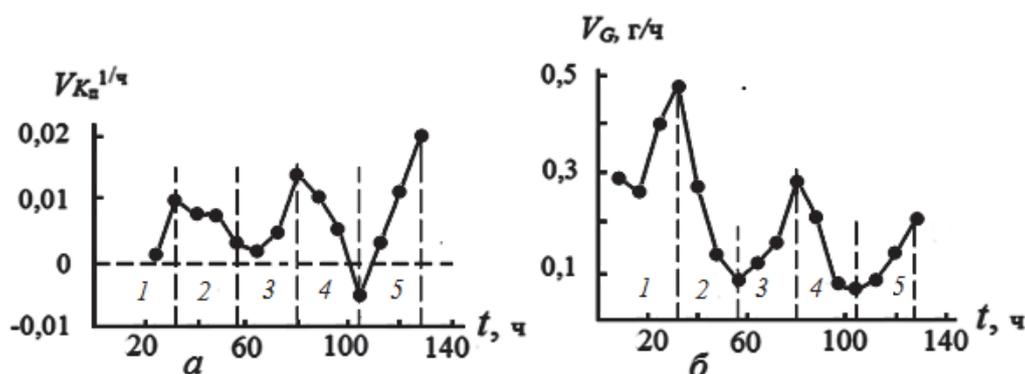


Рис. 4.8. Зависимости скоростей окисления VK_{Π} (а) и испарения V_G (б) от времени окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 при циклическом изменении температуры испытания: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры от 120 до 150 °С; 2, 4 – циклы понижения температуры от 150 до 120 °С

Если принять, что сопротивление любого смазочного материала равно единице, то при его термостатировании в зависимости от качества присадок и базовой основы сопротивляемость будет различна, что позволит их сравнивать по этому показателю, определяемому выражением [199]

$$R_o = 1 - \frac{K_{\Pi} K_G}{K_{\Pi} + K_G}, \quad (4.6)$$

где R_o – коэффициент, характеризующий сопротивляемость исследуемого масла окислению.

Зависимости коэффициента сопротивления окислению от времени окисления трансмиссионного масла ТСзп-8 и коэффициента поглощения светового потока представлены на рис. 4.9, *а*, *б*. Зависимость $R_o=f(t)$ имеет линейный характер и описывается регрессионным уравнением

$$R_o = -0,00453t + 1,01, \quad (4.7)$$

где 0,00453 – коэффициент, характеризующий скорость изменения сопротивления окислению; 1,01 – коэффициент, характеризующий потенциальное сопротивление окислению товарного масла. Коэффициент корреляции составил 0,9924.

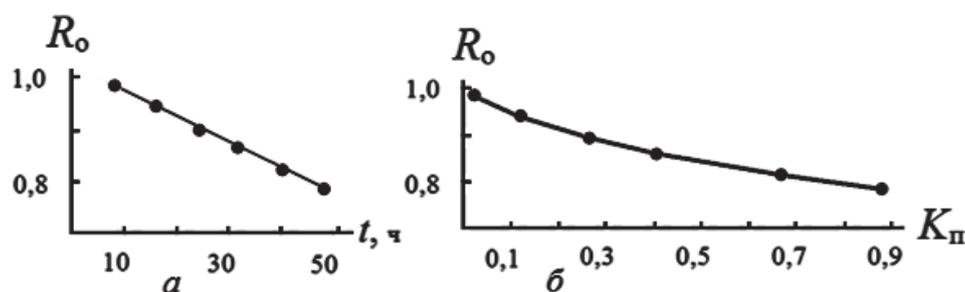


Рис. 4.9. Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 от времени окисления (*а*) и коэффициента поглощения светового потока (*б*)

Зависимость коэффициента сопротивления от коэффициента поглощения светового потока (рис. 4.9, *б*) описывается уравнением второго порядка, а регрессионное уравнение имеет следующий вид:

$$R_o = 0,1949 \cdot K_{п}^2 - 0,3925 \cdot K_{п} + 0,993, \quad (4.8)$$

где значение коэффициента 0,3925 характеризует скорость изменения коэффициента сопротивления окислению, а значение 0,1949 – его ускорение при увеличении коэффициента поглощения светового потока. Коэффициент корреляции составил 0,994.

Зависимости коэффициента сопротивления окислению от температуры и коэффициента поглощения светового потока при циклическом изменении температуры окисления в диапазоне температур от 120 до 150 °С и от 150 до 120 °С представлены на рис. 4.10. Установлено, что, независимо от циклов повышения или понижения температуры окисления, коэффициент сопротивления окислению уменьшается (рис. 4.10, *а*). Однако наибольшее уменьшение коэффициента сопротивления окислению наблюдается при температуре 150 °С.

Зависимость коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока при циклическом изменении темпера-

туры окисления (рис. 4.10, б) описывается регрессионным уравнением вида

$$R_{\text{оц}} = 0,12079 \cdot K_{\text{п}}^2 - 0,3742 \cdot K_{\text{п}} + 0,9785, \quad (4.9)$$

где значение коэффициента 0,3742 характеризует скорость изменения коэффициента сопротивления окислению, а значение 0,12079 – его ускорение при увеличении коэффициента поглощения светового потока. Коэффициент корреляции составил 0,9976.

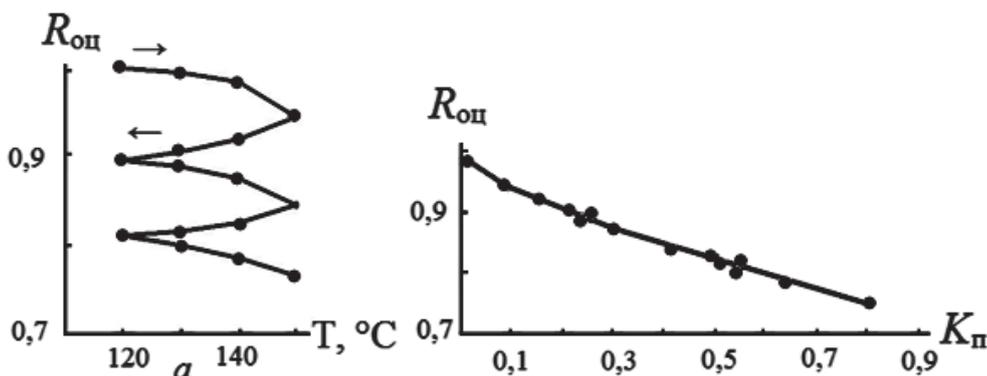


Рис. 4.10. Зависимости коэффициента сопротивления окислению от температуры испытания (а) и коэффициента поглощения светового потока (б) при циклическом изменении температуры окисления минерального трансмиссионного масла ТСзп-8

Сравнив зависимости $R_o=f(K_{\text{п}})$ и $R_{\text{оц}}=f(K_{\text{п}})$ (рис. 4.9, б и 4.10, б) видим, что при коэффициенте поглощения светового потока, например, 0,8 ед. коэффициент сопротивления окислению при статической температуре испытания 150 °С равен 0,8 ед., а при циклической – 0,75 ед. Снижение значения коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры окисления вызвано увеличением времени окисления.

Изменение противоизносных свойств трансмиссионного масла ТСзп-8 оценивалось по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах, среднеарифметическому значению площади пятна износа на трех шарах, коэффициенту электропроводности фрикционного контакта $K_{\text{э}}$ и продолжительности формирования номинальной площади контакта $t_{\text{фпк}}$, определяемых по диаграммам записи тока согласно методике, описанной в работе [200]. Регистрация коэффициента $K_{\text{э}}$ и времени $t_{\text{фпк}}$ производилась при наступлении установившегося изнашивания. В этом случае коэффициент $K_{\text{э}}$ приобретал минимальное значение, а время $t_{\text{фпк}}$ соответствовало упругим деформациям в контакте.

Зависимости этих параметров от коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ представлены на рис. 4.10. Установлено (рис. 4.11, а), что проти-

воизносные свойства масла при малых значениях $K_{\text{п}}$, равных 0,13 ед., понижаются на 11 %, после чего они повышаются до значения коэффициента $K_{\text{п}} = 0,45$ ед. и становятся выше, чем у товарного масла (точка на ординате) на 6 %; затем наступает повторное понижение до значения $K_{\text{п}} = 0,64$ ед. с последующей стабилизацией. Такое изменение противоизносных свойств объясняется различием в составе и свойствах продуктов окисления и их склонностью к формированию на поверхностях.

Показано, что при окислении масла уменьшается коэффициент K_3 (рис. 4.11, б) за счёт разделения поверхностей трения граничным слоем высокого электрического сопротивления и низкого значения времени формирования номинальной площади фрикционного контакта, не превышающего 10 мин (рис. 4.11, в). На основании полученных результатов исследования противоизносных свойств при окислении трансмиссионного масла предложен критерий противоизносных свойств Π (мм⁻¹), определяемый по формуле (1,25) [108–110; 115].

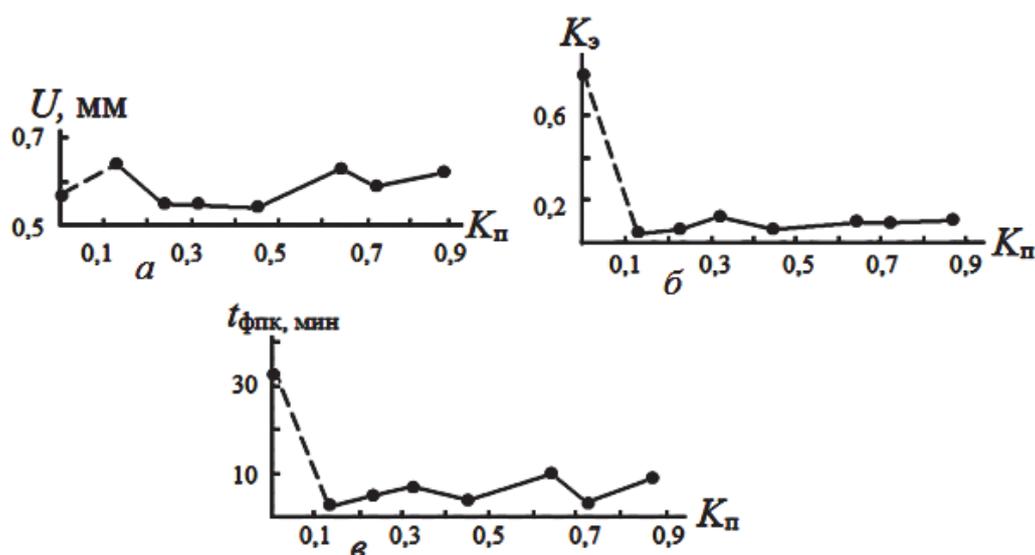


Рис. 4.11. Зависимости диаметра пятна износа $U(a)$, коэффициента электропроводности фрикционного контакта K_3 (б) и времени формирования номинальной площади контакта $t_{\text{фпк}}$ от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла ТСзп-8 (в)

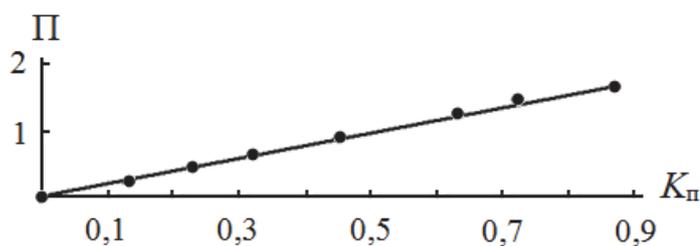
Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента $K_{\text{п}}$ представлена на рис. 4.12 и описывается линейным уравнением

$$\Pi = 2 \cdot K_{\text{п}}. \quad (4.10)$$

Данный критерий характеризует условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, а его зависимость от коэффициента поглощения светового потока является эмпири-

ческой, так как площадь контакта выражена среднеарифметическим значением диаметра пятна износа.

Рис. 4.12. Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла ТСзп-8



На рис. 4.13 представлены зависимости среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта на трех шарах и критерия противоизносных свойств Π_s (рассчитанного по площади контакта) от коэффициента поглощения светового потока. Сравнив зависимости $U = f(K_p)$ (рис. 4.11, а) и $S = f(K_p)$ (рис. 4.13, а), видим, что применение диаметра в качестве показателя износа более наглядно при оценке влияния продуктов окисления на износ. Однако тенденция к изменению противоизносных свойств под влиянием концентрации продуктов окисления сохраняется.

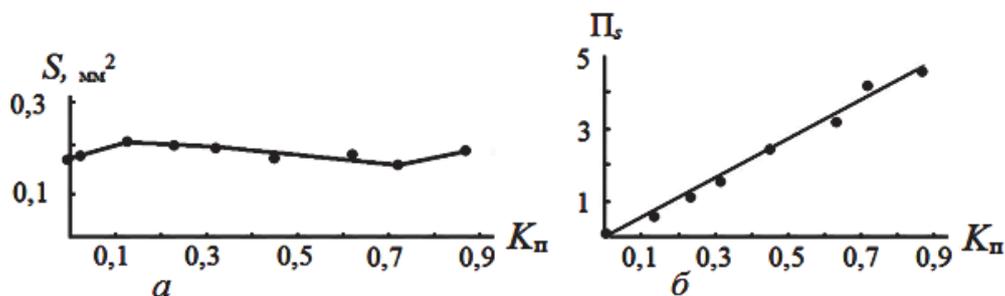


Рис. 4.13. Зависимости среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта (а) и критерия противоизносных свойств (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 и температуре 150 °С

Изменение критерия противоизносных свойств $\Pi_s (\text{мм}^2)^{-1}$, определяемого отношением коэффициента поглощения светового потока к номинальной площади фрикционного контакта S (рис. 4.13, б), описывается линейным регрессионным уравнением вида

$$\Pi_s = 5,333K_p. \quad (4.11)$$

Коэффициент корреляции составил 0,985.

Таким образом, для вычисления критерия противоизносных свойств можно пользоваться как диаметром, так и площадью пятна износа. Данный критерий применяется для сравнения различных масел, обоснования их ресурса и зависимости противоизносных свойств от состава продуктов окис-

ления [116; 201–203], а также оценки триботехнических свойств работающих масел и масел, находящихся на длительном хранении.

Механохимические процессы, протекающие на фрикционном контакте, предложено оценивать коэффициентом интенсивности $K_{\text{мхп}}$, (мм) по формуле (4.12) (рис. 4.14)

$$K_{\text{мхп}} = UK_{\text{э}}, \quad (4.12)$$

где U – параметр износа, мм; $K_{\text{э}}$ – коэффициент электропроводности фрикционного контакта, ед.

Параметр износа U характеризует механическую составляющую при изнашивании, а коэффициент электропроводности фрикционного контакта $K_{\text{э}}$ – химическую составляющую в области упругих деформаций.

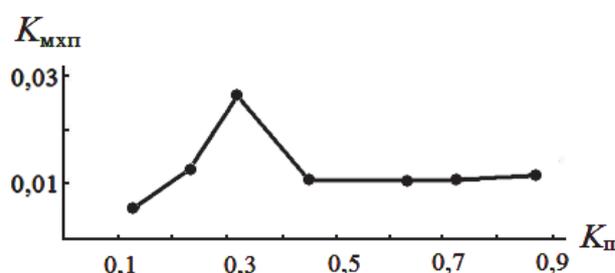


Рис. 4.14. Зависимость коэффициента интенсивности механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте, от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла ТСзп-8

Согласно полученным данным (рис. 4.14) установлены две области различной интенсивности механохимических процессов: первая область – при значениях коэффициента $K_{\text{п}}$ до 0,32 ед., где механохимические процессы ускоряются, а вторая область – при $K_{\text{п}} > 0,32$ ед., где эти процессы замедляются и переходят к стабилизации. Поэтому можно утверждать, что при увеличении концентрации продуктов окисления до значения коэффициента $K_{\text{п}} = 0,32$ ед. на поверхностях трения формируются адсорбционные слои, а при $K_{\text{п}} > 0,3$ ед. изнашивание протекает при формировании на поверхностях трения хемосорбционных граничных слоёв.

4.3. Результаты испытания минерального трансмиссионного масла МС-20

Масло МС-20 селективной очистки применяется в поршневых двигателях самолётов, в составе маслосмесей с маслами МС-8 и МС-8п в смазочных системах турбовинтовых двигателей, в осевых шарнирах втулок винтов вертолётов, для смазывания мотокомпрессоров газоперекачивающих агрегатов, а также в качестве базового для некоторых моторных масел и смазок. Кинематическая вязкость при 100°C – не менее

20,5 мм²/с, индекс вязкости – не менее 80, температура вспышки в открытом тигле – не ниже 265 °С, температура застывания – не выше 18 °С.

Данное масло испытывалось при статической температуре 150 °С и циклической в диапазоне от 120 до 150 °С. После каждых 8 ч испытания определяли оптические свойства, вязкость и испаряемость. Продолжительность испытаний определяли временем достижения коэффициента поглощения светового потока, равного приблизительно значению 0,8 ед.

Зависимости коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости и испаряемости от времени окисления представлены на рис. 4.15. Установлено, что зависимость коэффициента поглощения светового потока от времени окисления (рис. 4.15, а) имеет изгиб при $K_{\Pi} = 0,4$ ед., который вызван образованием двух видов продуктов окисления с различной оптической плотностью. Начало образования более энергоёмких продуктов начинается после 40 ч испытания и определяется продлением участка зависимости после изгиба (до пересечения с осью абсцисс).

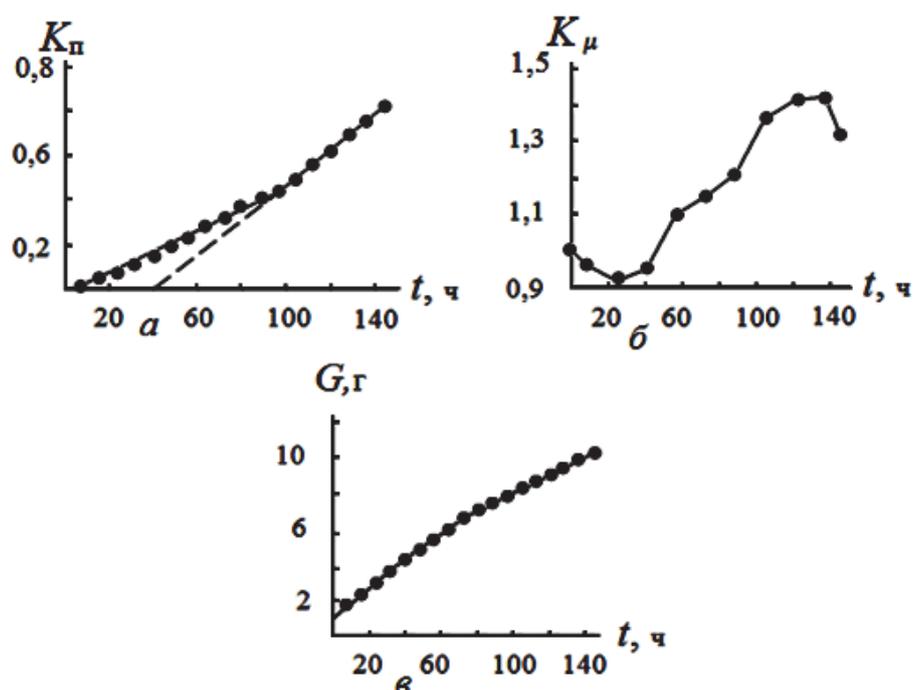


Рис. 4.15. Зависимости коэффициентов поглощения светового потока K_{Π} (а), относительной вязкости K_{μ} (б) и испаряемости G (в) от времени термостатирования трансмиссионного масла МС-20

Вязкость масла (рис. 4.15, б), выраженная коэффициентом относительной вязкости, в начале испытания (до 40 ч) уменьшается на 7 %, а после 136 ч она увеличивается на 43 %. Дальнейшее увеличение времени окисления понижает вязкость. Необходимо отметить, что понижение вязкости происходит в период образования первичных продуктов окисления, что может объясняться температурной деструкцией вязкостной присадки.

Испаряемость масла МС-20 (рис. 4.15, в) возрастает по экспоненте при увеличении времени окисления. За время испытания 144 ч она составила 10,3 г. Продление зависимости до пересечения с осью абсцисс определяет концентрацию в масле лёгких фракций и воды, которая составляет 1 г.

Коэффициент термоокислительной стабильности $E_{\text{тос}}$ (рис. 4.16) характеризует количество тепловой энергии, поглощённой продуктами окисления и испарения. Показано, что данная зависимость имеет изгиб, вызванный образованием двух видов продуктов окисления.

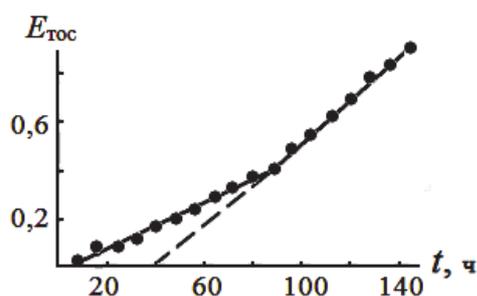


Рис. 4.16. Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности от времени термостатирования трансмиссионного масла МС-20 при температуре 150 °С

Эффективность применения фотометрического метода контроля термоокислительной стабильности масел различного назначения показана в работах [113; 114; 123; 204; 205]. Интенсивность процессов, протекающих в смазочном масле при термостатировании, оценивалась скоростями окисления и испарения (рис. 4.17, а и б). Данные зависимости представляют собой ломаную кривую, вызванную перераспределением избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения, характеризующую процесс самоорганизации. Показано, что в начале образования более энергоёмких продуктов окисления (> 40 ч) скорость окисления уменьшается, что подтверждает наличие процесса преобразования первичных продуктов в более энергоёмкие. Появление более энергоёмких продуктов вызывает значительные колебания скорости окисления ($t > 62$ ч) с сохранением тенденции её увеличения. Скорость испарения (рис. 4.17, б) в течение 84 ч испытания уменьшается, а затем стабилизируется, однако колебания скорости вызваны явлением перераспределения избыточной тепловой энергии между продуктами окисления и испарения. Это подтверждается изменениями в противофазах скоростей окисления и испарения. Резкое падение скорости испарения в начале окисления масла вызвано наличием в товарном масле лёгких фракций и воды.

Процессы самоорганизации, протекающие в смазочном масле, оценивались коэффициентом их интенсивности (рис. 4.18).

Установлено, что в период образования первичных продуктов окисления (40 ч) коэффициент интенсивности K_c увеличивается по линейной зависимости, а с появлением более энергоёмких продуктов он подвержен

колебаниям из-за процессов перераспределения тепловой энергии, влияющих на скорости окисления и испарения.

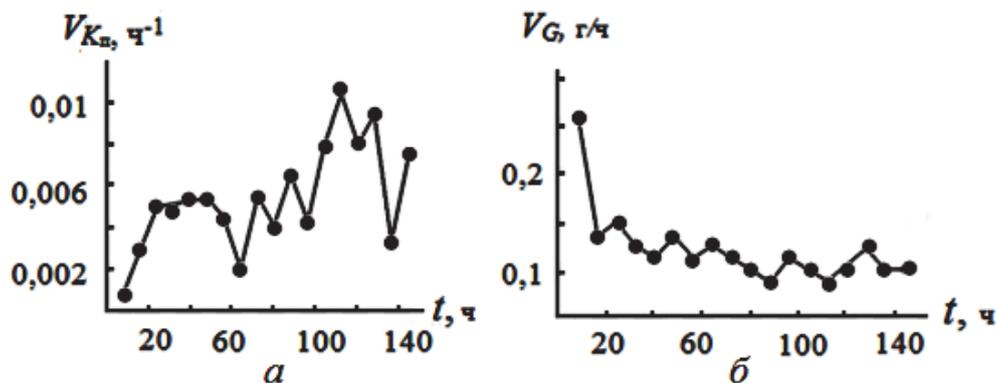
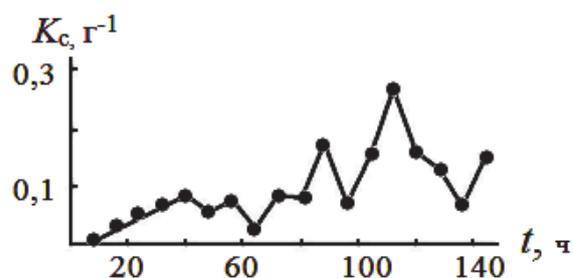


Рис. 4.17. Зависимости скоростей окисления V_{Kn} (а) и испарения V_G (б) от времени окисления трансмиссионного масла МС-20

Рис. 4.18. Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации от времени окисления трансмиссионного масла МС-20



При циклическом изменении температуры (рис. 4.19, а, б) масло МС-20 выдержало семь циклов ее повышения от 120 до 150 °С и шесть циклов понижения от 150 до 120 °С, т. е. всего 320 ч, причём коэффициент поглощения светового потока составил 0,85 ед., испаряемость масла за 320 ч – 9,8 г.

Испытания масла при циклическом изменении температуры применялись с целью определения температур начала окисления и испарения. Для этого построены зависимости скоростей окисления и испарения в циклах повышения и понижения температуры окисления (рис. 4.20, а, б).

Установлено, что в циклах понижения температуры скорость окислительных процессов замедляется практически до нуля, а в циклах 2, 10, 12 она приобретает отрицательные значения, поэтому температурой начала окисления масла можно считать 130 °С. Испаряемость масла (рис. 4.20, б) в циклах понижения температуры 6, 10 и 12 приобретает нулевое значение, а при температуре 150 °С она приобретает скорость не более 0,075 г/ч, поэтому температурой начала испарения можно считать температуру 130 °С, при которой скорость испарения колеблется от 0 до 0,02 г/ч.

Коэффициент интенсивности процессов самоорганизации (рис. 4.21) подвержен большим колебаниям, а в циклах 2, 10, 12 понижения температуры от 150 до 120 °С приобретают отрицательные значения, т. е. в этот период окислительные процессы останавливаются.

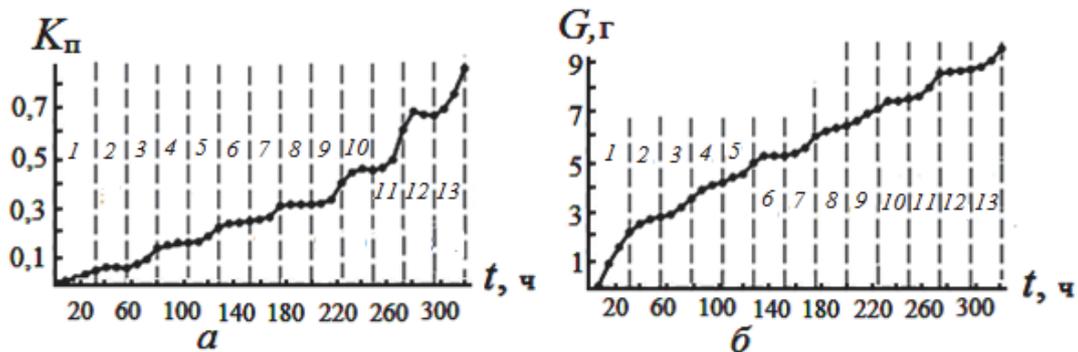


Рис. 4.19. Зависимости коэффициента поглощения светового потока (а) и испаряемости (б) от времени испытания трансмиссионного масла МС-20 при циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С: нечетные числа – циклы повышения температуры испытания от 120 до 150 °С; четные – циклы понижения температуры испытания от 150 до 120 °С

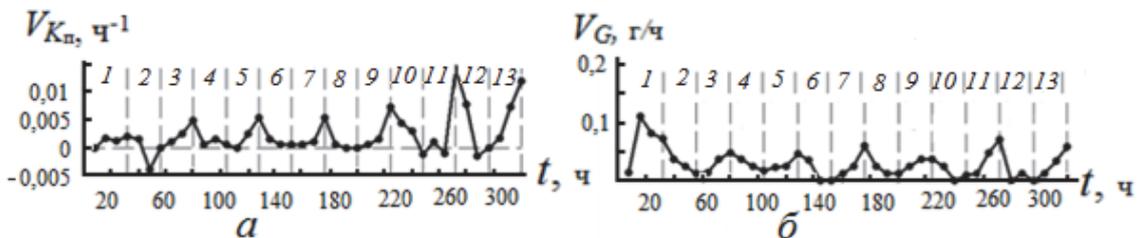


Рис. 4.20. Зависимости скорости окисления V_{K_n} (а) и скорости испарения V_G (б) от времени окисления при циклическом изменении температуры от 120 до 150 °С: нечетные числа – циклы повышения температуры испытания от 120 до 150 °С; четные – циклы понижения температуры испытания от 150 до 120 °С

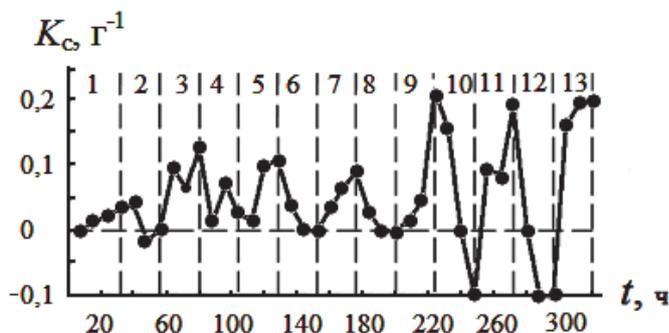


Рис. 4.21. Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в смазочном масле МС-20 при циклическом изменении температуры, от времени испытания: нечетные числа – циклы повышения температуры испытания от 120 до 150 °С; четные – циклы понижения температуры испытания от 150 до 120 °С

Кроме того, в период образования начальных продуктов окисления амплитуда изменения коэффициента K_c не превышает значения 0,125 ед.

(до 200 ч), при образовании более энергоёмких продуктов она составляет до 0,22 ед., а в циклах понижения температуры испытания приобретают отрицательные значения. Это происходит из-за коагуляции более энергоёмких продуктов окисления, вызывающих осветление масла за счёт стягивания продуктов к центрам коагуляции и смещение скорости окисления в отрицательную сторону. Эффективность применения циклического метода изменения температуры испытания смазочных масел при контроле термоокислительной стабильности показана в работах [206, 207].

Вторым методом обоснования критерия термоокислительной стабильности является использование коэффициента сопротивляемости смазочного материала температурным воздействиям (рис. 4.22).

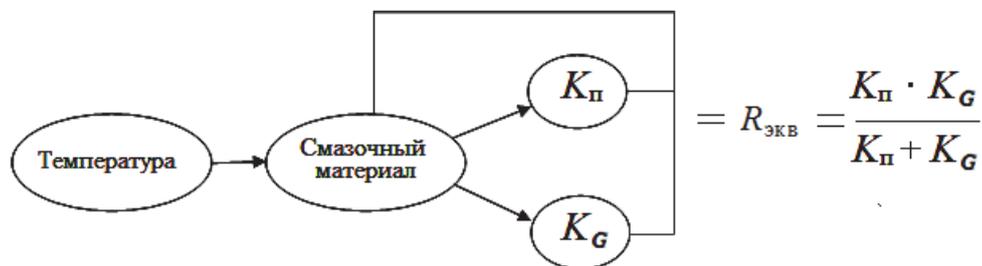


Рис. 4.22. Физическая модель сопротивления смазочного материала окислению

Под действием температуры избыточная тепловая энергия поглощается по двум каналам одновременно с образованием продуктов окисления, изменяющих оптические свойства масла (K_{Π}), и продуктов испарения, количество которых выражено коэффициентом K_G . Оба показателя характеризуют сопротивляемость смазочного материала и определяются эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экв}}$ из выражения

$$R_{\text{экв}} = \frac{K_{\Pi} K_G}{K_{\Pi} + K_G}. \quad (4.13)$$

Используя формулу (4.6), можно вычислить коэффициент сопротивляемости окислению R_o :

$$R_o = 1 - \frac{K_{\Pi} K_G}{K_{\Pi} + K_G}. \quad (4.14)$$

Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального масла МС-20 от времени и коэффициента поглощения светового потока представлены на рис. 4.23, а и б. Зависимость коэффициента сопротивляемости окислению R_o от времени окисления (рис. 4.23, а) описывается линейным регрессивным уравнением

$$R_o = -0,00067t + 0,995, \quad (4.15)$$

где коэффициент $-0,00067$ характеризует скорость уменьшения сопротивляемости масла окислению от времени испытания; $0,995$ – коэффициент, характеризующий сопротивляемость товарного масла перед испытаниями.

Коэффициент корреляции составил $0,9924$.

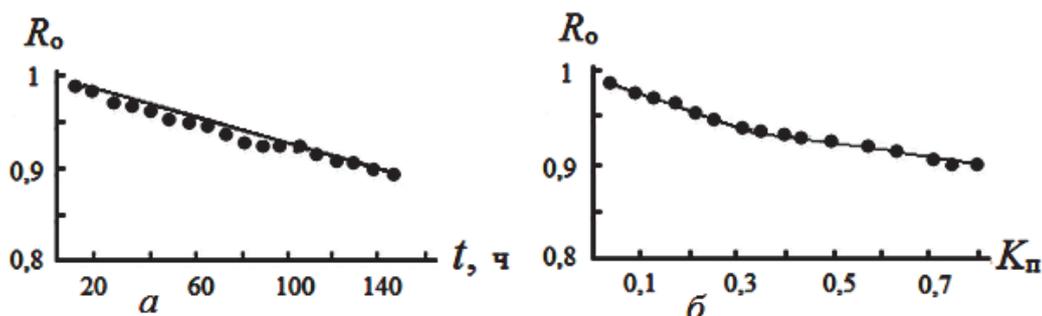


Рис. 4.23. Зависимость коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МС-20 от времени окисления (а) и коэффициента поглощения светового потока (б)

Зависимость коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока (рис. 4.23, б) описывается регрессивным уравнением

$$R_{ox} = 0,0875 K_n^2 - 0,18192 K_n + 0,9919. \quad (4.16)$$

Коэффициент корреляции составил $0,9946$.

При циклическом изменении температуры окисления в диапазоне от 120 до 150 °С коэффициент сопротивления окислению R_{ox} (рис. 4.24, а) в основном изменяется при температуре 150 °С, а в циклах понижения температуры испытания от 150 до 120 °С он стабилизируется, т. е. температура 150 °С для масла МС-20 предельная.

Зависимость коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры R_{ox} от коэффициента поглощения светового потока (рис. 4.24, б) описывается регрессионным уравнением

$$R_{ox} = 0,10615 K_n^2 - 0,19692 K_n + 0,9954, \quad (4.17)$$

где значение коэффициента $0,10615$ характеризует ускорение коэффициента сопротивления окислению; значение $0,19692$ показывает скорость его замедления, а значение $0,9954$ – потенциальную энергию товарного масла.

Коэффициент корреляции составил $0,9873$.

Противоизносные свойства масла МС-20, выраженные среднеарифметическим значением диаметра пятна износа (рис. 4.25, а), в начале окисления повышаются по сравнению с товарным маслом (точка на ординате), а затем понижаются, но не превышают противоизносные свойства товар-

ного масла, так как этому способствуют продукты окисления. То есть предложен критерий противоизносных свойств Π , определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ к параметру износа U , характеризующий условную концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, выраженной через среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах.

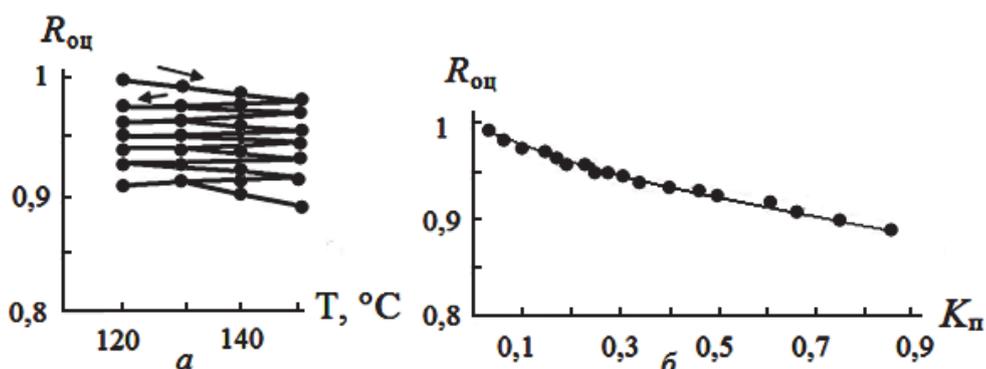


Рис. 4.24. Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МС-20 от температуры испытания (а) и коэффициента поглощения светового потока (б) при циклическом изменении температуры окисления от 120 до 150 $^\circ\text{C}$ и от 150 до 120 $^\circ\text{C}$

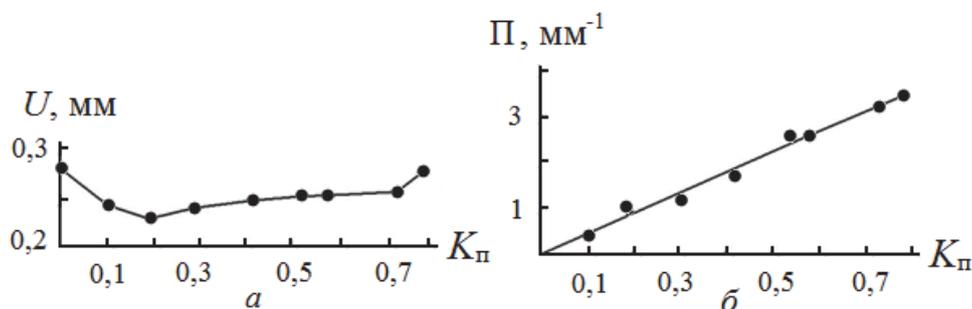


Рис. 4.25. Зависимости параметра износа U (а) и критерия противоизносных свойств Π (б) от коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ при окислении минерального масла МС-20

Зависимость данного критерия от коэффициента поглощения светового потока (рис. 4.25, б) имеет линейный характер и описывается регрессионным уравнением

$$\Pi = 4,386K_{\text{п}}. \quad (4.18)$$

Коэффициент 4,386 характеризует скорость увеличения критерия противоизносных свойств при возрастании значения коэффициента поглощения светового потока.

Критерий противоизносных свойств можно выразить параметром износа через среднеарифметическое значение площади пятна износа S , определяемой как

$$S = \pi d^2, \quad (4.19)$$

где d – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа, измеренное на трех шарах.

Зависимости номинальной площади фрикционного контакта S и критерия противоизносных свойств Π_s , выраженного через площадь контакта, от коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ представлены на рис. 4.26.

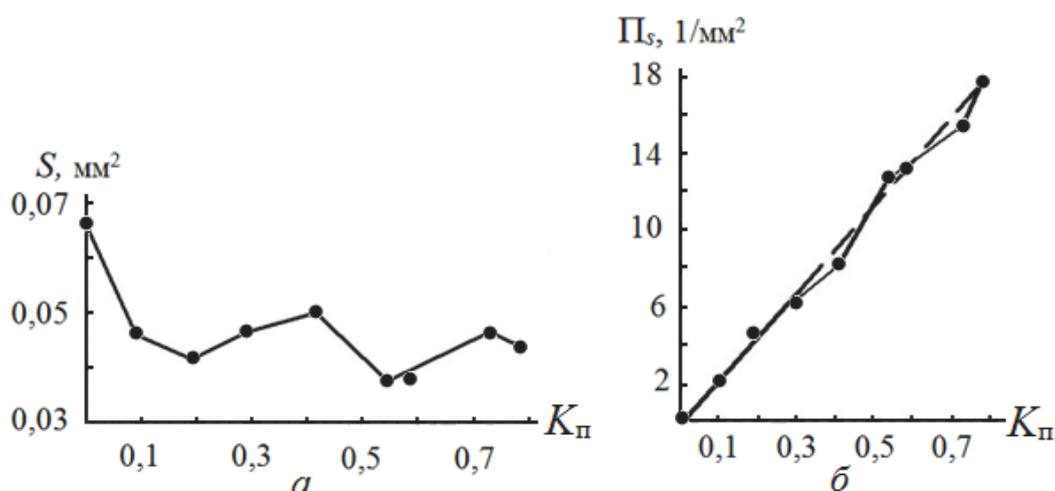


Рис. 4.26. Зависимости среднеарифметической номинальной площади пятна износа (а) и критерия противоизносных свойств (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении минерального трансмиссионного масла МС-20 (срок хранения 10 лет)

На рис. 4.26, а показано, что номинальная площадь фрикционного контакта уменьшается при увеличении коэффициента $K_{\text{п}}$ до значения 0,2 ед. Дальнейшее увеличение коэффициента $K_{\text{п}}$ вызывает колебание площади контакта из-за различий в соотношении первичных и вторичных (более энергоемких) продуктов окисления. Зависимость критерия противоизносных свойств Π_s , выраженного через площадь фрикционного контакта, от коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ (рис. 4.26, б) описывается линейным регрессионным уравнением

$$\Pi_s = 22,222 K_{\text{п}} \frac{1}{\text{мм}^2}, \quad (4.20)$$

где значение коэффициента 22,222 характеризует скорость увеличения критерия Π_s при возрастании коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$.

Однако линейность зависимости $\Pi_s = f(K_{\Pi})$ сохраняется с увеличением коэффициента поглощения светового потока до значения, равного 0,3 ед. Дальнейшее увеличение коэффициента K_{Π} вызывает колебание критерия Π_s .

Механохимические процессы, протекающие на фрикционном контакте, оценивались коэффициентом электропроводности и временем его формирования (рис. 4.27). Здесь выделены две области до и после изгиба зависимости $K_{\Pi} = f(t)$ (рис. 4.27, а), что позволяет установить влияние продуктов окисления различной оптической плотности на коэффициент электропроводности фрикционного контакта и время его формирования. При этом в первой области коэффициент электропроводности K_3 до значения $K_{\Pi} = 0,2$ ед. уменьшается, а при значениях $K_{\Pi} > 0,2$ (до 0,4 ед.) увеличивается.

В области 2, отделённой от области 1 штриховой линией, коэффициент K_3 вначале уменьшается, а затем увеличивается, однако его значение находится в пределах значений коэффициента K_{Π} от 0,75 до 0,53 ед. Увеличение коэффициента K_3 вызвано повышением кислотности масла и уменьшением электрического сопротивления граничного слоя.

Время формирования номинальной площади фрикционного контакта $t_{\text{фпк}}$ (рис. 4.27, б) в первой области уменьшается, а во второй (после стабилизации при $K_{\Pi} > 0,7$ ед.) увеличивается.

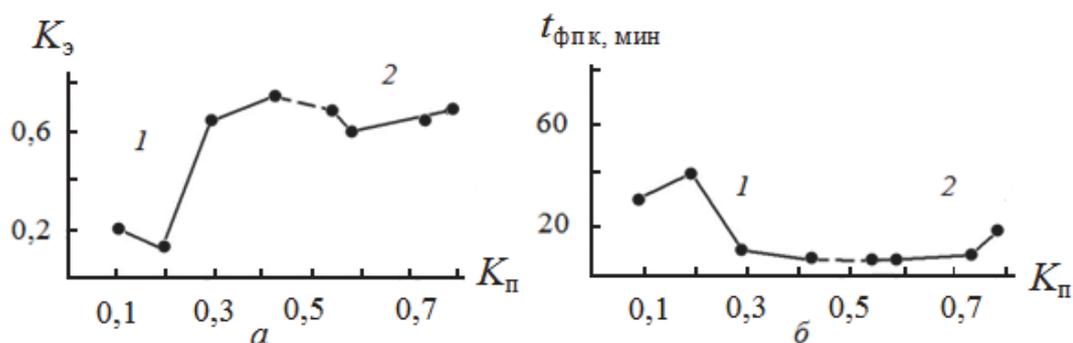


Рис. 4.27. Зависимости коэффициента электропроводности фрикционного контакта K_3 (а) и времени его формирования $t_{\text{фпк}}$ (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МС-20

Таким образом, при увеличении концентрации первичных продуктов окисления коэффициент электропроводности увеличивается за счет неудовлетворительных смазывающих свойств масла, а поэтому время формирования фрикционного контакта уменьшается. Во второй области за счёт повышения кислотности масла коэффициент K_3 приобретает значения от 0,6 до 0,7 ед, а время формирования фрикционного контакта не превышает 20 мин.

4.4. Результаты исследования минерального трансмиссионного масла МТ-8п при эксплуатации трансмиссий

Трансмиссионные масла работают в режимах высших скоростей скольжения, давлений и при широком диапазоне температур. Их пусковые свойства и длительная работоспособность должны обеспечиваться в интервале температур от -60 до $+150$ °С и при контактных напряжениях выше $3\ 000$ МПа. Важнейшими свойствами трансмиссионных масел являются смазывающая способность, вязкостно-температурная характеристика, термоокислительная стабильность, антикоррозионные и защитные свойства, а также стойкость к пенообразованию. Однако при эксплуатации трансмиссий масла подвергаются механической, термоокислительной и температурной деструкции. Эти процессы в основном протекают на поверхностях трения и определяют ресурс трансмиссионного масла и долговечность трибосопряжений. Значит, исследование механизма изменения основных свойств масла в процессе эксплуатации трансмиссий является актуальной задачей.

Масло МТ-8п (ТУ 38.101277–85) [124] моторно-трансмиссионное, селективной очистки, производится из восточной сернистой нефти. Оно содержит композицию противоизносных, антикоррозионных, антиокислительных и моющих присадок, депрессатор температуры застывания и антипенную добавку. Применяют масло как трансмиссионное в планетарных передачах гусеничных машин и в системах гидроуправления специальных машин. Кинематическая вязкость масла при 100 °С – $8-9$ мм²/с, индекс вязкости – 90 , температура вспышки в открытом тигле – не ниже 180 °С, температура застывания, не выше -30 °С. Методика испытания трансмиссионного масла описана в главе 3. По данной методике испытания проводили в два этапа с целью определения термоокислительной стабильности, а затем противоизносных свойств окисленных проб масла на трехшариковой машине трения при значениях коэффициента поглощения светового потока, равного приблизительно $0,1; 0,2 \dots 0,8$ ед., что позволяло оценить влияние продуктов окисления на триботехнические параметры: диаметр пятна износа, коэффициент электропроводности фрикционного контакта и время его формирования.

На рис. 4.28, *а, б, в, г* представлены результаты испытания трансмиссионного масла МТ-8п на термоокислительную стабильность. Установлено, что масло выдержало 56 ч испытаний при температуре 150 °С. Причём коэффициент поглощения светового потока K_{Π} составил $0,86$ ед., вязкость увеличилась на 39 %, испаряемость – $12,3$ г, а коэффициент термоокислительной стабильности – $1,0$ ед. Зависимость коэффициента $K_{\Pi} = f(t)$

(рис. 4.28, *а*) имеет изгиб после 40 ч испытания, что вызвано образованием двух видов продуктов окисления различной оптической плотности. Начало образования второго вида продуктов окисления определяется продлением участка зависимости после точки изгиба до пересечения с осью абсцисс.

Вязкость масла (рис. 4.28, *б*) при окислении оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_μ , определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного. Данный коэффициент возрастает по линейной зависимости. После 56 ч испытания он увеличился в 1,39 раза, т. е. на 39 % до предельно допустимого значения. Испаряемость масла (рис. 4.28, *в*) за 56 ч испытания составила 13,3 г, а продление зависимости $G = f(t)$ до пересечения с осью ординат определяет концентрацию лёгких фракций и воды. Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности $E_{\text{тос}}$ (рис. 4.28, *г*) имеет изгиб вследствие образования двух видов продуктов окисления и учитывает изменение как оптических свойств масла при окислении, так и его испаряемость, что позволяет сравнивать различные масла по этому показателю и выбирать наиболее стойкие к температурным воздействиям.

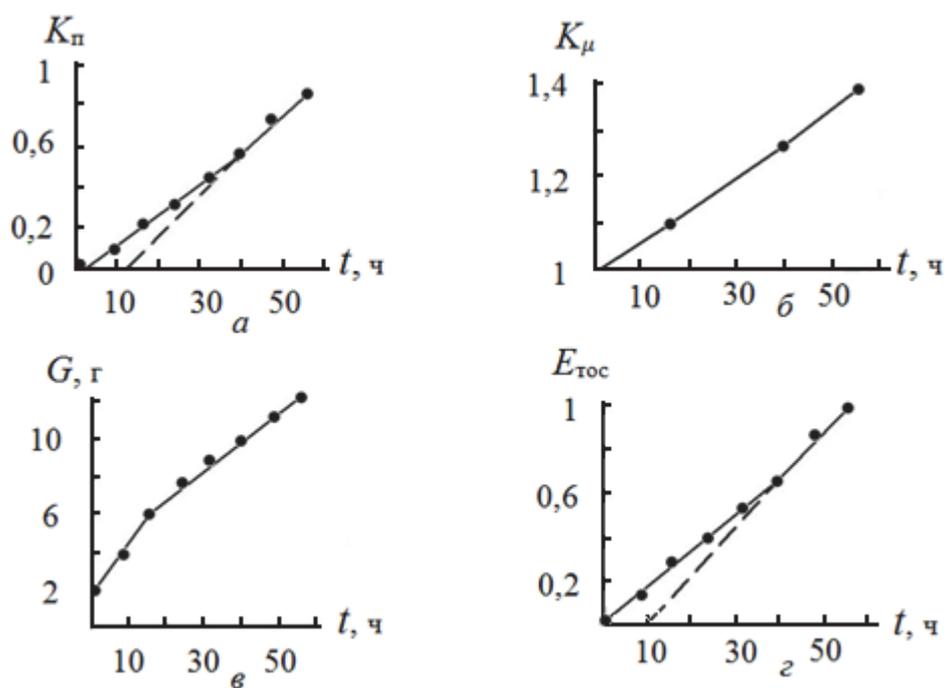


Рис. 4.28. Зависимости коэффициентов поглощения светового потока K_n (*а*), относительной вязкости K_μ (*б*), испаряемости G (*в*) и коэффициента термоокислительной стабильности $E_{\text{тос}}$ (*г*) от времени окисления трансмиссионного масла МТ-8п

Динамику процессов окисления и испарения трансмиссионного масла предложено оценивать скоростями протекания этих процессов (рис. 4.29, *а*, *б*).

Установлено, что скорость окисления $V_{K_{\text{п}}}$ (рис. 4.29, *a*) подвержена колебаниям, а скорость испарения V_G в течение 32 ч уменьшается (рис. 4.29, *б*), затем стабилизируется на уровне 0,15 г/ч. Колебания скорости окисления объясняются перераспределением избыточной тепловой энергии за счёт процессов самоорганизации [57], протекающих в смазочном материале. Анализ зависимости $K_{\text{п}} = f(t)$ (рис. 4.28, *a*) показывает, что до точки изгиба коэффициент $K_{\text{п}}$ увеличивается по линейной зависимости, однако после 12 ч испытания (штриховая линия) начинают образовываться продукты второго вида, требующие дополнительной тепловой энергии, поэтому в данный период скорость окисления замедляется, так как первичные продукты окисления переходят в другое, более энергоёмкое, состояние.

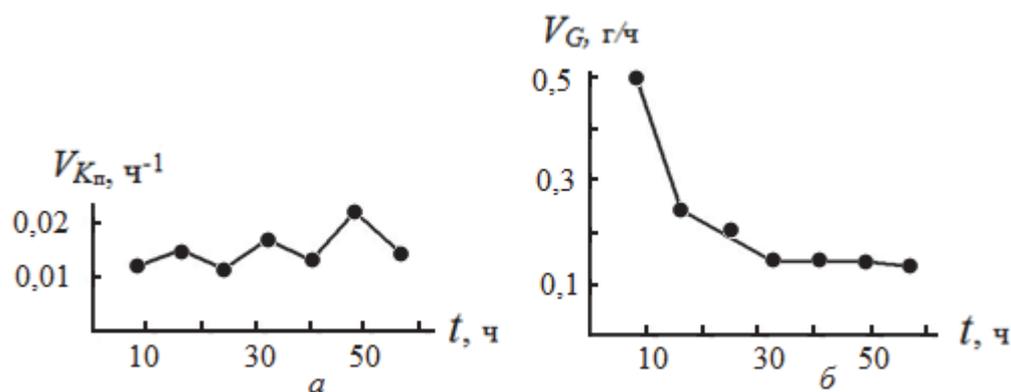


Рис. 4.29. Зависимости скоростей окисления $V_{K_{\text{п}}}$ (*a*) и испарения V_G (*б*) от времени испытания трансмиссионного масла МТ-8п при температуре 150 °С

Однако этот процесс протекает, если концентрация первичных продуктов окисления достигла определённого значения. Переход первичных продуктов в более энергоёмкое состояние вызывает понижение их концентрации, поэтому процесс образования энергоёмких продуктов замедляется, а скорость их образования увеличивается, что и вызывает колебания скорости окисления. На данные процессы оказывает влияние испарение масла за счёт поглощения части тепловой энергии. Интенсивность процессов самоорганизации предложено оценивать коэффициентом K_c (рис. 4.30), определяемым отношением скорости окисления к скорости испарения.

Коэффициент K_c со временем окисления также подвержен колебаниям с общей тенденцией к увеличению, т. е. окислительные процессы преобладают над процессами испарения. При циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С масло МТ-8п выдержало три неполных цикла повышения температуры от 120 до 150 °С и два цикла понижения от 150 до 120 °С (рис. 4.31, *a*). На рис. 4.31, *б* увеличение коэффициента поглощения светового потока происходит при температурах 140

и 150 °С. Необходимо отметить, что в циклах понижения температуры испытания процессы окисления продолжаются.

Рис. 4.30. Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации K_c от времени окисления трансмиссионного масла МТ-8п

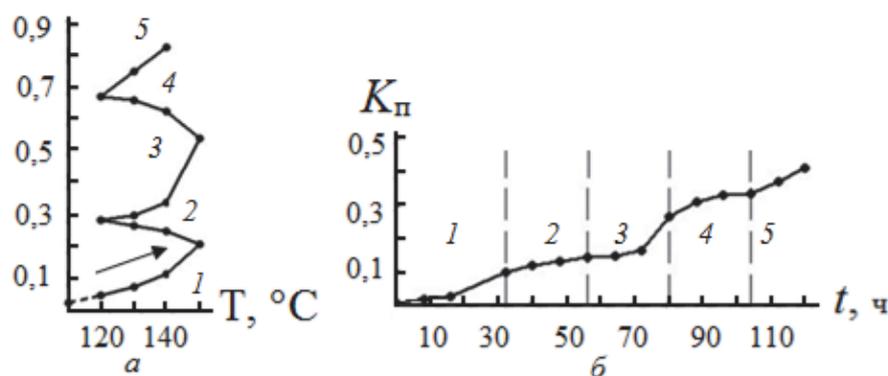
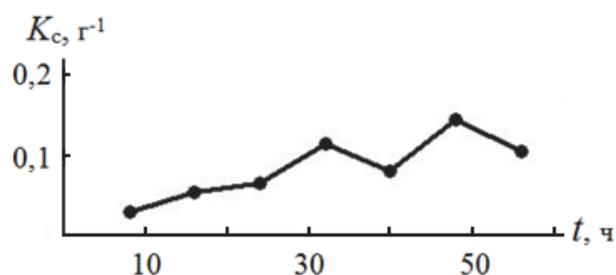


Рис. 4.31. Зависимости коэффициента поглощения светового потока K_p от температуры (а) и времени (б) испытания трансмиссионного масла МТ-8п: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры от 120 до 150 °С; 2, 4 – циклы понижения температуры от 150 до 120 °С

Испаряемость масла (рис. 4.32) в основном увеличивается в циклах повышения температуры и за 120 ч испытания составила 12,3 г, причём в первом цикле повышения температуры от 120 до 150 °С она составила 6,8 г (за 32 ч), т. е. половину того, что испарилось за остальных 88 ч испытания. Это объясняется наличием в масле лёгких фракций и воды. Для определения температур начала окислительных процессов и испарения построены зависимости скоростей окисления и испарения.

На рис. 4.33, а и б представлены зависимости скорости окисления и испарения от времени окисления при циклическом изменении температуры термостатирования масла МТ-8п. Показано, что скорость окисления (рис. 4.33, а) в циклах повышения температуры (1, 3 и 5) значительно увеличивается при температуре 150 °С, причём в третьем цикле повышения температуры скорость окислительных процессов превышает скорость окисления в первом цикле за счёт образования более энергоёмких продуктов с большей оптической плотностью. Исходя из полученных данных, максимальный ресурс работоспособности испытуемого масла будет получен при температуре начала окисления от 120 до 130 °С.

Скорость испарения трансмиссионного масла (рис. 4.33, б) также зависит от температуры термостатирования и приобретает минимальные значения при температуре 120 °С. Так как процессы окисления и испарения протекают на поверхностях трения, то оптимальной температурой работоспособности данного масла будет температура 120 °С, обеспечивающая максимальный ресурс. Различия в скорости испарения масла в первом цикле повышения температуры термостатирования от 120 до 150 °С вызваны наличием в нём лёгких фракций и воды, поэтому скорость испарения при 120 °С выше, чем скорость испарения в третьем цикле повышения температуры.

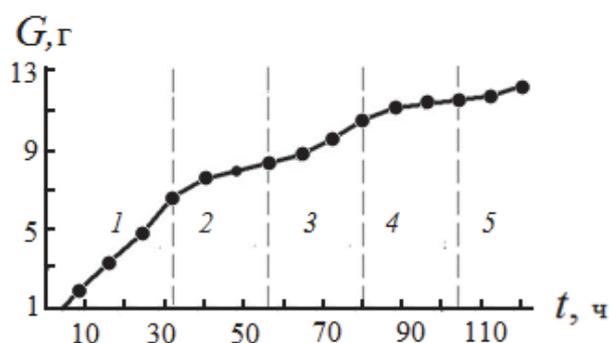


Рис. 4.31. Зависимость испарения масла МТ-8п от времени окисления при циклическом изменении температуры: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры; 2, 4 – циклы понижения температуры окисления

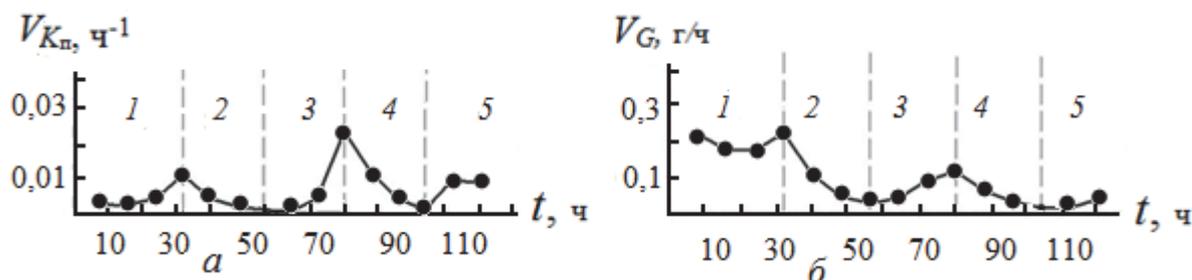


Рис. 4.32. Зависимости скоростей окисления (а) и испаряемости (б) от времени окисления трансмиссионного масла МТ-8п при циклическом изменении температуры: 1, 3, 5 – циклы повышения температуры; 2, 4 – циклы понижения температуры окисления

Коэффициент интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в масле МТ-8п (рис. 4.34) от времени окисления при циклическом изменении температуры, превышает значения коэффициента поглощения светового потока в 1,3–2,66 раза, в отличие от статической температуры испытания 150 °С (см. рис. 4.31), в циклах 3 и 5 повышения температуры.

Это может объясняться автоокислением, т. е. в циклах 1 и 2 происходит активация молекул, которая в последующих циклах ускоряет окислительные процессы и замедляет испаряемость (рис. 4.33, б). В качестве второго критерия термоокислительной стабильности предложен коэффициент сопротивляемости окислению, рассчитываемый по формуле (4.6) и учитывающий оптические свойства и испаряемость масла при окислении.

Зависимости коэффициента сопротивления окислению R_o от времени испытания и коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ представлены на рис. 4.35, *а*, *б*. Данные зависимости описываются линейными уравнениями, а регрессионные уравнения имеют вид:

для времени испытания

$$R_o = -0,002t + 0,984; \quad (4.21)$$

коэффициента поглощения светового потока

$$R_o = -0,1326K_{п} + 0,984. \quad (4.22)$$

Коэффициент корреляции составил 0,9924.

Свободные члены уравнений указывают на величину сопротивляемости товарного масла температурным воздействиям, которое хранилось 12 лет.

Рис. 4.34. Зависимость коэффициента интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в трансмиссионном масле МТ-8п, от времени окисления при циклическом изменении температуры от 120 до 150 °С: 1, 2, 3, 5 – циклы повышения температуры; у-цикл – 4 понижения температуры окисления

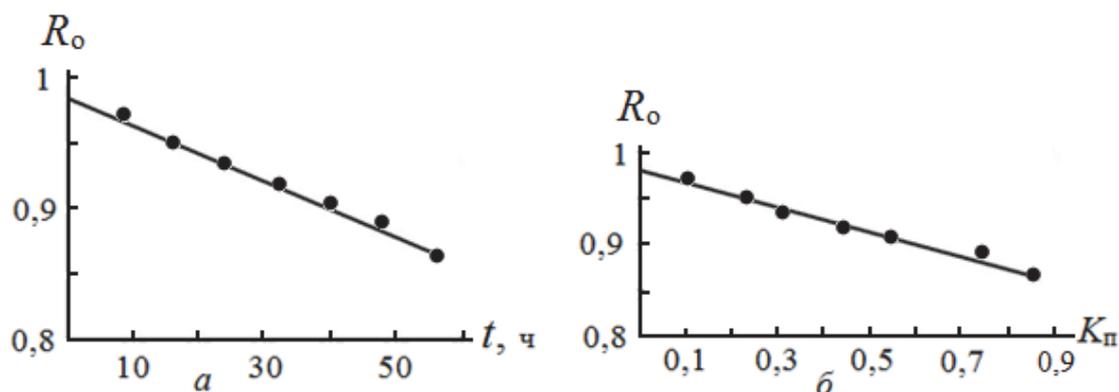
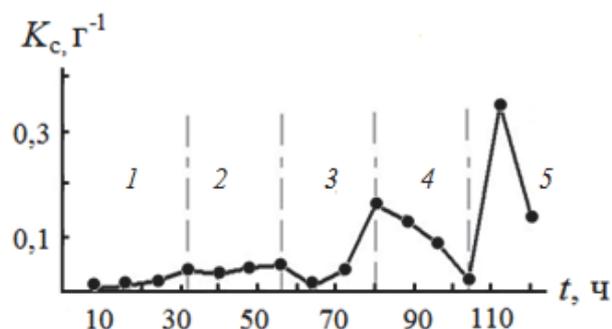


Рис. 4.35. Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МТ-8п от времени (*а*) и коэффициента поглощения светового потока (*б*)

Зависимости коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры испарения в диапазоне от 120 до 150 °С представлены на рис. 4.36, *а*, *б*. Согласно этим данным сопротивляемость масла значительно понижается при температуре 150 °С (рис. 4.36, *а*), т. е. такая температура для данного масла высокая.

Регрессионное уравнение зависимости $R_{\text{оц}}$ от коэффициента поглощения светового потока при циклическом изменении температуры испытания имеет вид

$$R_{\text{оц}} = 0,2095K_{\text{п}}^2 - 0,3172 K_{\text{п}} + 0,984, \quad (4.23)$$

где значения коэффициентов характеризуют: 0,3172 – скорость понижения коэффициента сопротивления окислению; 0,2095 – ускорение понижения коэффициента $R_{\text{оц}}$; 0,984 – сопротивление исходного масла. Коэффициент корреляции составил 0,9885.

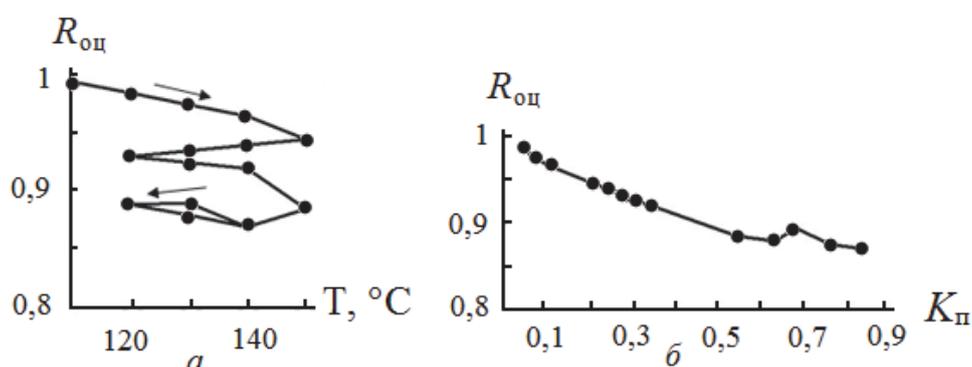


Рис. 4.36. Зависимости коэффициента сопротивления окислению минерального трансмиссионного масла МТ-8п от циклически изменяющейся температуры (а) и коэффициента поглощения светового потока (б)

Противоизносные свойства трансмиссионного масла МТ-8п представлены зависимостью диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока (рис. 4.37, а). Показано, что противоизносные свойства в начале окисления понижаются по отношению к товарному маслу (штриховая линия), а затем повышаются и при $K_{\text{п}} = 0,3$ ед. становятся одинаковыми с товарным маслом. Дальнейшее окисление масла вызывает повышение противоизносных свойств. Противоизносные свойства окисленного масла предложено оценивать критерием Π (рис. 4.37, б) по формуле (4.10).

Как видно из представленных данных, критерий противоизносных свойств увеличивается с ростом концентрации продуктов окисления.

Регрессионное уравнение зависимости $\Pi = f(K_{\text{п}})$ имеет вид

$$\Pi = 4,487(K_{\text{п}} - 0,07), \quad (4.24)$$

где значение коэффициента 4,487 характеризует скорость увеличения критерия Π при возрастании концентрации продуктов окисления, значение коэффициента 0,07 – начальные оптические свойства испытуемого смазочного масла. Необходимо отметить, что противоизносные свойства окисленного масла тем выше, чем больше значение критерия Π при одинаковом значении коэффициента поглощения светового потока.

Зависимости среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта на трех шарах и критерия противоизносных свойств Π_s , вычисленного с применением площади контакта, от коэффициента поглощения светового потока представлены на рис. 4.38, *a*.

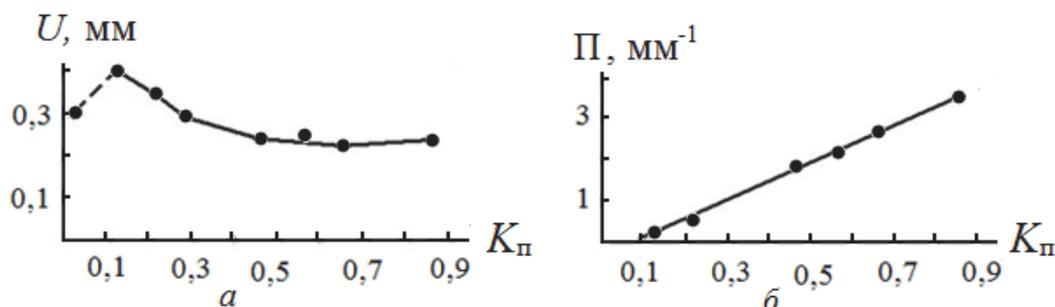


Рис. 4.37. Зависимости диаметра пятна износа (*a*) и критерия противоизносных свойств (*б*) от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МТ-8п

При росте концентрации продуктов окисления трансмиссионного масла МТ-8п в начале процесса при $K_{\Pi} < 0,13$ ед. площадь контакта увеличивается по отношению к товарному маслу. Это вызвано тем, что на поверхностях трения не образуется защитная граничная пленка, способная их разделить. При увеличении концентрации продуктов окисления ($K_{\Pi} > 0,13$ ед.) номинальная площадь фрикционного контакта уменьшается, т. е. увеличивается несущая способность граничного слоя окисленного масла.

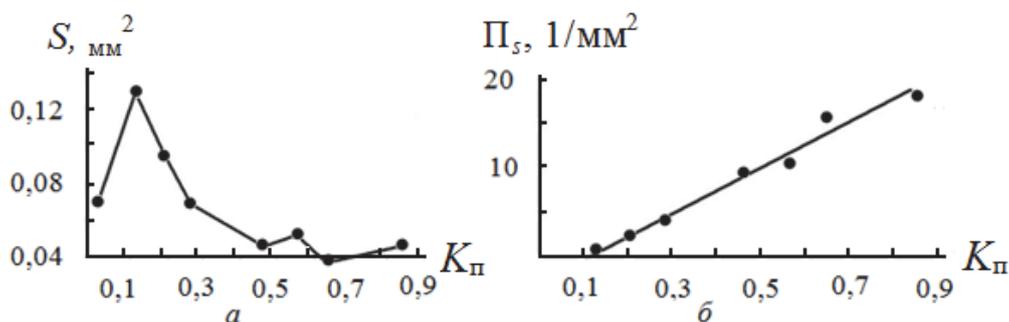


Рис. 4.38. Зависимости суммарного среднеарифметического значения номинальной площади фрикционного контакта (*a*) и критерия противоизносных свойств (*б*) от коэффициента поглощения светового потока при окислении минерального трансмиссионного масла МТ-8п

Зависимость критерия противоизносных свойств, выраженного через площадь фрикционного контакта Π_s , от коэффициента поглощения свето-

вого потока представлена на рис. 4.38, б. Данная зависимость описывается линейным уравнением, а регрессионное уравнение имеет вид

$$P_s = 26,09(K_n - 0,11), \quad (4.25)$$

где значение коэффициента 26,09 характеризует скорость увеличения критерия P_s ($1/\text{мм}^2$) при увеличении концентрации продуктов окисления; значение коэффициента 0,11 показывает начальные оптические свойства испытуемого масла.

Сравнив данные критериев противоизносных свойств по среднеарифметическим значениям диаметра пятна износа и номинальной площади фрикционного контакта, видим, что их можно использовать для оценки противоизносных свойств масел, подверженных окислению. Противоизносные свойства трансмиссионного масла зависят не только от смазывающих свойств, но и износостойкости материалов пар трения, поэтому свойства материалов пар трения выбраны постоянными. Однако применение схемы трения «шар – цилиндр» позволяет определить продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций. Для этого через одну из пар трения пропускался постоянный ток, записываемый в виде диаграммы [201]. При пластической деформации величина тока равна заданному (100 МкА), так как происходит металлический контакт микронеровностей. При увеличении площади контакта давление уменьшается, а пластические деформации переходят в упругопластические. При этом ток уменьшается до определённой стабилизированной величины. Время уменьшения тока до этой величины определяет время формирования защитных граничных слоёв. Данный параметр характеризует склонность смазочного материала формировать на поверхностях трения защитные граничные слои. И чем параметр меньше, тем ниже противоизносные свойства исследуемого масла.

Упругие деформации характеризуются колебанием тока возле определённой величины, а их интенсивность зависит от скорости формирования и разрушения защитных граничных слоёв (рис. 4.39). Установлено, что данная зависимость имеет два характерных участка, получаемых при увеличении коэффициента K_n , т. е. время формирования защитных граничных слоёв зависит от степени окисления масла и поэтому может характеризовать свойства этих слоёв.

Начальный участок зависимости (до штриховой линии) определяет формирование адсорбционных слоёв, а второй – хемосорбционных. Хемосорбционные слои образуются при определённой концентрации кислых продуктов окисления (при $K_n = 0,4 \dots 0,45$ ед.). Показано (рис. 4.39), что при переходе от адсорбционных слоёв к хемосорбционным резко уменьшается время формирования защитных граничных слоёв. Противоположная картина

наблюдается при изменении зависимости коэффициента электропроводности фрикционного контакта K_3 (рис. 4.40) от коэффициента поглощения светового потока K_{Π} .

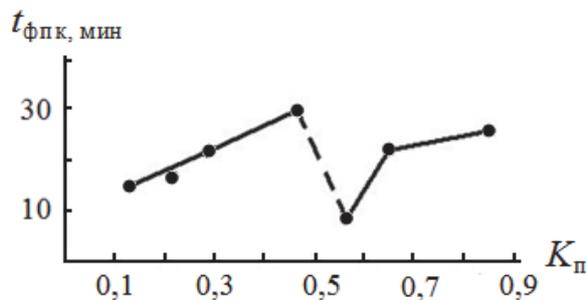


Рис. 4.39. Зависимость времени формирования защитных граничных слоёв на поверхностях трения от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МТ-8п

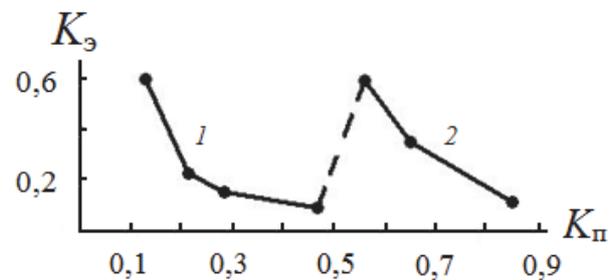


Рис. 4.40. Зависимость коэффициента электропроводности фрикционного контакта K_3 от коэффициента поглощения светового потока K_{Π} при окислении трансмиссионного масла МТ-8п: 1 – область формирования адсорбционных слоёв; 2 – область формирования хемосорбционных слоёв

В областях формирования адсорбционных (участок 1) и хемосорбционных (участок 2) слоёв коэффициент K_3 уменьшается, однако при переходе из одной области в другую наблюдается его резкое увеличение. Уменьшение коэффициента K_3 в области адсорбционных слоёв связано с уменьшением давления в контакте за счёт увеличения площади, а уменьшение коэффициента K_3 в области хемосорбционных слоёв связано с плотностью покрытия площади контакта сорбционной плёнкой, увеличивающей сопротивление фрикционного контакта при увеличении кислотности масла и образовании продуктов окисления второго вида, вызывающих изгиб зависимости $K_{\Pi} = f(t)$ (см. рис. 4.29, а).

4.5. Анализ результатов контроля минеральных трансмиссионных масел

Целью настоящего исследования является обоснование выбора дополнительных показателей термоокислительной стабильности и противоизносных свойств трансмиссионных масел, позволяющих еще на стадии проектирования технологического оборудования осуществлять их выбор, необходимый для температурных условий эксплуатации, а на стадии эксплуатации – контроль за состоянием. В табл. 4.1 приведены основ-

ные показатели, использование которых поможет сравнивать различные масла и определять их температурную область работоспособности.

Представленные данные получены при температуре испытания 150 °С, а противоизносные свойства – при постоянных параметрах трения (см. главу 3).

Таблица 4.1

Экспериментальные данные испытания минеральных трансмиссионных масел

Показатель масла	Марка масла		
	ТСзп-8	МС-20	МТ-8п
Потенциальный ресурс при температуре 150 °С и коэффициенте $K_n = 0,8$ ед., ч	45,0	144,0	53,0
Потенциальный ресурс при циклическом изменении температуры окисления и коэффициенте $K_n = 0,8$ ед., ч	128,0	316,0	117,0
Количество циклов изменения температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С	5	13	5
Коэффициент относительной кинематической вязкости в конце испытания, мм ² /с	1,2	1,32	1,39
Испаряемость после 40 ч испытания, г	19,1	4,3	10,0
Критерий термоокислительной стабильности после 40 ч испытания	0,909	0,212	0,664
Критерий противоизносных свойств П при коэффициенте $K_n = 0,8$ ед. (диаметр пятна износа)	1,6	3,51	3,28
Критерий противоизносных свойств П _с при коэффициенте $K_n = 0,8$ ед. (площадь контакта)	4,47	17,78	18,0
Коэффициент сопротивляемости окислению при статической температуре 150 °С после 40 ч испытания	0,825	0,965	0,907
Коэффициент сопротивляемости окислению при циклической температуре от 120 до 150 °С после 120 ч испытания	0,787	0,961	0,88

Проанализированы результаты испытаний трансмиссионных минеральных масел ТСзп-8, МС-20 и МТ-8п. Выявлено, что наибольший потенциальный ресурс при статической температуре испытания 150 °С, определяемый временем достижения коэффициента поглощения светового потока значения, равного 0,8 (рис. 4.41), установлен для масла МС-20 – 144 ч, а наименьший – 45 ч – получен для масла ТСзп-8.

Для увеличения потенциального ресурса масел ТСзп-8 и МТ-8п необходимо понижать температурную область их применения. Согласно ГОСТ 17479.2–85, эти масла должны относиться к группе эксплуатационных свойств ТМ-2-9, применяющихся в температурном диапазоне масла в объеме до 130 °С. Трансмиссионное масло МС-20 относится к группе эксплуатационных свойств ТМ-5-18 и может использоваться в температурном диапазоне до 150 °С.

Наибольший потенциальный ресурс при циклическом изменении температуры испытания в диапазоне от 120 до 150 °С определялся по времени достижения значения коэффициента поглощения светового потока, равного 0,8 ед. (рис. 4.42), и установлен для масла МС-20 в 316 ч, а наименьший – для масла МТ-8п – 117 ч. Масло МТ-8п показало худшие результаты при циклическом изменении температуры испытания, чем при статической температуре 150 °С.

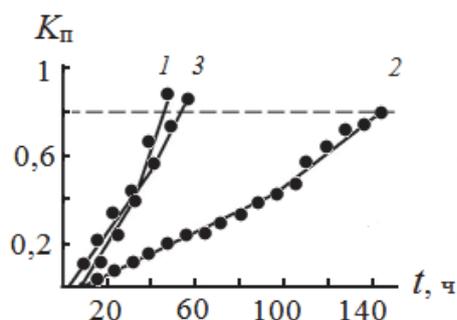


Рис. 4.41. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п при статической температуре 150 °С

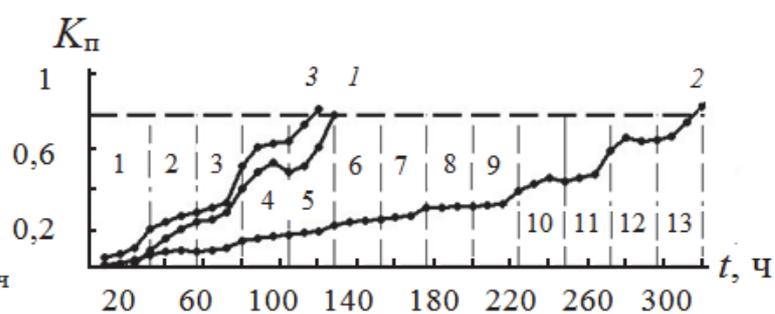


Рис. 4.42. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления трансмиссионных масел при циклическом изменении температуры в диапазоне от 120 до 150 °С: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Одним из важных эксплуатационных показателей трансмиссионных масел является кинематическая вязкость, особенно ее изменение при окислении. Для оценки изменения вязкости в процессе окисления масла принят коэффициент относительной вязкости, определяемый отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного. На рис. 4.43 представлены зависимости коэффициента относительной вязкости от времени окисления трансмиссионных масел. Согласно данным, приведенным на рис. 4.43, зависимости коэффициента относительной вязкости для масел ТСзп-8 и МТ-8п описываются линейными уравнениями (рис. 4.43 кривые 1 и 3); у масла МС-20 в начале окисления вязкость падает, а после 24 часов испытания она увеличивается. Полученные результаты позволяют проектировщикам техники давать обоснованные рекомендации по выбору масел с более стабильной вязкостью при окислении и информацию об ее изменении в процессе эксплуатации.

При граничном трении скольжения трансмиссионных масел большое значение имеет эксплуатационный показатель – испаряемость, поскольку может вызвать разрыв масляной пленки, разделяющей поверхности трения, и активизировать схватывание. Информация об испаряемости масел

необходима для определения температурной области работоспособности трансмиссий и при назначении группы их эксплуатационных свойств.

Рассмотрим зависимости испаряемости исследованных трансмиссионных масел от времени окисления (рис. 4.44).

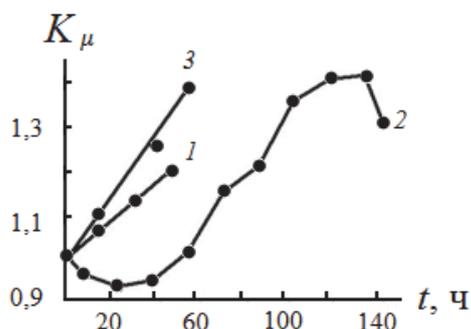


Рис. 4.43. Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСЗп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

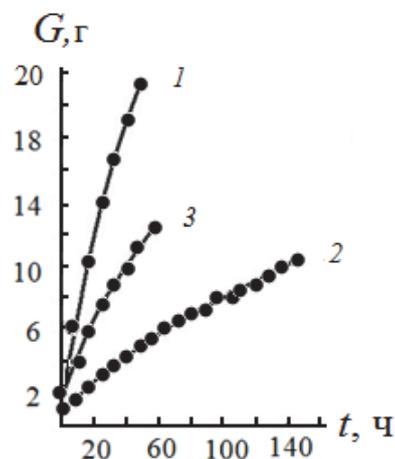


Рис. 4.44. Зависимости испаряемости трансмиссионных масел от времени окисления при температуре 150 °С: 1 – ТСЗп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Установлено, что наименьшей испаряемостью характеризуется масло МС-20, а наибольшей – масло ТСЗп-8 (кривая 1). В табл. 4.1 приведены данные об испаряемости масел после 40 ч испытаний. Кроме того, точки на ординате зависимостей $G = f(t)$ показывают концентрацию в маслах легких фракций и воды, которые составляют для масел ТСЗп-8 и МТ-8п – 2 г, а для масла МС-20 – 1 г.

Критерий термоокислительной стабильности характеризует сопротивляемость трансмиссионных масел окислению и испарению, поэтому приведенные данные позволяют не только определять температурную область их работоспособности, потенциальный ресурс, но и поведение масел в условиях эксплуатации. Из представленных на рис. 4.45 данных видим, что наиболее термостойко масло МС-20 (кривая 2), а наименее – масло ТСЗп-8. Температура окисления 150 °С для масел ТСЗп-8 и МТ-8п будет высокой. Предельная температура их работоспособности – 130 °С, а классификация по группам эксплуатационных свойств по ГОСТ 17479.2–85 соответствует группе ТМ-2.

Используя зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления, можно установить потенциальный ресурс, определяемый временем достижения, например, значения коэффициента $E_{\text{Тос}}$, равного 0,8 ед. Это позволяет количественно определить потенциаль-

ный ресурс, который составил для масел ТСзп-8 – 38 ч, МС-20 – 130 ч, МТ-8п – 47 ч. В табл. 4.1 приведены данные по значению термоокислительной стабильности исследованных масел после 40 ч испытания, которые составили для масел: ТСзп-8 – 0,9 ед., МС-20 – 0,212 ед., МТ-8п – 0,664 ед.

Основными показателями, влияющим на долговечность трибосопряжений трансмиссий, служат противоизносные свойства масел в процессе окисления. Противоизносные свойства окисленных трансмиссионных масел оценивались по критериям, определяемым отношением коэффициента поглощения светового потока к среднеарифметическому значению диаметра пятна износа Π на трех шарах (рис. 4.46) и среднеарифметическому значению номинальной площади фрикционного контакта Π_s (рис. 4.47).

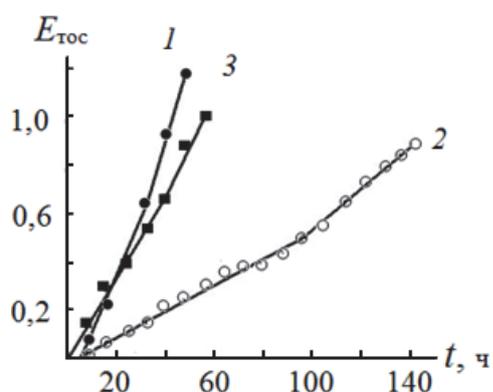


Рис. 4.45. Зависимости критерия термоокислительной стабильности от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

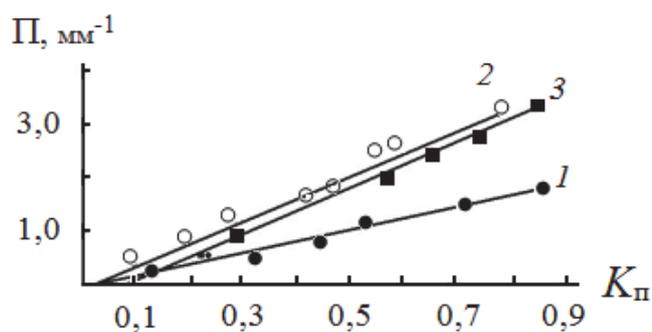
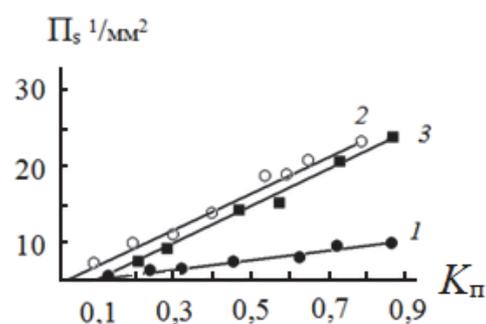


Рис. 4.46. Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Рис. 4.47. Зависимости критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел (по площади фрикционного контакта): 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п



Согласно данным (рис. 4.46) зависимости критерия противоизносных свойств описываются линейными уравнениями. Из числа исследованных масел наивысшими противоизносными свойствами характеризуются масла МС-20 (кривая 2) и МТ-8п (кривая 3). Аналогичная картина наблюдается при использовании вместо диаметра пятна износа площади фрикционного контакта (рис. 4.47).

Из представленных данных видим, что для определения критерия противоизносных свойств можно пользоваться как среднеарифметическим значением диаметра пятна износа, так и площадью фрикционного контакта.

Применение в качестве второго критерия термоокислительной стабильности трансмиссионных масел коэффициента сопротивляемости окислению, учитывающего изменение оптических свойств и испаряемости при статической (рис. 4.48) и циклически изменяющихся температурах (рис. 4.49), позволяет в динамике рассмотреть изменение сопротивляемости масел в процессе окисления.

Зависимости коэффициента сопротивляемости трансмиссионных масел от времени окисления при статической температуре 150 °С представлены на рис. 4.48. Установлено, что для всех исследованных масел данные зависимости описываются линейными уравнениями. Причем для масла ТСзп-8 (кривая 1) зависимость начинается с ординаты 1,02 ед., масла МС-20 (кривая 2) – 0,995 ед. и масла МТ-8п (кривая 3) – 0,98 ед. Это связано с начальным состоянием смазочного масла, так, масло ТСзп-8 перед испытаниями имело значение коэффициента поглощения светового потока, равное 0, масло МС-20 – 0,013 ед., а масло МТ-8п – 0,027 ед., т. е. последние два масла израсходовали часть потенциальной энергии на окисление, а масло ТСзп-8 имело запас энергии, поэтому его сопротивляемость выше единицы. Согласно полученным данным наибольшим сопротивлением окислению характеризуется масло МС-20 (кривая 2), а наименьшим – масло ТСзп-8.

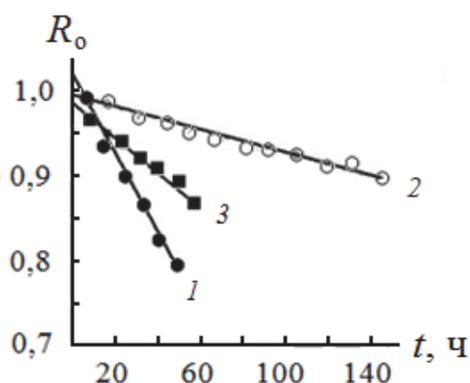


Рис. 4.48. Зависимости коэффициента сопротивления окислению при статической температуре 150 °С от времени испытания трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

По скорости падения сопротивления окислению можно классифицировать масла по группам эксплуатационных свойств. Чем меньше скорость падения сопротивления окислению, тем выше группа эксплуатационных свойств и шире температурная область работоспособности масла.

Зависимости коэффициента сопротивления окислению от времени окисления при циклически изменяющейся температуре испытания (рис. 4.49) показывают, как изменяется коэффициент сопротивления окислению

в циклах повышения и понижения температуры. Например, для масла МС-20 (кривая 2), независимо от циклов изменения температуры, сопротивляемость плавно понижается. Для масла ТСзп-8 (кривая 1), независимо от циклов изменения температуры, наблюдается постоянное снижение коэффициента сопротивления окислению, а для масла МТ-8п (кривая 3) в циклах понижения температуры испытания скорость уменьшения коэффициента сопротивления окислению замедляется. Поэтому масло, при испытании которого сопротивляемость окислению стабилизируется в циклах понижения температуры, может работать при более высоких температурах по сравнению с маслом ТСзп-8, где сопротивляемость, независимо от циклов изменения температуры испытания, уменьшается (кривая 1).

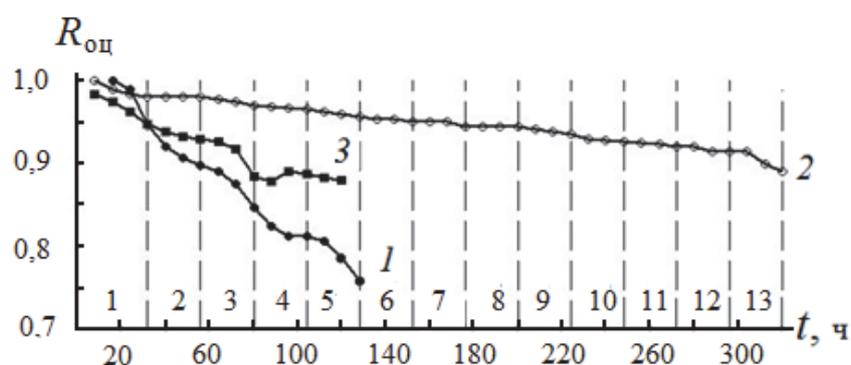


Рис. 4.49. Зависимости коэффициента сопротивления окислению при циклическом изменении температуры от времени окисления минеральных трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п; нечетные цифры – циклы повышения температуры от 120 до 150 °С; четные – циклы понижения температуры от 150 до 120 °С

Таким образом, предоставление дополнительных данных, приведенных в табл. 4.1, позволяет конструкторам и технологам обоснованно выбирать масла в соответствии с температурными и нагрузочными характеристиками проектируемой техники и обеспечивать максимальный ресурс трансмиссионных масел и долговечность трибосистем.

4.6. Результаты испытания трансмиссионных масел различной базовой основы

Для оценки влияния базовой основы трансмиссионных масел на процессы окисления и противоизносные свойства выбраны масла одного производителя: минеральное BIZOL 80W-90 GL4; частично синте-

тическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4; GL5 и синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе их испытывали при температуре 150 °С с перемешиванием пробы мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. Проба масла составляла $100 \pm 0,1$ г. После каждых 8 ч испытания пробу термостатированного масла взвешивали и определяли массу испарившегося масла. Затем измеряли оптическую плотность по коэффициенту поглощения светового потока и кинетическую вязкость при 100 °С. После измерения параметров пробу масла повторно взвешивали, а испытания продолжали до достижения значения коэффициента поглощения светового потока, равного 0,7...0,8 ед. Второй этап испытания выполняли по той же технологии, но при достижении значений коэффициента поглощения светового потока, равных приблизительно 0,1; 0,2...0,8 ед., дополнительно отбирали пробу термостатированного масла для испытания на трехшариковой машине трения, а пробу масла доливали до первоначального значения ($100 \pm 0,1$ г).

Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания трансмиссионных масел различной базовой основы приведены на рис. 4.50: для минерального (кривая 1) и частично синтетического (кривая 2) трансмиссионных масел установлены два вида продуктов окисления с различной оптической плотностью, вызывающих изгиб зависимостей $K_{\text{п}} = f(t)$. Причем время образования вторичных продуктов определяется продлением зависимости после точки изгиба до пересечения с осью абсцисс; для минерального масла оно составляет 18 ч, а частично синтетического – 9 ч. Кроме того, для минерального масла существует период времени (6 ч), при котором процессы окисления практически не происходят. Следовательно, можно предположить, что исходными продуктами для образования вторичных продуктов являются первичные продукты окисления. Представленные зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени окисления описываются кусочно-линейными уравнениями для обоих участков

$$K_{\text{п}} = a(t - t_{\text{н}}), \quad (4.26)$$

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

Для синтетического масла BIZOLHYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3) зависимость $K_{\text{п}} = f(t)$ описывается полиномом второго порядка, а процесс окисления начинается после 30 ч испытания, т. е. данное масло имеет область сопротивляемости окислению. Согласно данным (рис. 4.50) наивысшая термоокислительная стабильность установлена для синтетического масла (кривая 3), а наименьшая – для частично синтетического масла (кри-

вая 2), поэтому потенциальный ресурс для этих масел может быть определен временем достижения коэффициента поглощения светового потока значения 0,8 ед.

Данные по ресурсу приведены в виде гистограммы на рис. 4.51, согласно которой наибольший ресурс установлен для синтетического масла BIZOLHYPOID 75W-90 GL5 – 104 ч, а для минерального и частично синтетического масел он в два раза ниже. Кроме того, по такому показателю классификация трансмиссионных масел по группам эксплуатационных свойств не соответствует для частично синтетического масла (GL4, GL5).

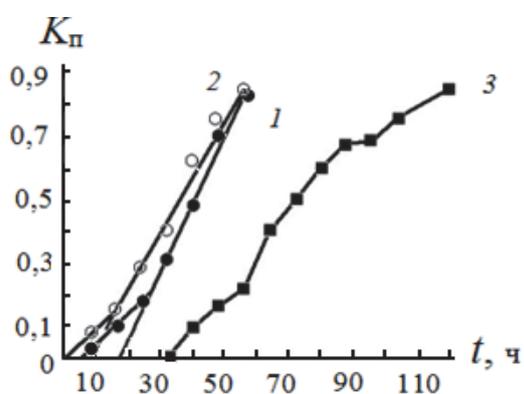


Рис. 4.50. Зависимости коэффициента поглощения светового потока K_p от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

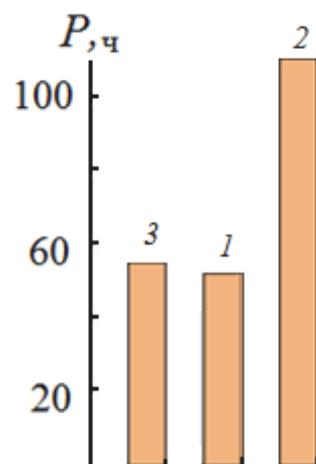


Рис. 4.51. Гистограмма изменения потенциального ресурса при окислении трансмиссионных масел различной базовой основы: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

Испаряемость трансмиссионных масел (рис. 4.52) наименьшая у минерального масла, а наибольшая – у частично синтетического. Причем испаряемость сильно различается за первые 8 ч испытания и составляет для минерального масла – 1,8 г, частично синтетического – 5,2 г, синтетического – 3,9 г. Большая испаряемость масел за первые 8 ч испытания может объясняться наличием легких фракций и воды.

Вязкость трансмиссионных масел оценивалась коэффициентом относительной вязкости K_μ , определяемым отношением

$$K_\mu = \mu_{\text{ок}} / \mu_{\text{т}}, \quad (4.27)$$

где $\mu_{\text{ок}}$ и $\mu_{\text{т}}$ – соответственно кинематическая вязкость окисленного и товарного масел ($\text{мм}^2/\text{с}$).

Наиболее стабильное изменение вязкости (рис 4.53) установлено для минерального масла (кривая 1), а наибольшее изменение – для частично синтетического (кривая 2).

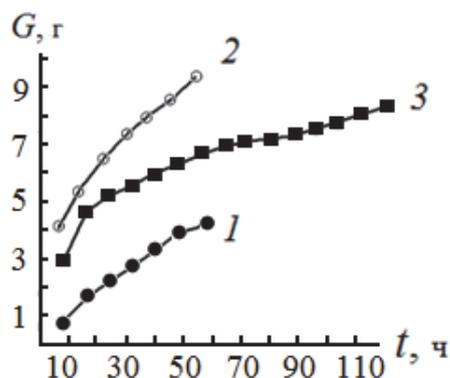


Рис. 4.52. Зависимости испаряемости от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

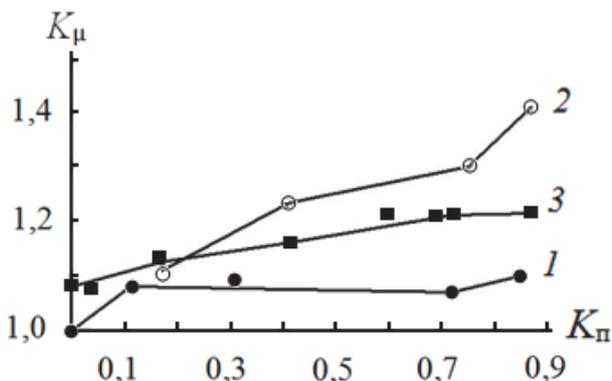


Рис. 4.53. Зависимости коэффициента относительной вязкости K_μ от концентрации продуктов окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

Так, при коэффициенте поглощения светового потока, равном 0,8 ед., вязкость увеличилась для масел: минерального – на 10 %; частично синтетического – 35 % и синтетического – 22 %.

Влияние продуктов окисления на испаряемость трансмиссионных масел исследовалось по зависимости $G = f(K_\pi)$ – (рис. 4.54). Установлено, что продукты окисления большее влияние оказывают на оптические свойства масел, чем на вязкость и испаряемость, поэтому термоокислительную стабильность $E_{\text{тос}}$ целесообразно оценивать суммой коэффициентов

$$E_{\text{тос}} = K_\pi + K_G, \quad (4.28)$$

где K_π – коэффициент поглощения светового потока; K_G – коэффициент испаряемости

$$K_G = m / M, \quad (4.29)$$

где m – масса испарившегося масла за установленное время и при заданной температуре испытания, г; M – масса пробы после испытания (после установленного времени испытания и при заданной температуре).

Так, коэффициент $E_{\text{тос}}$ характеризует количество тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения. Зависимости данного коэффициента от времени испытания (рис. 4.55) для минерального и частично синтетического масел имеют изгиб, а для синтетического – четыре изгиба, что указывает на образование продуктов окисления с различной

оптической плотностью и испаряемостью. Поэтому при термостатировании масел возникают процессы перераспределения тепловой энергии между ними, вызывающие изменение скоростей окисления и испарения.

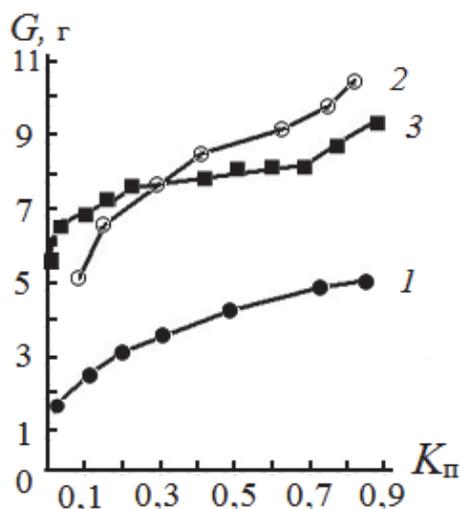


Рис. 4.54. Зависимости испаряемости от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL-HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

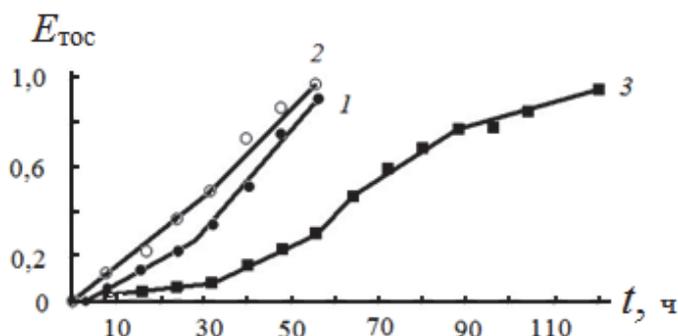


Рис. 4.55. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOL-HYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

Согласно данным (рис. 4.56, а) приращение скорости окисления для всех исследованных масел подвержено колебаниям, что подтверждает наличие перераспределения тепловой энергии между продуктами окисления (первичными и вторичными) и испарения. Кроме того, для минерального и частично синтетического трансмиссионных масел процессы окисления протекают с бóльшей скоростью, чем для синтетического (кривая 3). Приращение скорости окисления для синтетического масла в первые 30 ч испытания характеризуется малыми значениями и в некоторые периоды времени стабилизируется, а при 96 ч испытания процессы окисления останавливаются. Максимальное приращение скорости окисления для масел составляет: минерального – $0,029$ $1/ч$; частично синтетического – $0,027$ $1/ч$ и синтетического – $0,22$ $1/ч$.

Приращение испаряемости трансмиссионных масел (рис. 4.56, б) приобретает максимальное значение в первые часы испытания, а затем уменьшается. Максимальное значение приращения испаряемости для масел составило: минерального – $0,22$ г/ч, частично синтетического – $0,65$ г/ч

и синтетического – 0,48 г/ч, а минимальное значение: для минерального – 0,025 г/ч, частично синтетического – 0,09 г/ч и синтетического – 0,01 г/ч.

Сравнив зависимости приращения скорости окисления и испарения, видим, что в определенное время ход зависимостей находится либо в противофазе, либо в фазе. Это объясняется перераспределением тепловой энергии между процессами окисления и испарения. Явление перераспределения тепловой энергии характеризует процессы самоорганизации, протекающие в смазочном материале, в результате которых сброс избыточной энергии происходит по двум каналам – изменению оптических свойств и испаряемости, т. е. избыточная энергия поглощается самими продуктами. Для оценки интенсивности процессов самоорганизации предложен коэффициент K_c , определяемый отношением

$$K_c = dK_{\text{п}}/dV_G, \quad (4.30)$$

где $dK_{\text{п}}$ и dV_G – приращение коэффициентов поглощения светового потока и испаряемости соответственно.

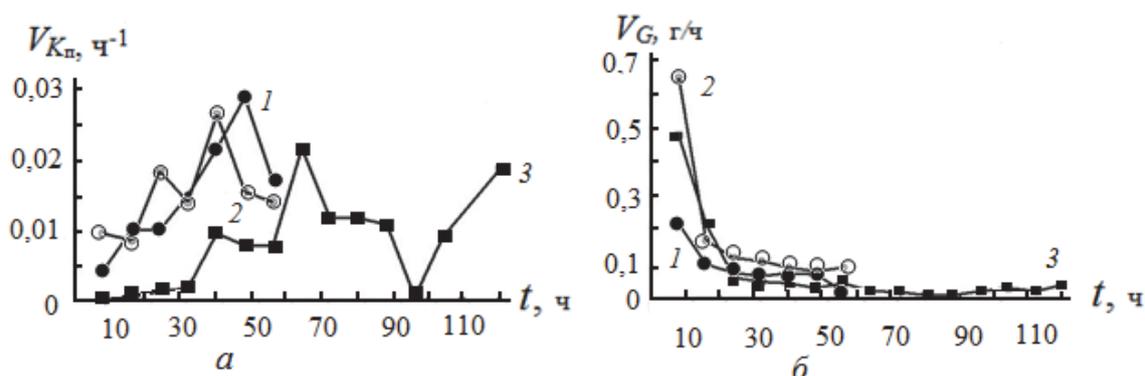
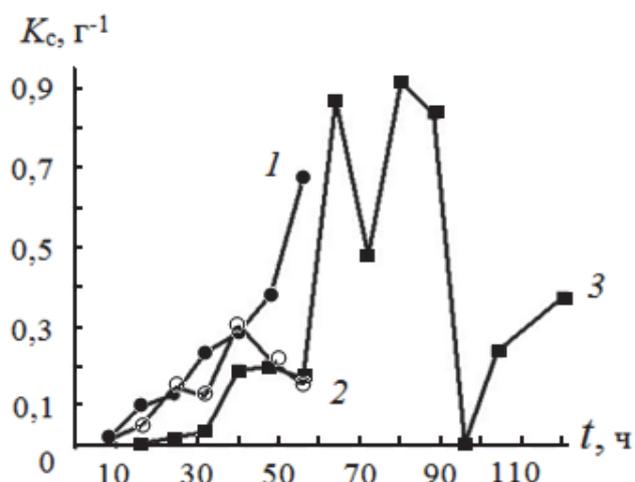


Рис. 4.56. Зависимости приращения скорости окисления (а) и испаряемости (б) от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – минерального BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетического BIZOLHYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетического BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

Согласно данным (рис. 4.57) коэффициент интенсивности процессов самоорганизации для минерального трансмиссионного масла (кривая 1) сохраняет тенденцию к увеличению за весь период испытания, т. е. процессы окисления преобладают над процессами испарения. Для частично синтетического масла (кривая 2) за периоды времени испытания от 24 до 32 ч и от 40 до 56 ч процессы испарения преобладают над процессами окисления. Для синтетического масла (кривая 3) за период времени испытания 40 ч процессы самоорганизации протекают менее интенсивно по сравнению с минеральным и частично синтетическим маслами. Однако после 56 ч испытания наблюдается резкое увеличение коэффициента K_c , характеризующего резкое увеличение скорости окисления, а за период времени от 64

до 96 ч наблюдаются большие колебания коэффициента K_c за счет более интенсивного снижения скорости испарения.

Рис. 4.57. Зависимости коэффициента интенсивности процессов самоорганизации, протекающих в трансмиссионных маслах различной базовой основы при температуре окисления 150 °С: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5



Сопротивляемость масел температурным воздействиям предложено оценивать коэффициентом сопротивления окислению R_o , определяемым по формуле (4.6) и учитывающим процессы окисления и испарения. Показано (рис. 4.58, а), что зависимость $R_o = f(t)$ для минерального товарного масла (кривая 1) описывается линейным уравнением

$$R_o = -at + 0,995, \quad (4.31)$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость понижения сопротивляемости масла окислению; 0,995 – коэффициент, характеризующий сопротивляемость товарного масла окислению.

Регрессионное уравнение сопротивляемости минерального масла окислению имеет вид

$$R_o = -0,000875t + 0,995. \quad (4.32)$$

Коэффициент корреляции составил 0,993.

Для частично синтетического масла (кривая 2) зависимость описывается полиномом второго порядка, а регрессионное уравнение имеет вид

$$R_o = -1,488 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0024t + 0,9855, \quad (4.33)$$

где 0,0024 – коэффициент, характеризующий скорость уменьшения сопротивляемости масла окислению; $1,488 \cdot 10^{-5}$ – коэффициент, характеризующий замедление сопротивления окислению; 0,9855 – коэффициент, характеризующий сопротивляемость окислению товарного масла перед окислением. Коэффициент корреляции составил 0,9989.

Для синтетического трансмиссионного масла BIZOLHYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3) понижение коэффициента сопротивления окислению начи-

нается после 16 ч термостатирования. Зависимость $R_o = f(t)$ описывается полиномом второго порядка

$$R_o = 9,3422 \cdot 10^{-5}(t-16)^2 - 0,002(t-16) + 1,0265. \quad (4.34)$$

Коэффициент корреляции составил 0,993.

Сравнив значения скоростей уменьшения сопротивления окислению, видим, что наибольшим сопротивлением окислению характеризуется минеральное масло, а наименьшим – частично синтетическое (кривая 2). Зависимости коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока для трансмиссионных масел различной базовой основы представлены на рис. 4.58, б. Регрессионные уравнения данных зависимостей имеют вид для масел:

минерального BIZOL 80W-90 GL4:

$$R_o = 0,0746K_{\Pi}^2 - 0,1142 K_{\Pi} + 0,9939, \quad (4.35)$$

коэффициент корреляции составил 0,993;

частично синтетического BIZOLHYPOID 75W-90 GL4;GL5

$$R_o = 0,1348K_{\Pi}^2 - 0,2176 K_{\Pi} + 0,9897, \quad (4.36)$$

коэффициент корреляции составил 0,9652;

синтетического BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

$$R_o = 0,221 K_{\Pi}^2 - 0,2616K_{\Pi} + 0,9932, \quad (4.37)$$

коэффициент корреляции составил 0,9585.

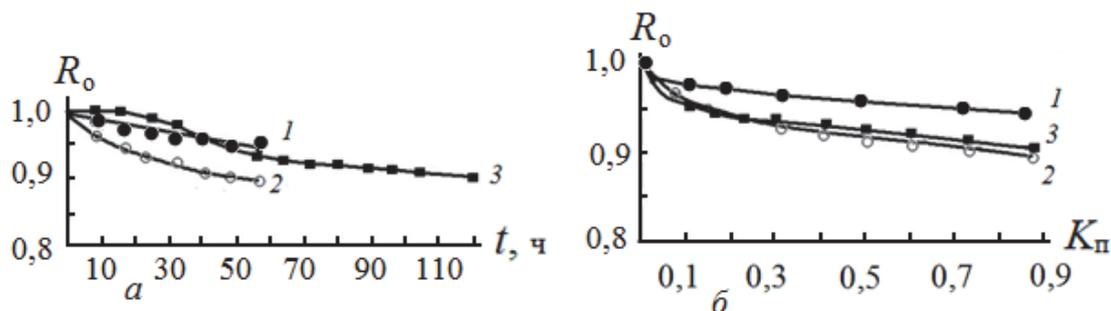


Рис. 4.58. Зависимости коэффициента сопротивления окислению от времени испытания (а) и коэффициента поглощения светового потока (б) при окислении трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

Таким образом, наибольшим сопротивлением окислению характеризуется минеральное масло (кривая 1), а наименьшим – частично синтетическое (кривая 2).

Влияние продуктов окисления на противоположные свойства трансмиссионных масел оценивалось среднеарифметическими значениями диа-

метров пятен износа на трех шарах по результатам двух параллельно проводимых опытов (рис. 4.59). Установлено, что для минерального масла (рис. 4.59, *a* кривая 1) противоизносные свойства повышаются при увеличении коэффициента поглощения светового потока (концентрации продуктов окисления). Для частично синтетического масла (кривая 2) при значениях коэффициента $K_{\text{п}} < 0,2$ ед. противоизносные свойства стабильны, а при значениях $K_{\text{п}} > 0,2$ ед. они повышаются и превышают противоизносные свойства товарного масла (точка на ординате). Для синтетического масла (кривая 3) противоизносные свойства соответствуют товарному маслу (точка на ординате) при значениях $K_{\text{п}} < 0,2$ ед., при значениях $K_{\text{п}}$ от 0,2 до 0,3 ед. они понижаются, в диапазоне изменения коэффициента $K_{\text{п}}$ от 0,3 до 0,4 ед. повышаются, а при значениях $K_{\text{п}} > 0,4$ ед. стабилизируются.

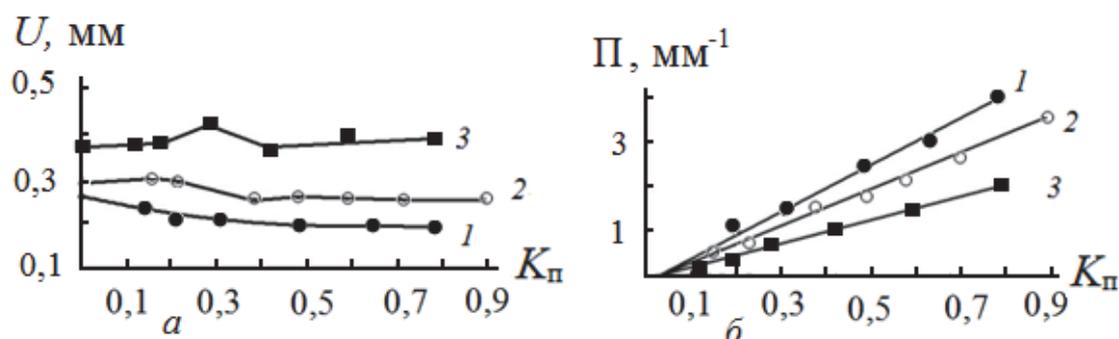


Рис. 4.59. Зависимости диаметра пятна износа (*a*) и критерия противоизносных свойств (*б*) от коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ при окислении трансмиссионных масел

Повышение противоизносных свойств масел вызвано образованием при окислении смолистых веществ, которые адсорбируются во впадинах микронеровностей, образуя гидравлическую «подушку», разделяющую поверхности трения и тем самым уменьшая износ. Этот механизм характерен для минерального и частично синтетического масел. В синтетическом масле при центрифугировании смолистые вещества не обнаружены, поэтому при изменении коэффициента $K_{\text{п}}$ в пределах от 0,2 до 0,3 ед. износ повышается. Для минеральных и частично синтетических масел осадок при центрифугировании принимает гелеобразное состояние.

Из представленных данных (рис. 4.59, *a*) видим, что наивысшими противоизносными свойствами характеризуется минеральное масло BIZOL-80W-90 GL4 (кривая 1), а значительно низшими – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3).

Для оценки противоизносных свойств трансмиссионных масел предложен критерий Π (мм^{-1}), определяемый эмпирическим отношением (рис. 4.59, *б*) [10] по формуле 4.10. Данный критерий характеризует кон-

центрацию продуктов окисления на площади фрикционного контакта, зависимость которого (рис. 4.59, б) описывается линейным уравнением вида

$$\Pi = a (K_{\text{п}} - \epsilon), \quad (4.38)$$

где a – скорость изменения критерия Π ; $K_{\text{п}}$ – коэффициент поглощения светового потока; ϵ – оптические свойства товарного масла.

Регрессионные уравнения для исследуемых масел имеют следующий вид:

минерального

$$\Pi = 5,32(K_{\text{п}} - 0,03); \quad (4.39)$$

частично синтетического

$$\Pi = 4,082(K_{\text{п}} - 0,03); \quad (4.40)$$

синтетического

$$\Pi = 2,667(K_{\text{п}} - 0,03). \quad (4.41)$$

Коэффициент корреляции равен 0,9694.

Коэффициенты 5,32; 4,082 и 2,667 характеризуют скорость изменения критерия противоизносных свойств. Чем она больше, тем выше противоизносные свойства исследуемого масла. Коэффициент 0,03 характеризует значение коэффициента поглощения светового потока исходного масла. Согласно уравнениям (4.40–4.42) наибольшая скорость изменения критерия противоизносных свойств Π установлена для минерального масла, а наименьшая – синтетического, т. е. концентрация продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта больше у первого масла, чем у второго, за счет меньшей площади пятна износа. Поэтому чем больше скорость изменения критерия Π , тем выше противоизносные свойства исследуемого масла.

Применение в качестве показателя противоизносных свойств площади пятна износа S и критерия Π , позволяет сравнить их с данными, полученными с применением диаметра пятна износа (рис. 4.60). Данные, приведенные на рис. 4.60, подтверждают, что более высокими противоизносными свойствами характеризуется минеральное масло BIZOL 80W-90 GL4 (кривая 1), а более низкими – синтетическое масло BIZOLHYPOID 75W-90 GL5 (кривая 3). Например, площадь фрикционного контакта при коэффициенте поглощения светового потока $K_{\text{п}} = 0,7$ ед. для масел имеет следующие значения: для минерального – $0,03 \text{ мм}^2$, частично синтетического – $0,05 \text{ мм}^2$ и синтетического – $0,12 \text{ мм}^2$.

Сравнив данные рис. 4.60 и 4.61, видим, что для вычисления критерия противоизносных свойств можно пользоваться как диаметром, так

и площадью пятна износа. Оба метода вычисления критерия определяют лучшие масла по показателю противоизносных свойств.

Зависимости критерия противоизносных свойств Π_s , вычисленного через площадь фрикционного контакта (рис. 4.61), описываются линейными регрессионными уравнениями для масел следующих марок:

минерального BIZOL 80W-90 GL4

$$\Pi_s = 34,85(K_{\Pi} - 0,04); \quad (4.42)$$

частично синтетического BIZOLHYPOID 75W-90 GL4;GL5

$$\Pi_s = 21,88(K_{\Pi} - 0,06); \quad (4.43)$$

синтетического BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

$$\Pi_s = 9,29(K_{\Pi} - 0,05). \quad (4.44)$$

Коэффициент корреляции составил 0,9865.

Согласно уравнениям (4.43–4.45) лучшие противоизносные свойства показало минеральное трансмиссионное масло (кривая 1), а худшие – синтетическое трансмиссионное (кривая 3).

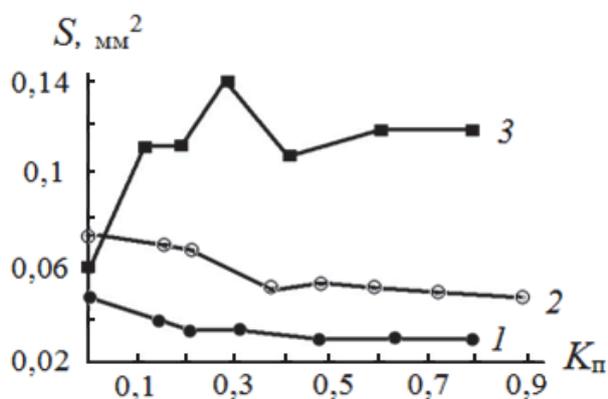


Рис. 4.60. Зависимости номинальной площади фрикционного контакта от коэффициента поглощения светового потока при испытании окисленных трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4;GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

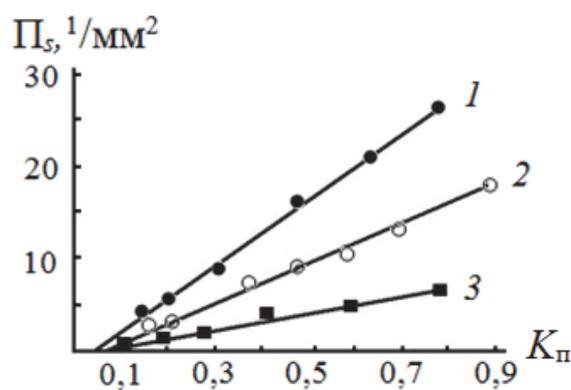


Рис. 4.61. Зависимости критерия противоизносных свойств, выраженного через номинальную площадь фрикционного контакта, от коэффициента поглощения светового потока при испытании трансмиссионных масел: 1 – минеральное BIZOL 80W-90 GL4; 2 – частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4, GL5; 3 – синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL5

В табл. 4.2 приведены экспериментальные данные испытания трансмиссионных масел различной базовой основы, которые приняты в качестве

дополнительных показателей при оценке термоокислительной стабильности и влияния продуктов окисления на противоизносные свойства.

Из представленных в табл. 4.2 данных видно, что лучшими показателями характеризуется минеральное масло BIZOL 80W-90 GL4. Оно уступает синтетическому маслу по потенциальному ресурсу и критерию термоокислительной стабильности, а по остальным показателям его превосходит, особенно по противоизносным свойствам. Если сравнивать исследованные масла по группам эксплуатационных свойств, то классификация минерального масла занижена, а синтетического – завышена, особенно по противоизносным свойствам.

Таблица 4.2

**Экспериментальные данные испытания трансмиссионных масел
различной базовой основы**

Показатель масла	Марка масла		
	Минеральное BIZOL- 80W-90 GL4	Частично синтетическое BIZOLHYPOID 75W-90 GL4, GL5	Синтетическое BIZOLHYPOID- 75W-90 GL5
Потенциальный ресурс при температуре 150 °С и коэффициенте $K_n = 0,8$ ед.	55,0	50,0	114
Коэффициент относительной кинематической вязкости в конце испытания, мм ² /с	1,1	1,41	1,22
Испаряемость после 40 ч испытания, г	4,3	9,2	7,0
Критерий термоокислительной стабильности после 40 ч испытания, ед.	0,532	0,728	0,178
Коэффициент сопротивляемости окислению при температуре 150 °С после 40 ч испытания, ед.	0,959	0,913	0,957
Критерий противоизносных свойств Π при коэффициенте $K_n = 0,8$ ед. (диаметр пятна износа)	4,1	3,2	2,1
Критерий противоизносных свойств Π_s при коэффициенте $K_n = 0,8$ ед. (площадь контакта)	26,75	16,0	6,7

Таким образом, рекомендуемые дополнительные показатели качества трансмиссионных масел позволяют объективно оценить их термоокислительную стабильность, ресурс, изменение кинематической вязкости, испаряемости, а также сопротивление температурным воздействиям и противоизносные свойства.

4.7. Результаты исследования минерального трансмиссионного масла МТ-8п, находящегося в трансмиссиях при хранении техники

Моторно-трансмиссионное масло МТ-8п (ТУ 38.101127–85) – масло селективной очистки из восточной сернистой нефти; содержит композицию противоизносных, антикоррозионных, антиокислительных и моющих присадок, депрессатор температуры застывания и антипенную добавку. Применяют как трансмиссионное в планетарных передачах гусеничных машин, а также в системе гидроуправления некоторых специальных машин. Относится к классу вязкости 9, кинематическая вязкость – $8,0\text{--}9,0\text{мм}^2/\text{с}$ при $100\text{ }^\circ\text{C}$, индекс вязкости не менее 90, температура вспышки в открытом тигле не ниже $+180\text{ }^\circ\text{C}$, температура застывания не выше $-30\text{ }^\circ\text{C}$.

Пробы масла (массой 500 г) отбирали из бортовых редукторов и коробок передач 23 гусеничных машин, находящихся на хранении, и подвергали фотометрированию с целью определения коэффициента поглощения светового потока путем прямого фотометрирования при толщине фотометрируемого слоя 2 мм. Часть пробы массой 15 г подвергали центрифугированию с повторным фотометрированием верхнего слоя для установления концентрации растворимых продуктов старения, а разность между значениями концентрации общих и растворимых продуктов старения позволила определить концентрацию в масле нерастворимых продуктов.

Распределение значений концентрации продуктов старения в масле представлено в виде гистограмм на рис. 4.62, где показано, что из 23 проб в 17-ти концентрация общих продуктов старения (a), выраженная коэффициентом поглощения светового потока $K_{\text{п}}$, составляет 0,2 ед., в 5-ти пробах – 0,3 ед., в 1-й – 0,4 ед.; концентрация растворимых продуктов старения $K_{\text{пр}}$ (b) в 15-ти пробах составила 0,1 ед., в 5-ти пробах – 0,2 ед., в 3-х – 0,3 ед. Концентрация нерастворимых продуктов старения $K_{\text{пн}}$ (рис. 4.62, b) колеблется от 0,02 до 0,1 ед. В большинстве проб (14 ед.) концентрация составила 0,04 ед., а наибольшая – 0,1 ед. – в 2-х пробах. Из представленных гистограмм видим, что в трансмиссионных маслах присутствуют в основном растворимые продукты старения, а их концентрация почти в три раза превышает концентрацию нерастворимых продуктов.

Таким образом, применение фотометра и центрифуги позволяет определить состав продуктов старения трансмиссионных масел при длительном хранении техники.

Важными показателями, влияющими на свойства масел при эксплуатации техники, являются вязкость и концентрация влаги. Вязкость масла определялась на малообъемном вискозиметре, а концентрация влаги в масле – на приборе для термостатирования. При этом в стеклянный стакан заливали пробу масла массой $100 \pm 0,1$ г и термостатировали при температуре 120°C с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 ± 5 об/мин. Продолжительность термостатирования составляла 20 мин, что обосновано экспериментально. После испытания пробу термостатированного масла взвешивали на электронных весах с точностью 0,1 г.

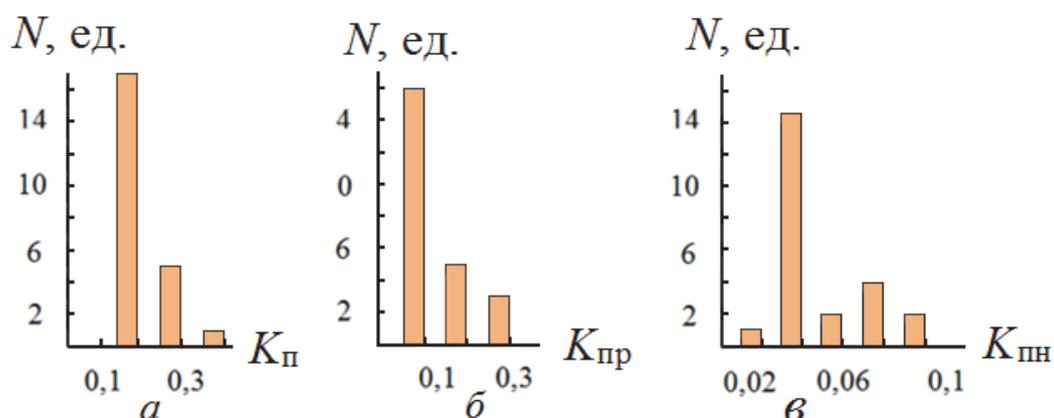


Рис. 4.62. Гистограммы распределения концентраций общих $K_{\text{п}}$ (а), растворимых $K_{\text{пр}}$ (б) и нерастворимых $K_{\text{пн}}$ (в) продуктов старения трансмиссионных масел МТ-8п при хранении техники

Результаты измерения вязкости и концентрации влаги представлены гистограммами на рис. 4.63, а, б, где показано, что вязкость масел большинства проб (18 ед.) соответствует стандарту $8\text{--}9 \text{ мм}^2/\text{с}$, и только в двух пробах она составляет $7 \text{ мм}^2/\text{с}$, а в трех – $10 \text{ мм}^2/\text{с}$. Концентрация влаги колеблется в пределах от 0,1 до 0,6 %: наибольшее количество проб (6 ед.) содержит влаги до 0,5 %, наименьшая концентрация (0,1 %) установлена в двух пробах, а в четырёх пробах она составила 0,6 %. Она характеризует условия хранения техники и герметичность масляных систем.

Противоизносные свойства трансмиссионных масел, находящихся в технике на хранении, оценивались на трёхшариковой машине трения [87], техническая характеристика которой и методика испытания представлены в главе 3. Противоизносные свойства оценивали по диаметру пятна износа, а результаты исследования представлены на рис. 4.64.

Установлено, что параметр износа колеблется от 0,3 до 0,5 мм, причём для большинства проб (11 шт.) он находится в пределах от 0,3 до 0,4 мм. Для оценки влияния сроков хранения масел на их сопротивляемость окислению пробы масел термостатировались при температуре 150°C в течение 3 ч в приборе для термостатирования, при этом пробу масла массой 100 г

перемешивали с частотой вращения мешалки 300 ± 5 об/мин. После испытания пробу взвешивали для определения массы испарившегося масла. Затем отбирали пробу для фотометрирования и определения изменения коэффициента поглощения светового потока $K_{пр}$. Результаты термостатирования, представленные в виде гистограмм (см. рис. 4.65), показывают, что по сравнению с исходными пробами масел коэффициент поглощения светового потока термостатированных масел сместился в сторону увеличения: перед термостатированием максимальное количество проб (17 ед.) имело коэффициент поглощения светового потока 0,2 ед., после термостатирования он составил 0,4 ед. для 14-ти проб, причём 5 проб достигли значения коэффициента 0,7 ед.

Испаряемость масел при термостатировании (рис. 4.66) – от 2 до 5 г, причём для 8-ми проб она составила 2 г, 9-ти проб – 4 г. В 5 пробах установлена максимальная испаряемость – 5 г.

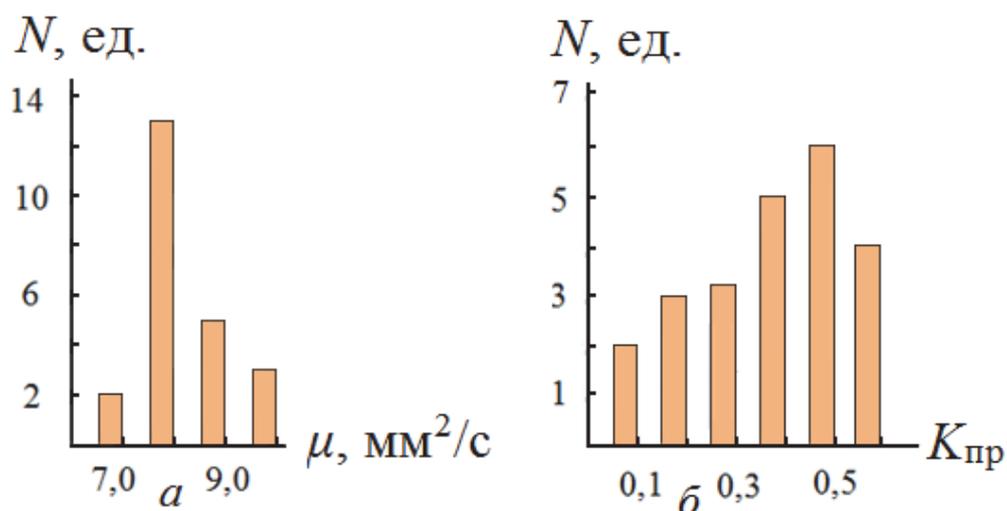


Рис. 4.63. Гистограммы распределения вязкости (а) и концентрации воды (б) в трансмиссионных маслах МТ-8п при хранении техники

Зависимость параметра износа от коэффициента поглощения светового потока $K_{пр}$ (рис 4.67) показывает, что при одном и том же значении коэффициента износ имеет неодинаковые значения. Это объясняется различиями в составе продуктов старения, их свойствах, условиях хранения техники и её техническом состоянии, содержании влаги и концентрации продуктов, попадающих извне (атмосферная пыль).

Представленные данные показывают, что применение предлагаемого метода и средств контроля позволяет получить дополнительную информацию о состоянии трансмиссионных масел при длительном хранении техники и принять своевременные меры по устранению причин, вызывающих изменение вязкости, концентраций нерастворимых продуктов старения

и влаги, а также противоизносных свойств. В этом случае необходимо провести исследования товарных масел, применяемых в трансмиссиях бронетехники, определить их сопротивляемость температурным воздействиям в температурном диапазоне от 120 до 150 °С, оценить влияние продуктов окисления на вязкость и противоизносные свойства. Ещё нужно установить температурную область работоспособности и температуры начала окислительных процессов и испаряемости, а также определить интенсивность механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте, обосновать критерии термоокислительной стабильности и противоизносных свойств и определить лучшие масла среди исследованных.

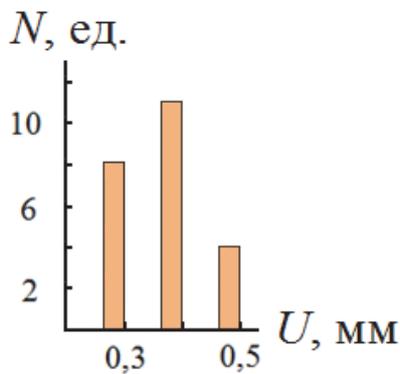


Рис. 4.64. Гистограмма распределения противоизносных свойств трансмиссионных масел МТ-8п при хранении техники

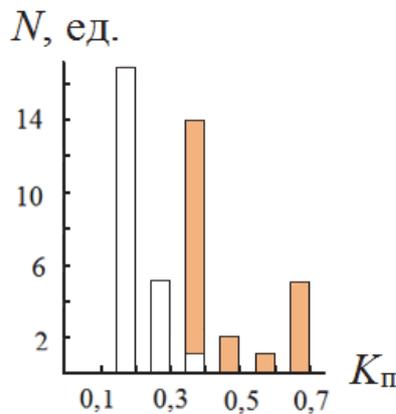


Рис. 4.65. Гистограмма распределения оптических свойств трансмиссионных масел МТ-8п при хранении техники: ■ – масел МТ-8п после окисления исходные пробы масел; □ – после окисления при температуре 150 °С в течение 3 ч

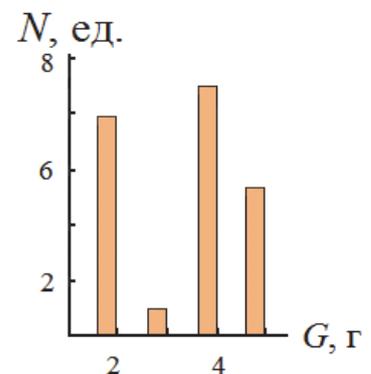


Рис. 4.66. Гистограммы распределения испаряемости трансмиссионных масел МТ-8п при температуре 150 °С

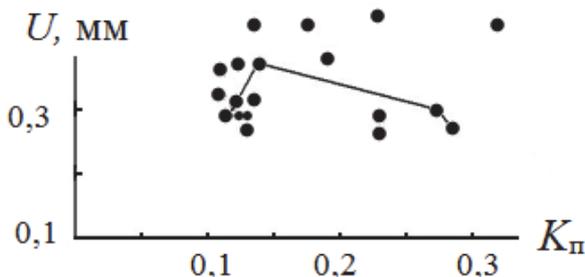


Рис. 4.67. Зависимость диаметра пятна износа от концентрации общих продуктов старения трансмиссионных масел МТ-8п при хранении бронетехники

Важное значение имеют исследования масел с различными сроками хранения для установления оптимальных сроков.

5

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

5.1. Результаты исследования отработанных частично синтетических моторных масел

Для исследования выбраны отработанные частично синтетические моторные масла: Zic A Plus 10W–40 SL/CF– 4ед.; BPVisco 3000 10W–40 SJ/CF – 4ед.; Texaco Havoline Extra10W-40SJ/CF – 5 ед.; Ravenol TSI10W – 40SM/CF – 3ед.; ТНК Супер 5W – 40 SL/CF – 1ед.; Esso Ultra 10W – 40SJ/CF –3 ед. Всего – 20 ед.

Данные масла являются всесезонными и применялись в бензиновых двигателях различных типов легковых автомобилей разной степени изношенности, слиты на пункте технического обслуживания при плановой смене [208]. Исследования масел проводились по методике, описанной в главе 3. Отобранную из картера двигателя пробу масла в объёме 0,2 л делили на части, фотометрировали при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм, определяли степень загрязнённости по коэффициенту поглощения светового потока K_n по формуле (3.1). Часть пробы использовали для измерения вязкости и оценки отработанного ресурса по данному параметру. Часть пробы центрифугировали в течение 1 ч на центрифуге с частотой вращения ротора 8000 об/мин с последующим фотометрированием при той же толщине фотометрируемого слоя и определением концентрации растворимых продуктов старения $K_{пр}$. По разности между коэффициентами поглощения светового потока до и после центрифугирования находили концентрацию $K_{пн}$ нерастворимых продуктов старения масла.

Анализ проб отработанных частично синтетических моторных масел прямым фотометрированием (табл. 5.1) показал, что их оптические свойства, оцениваемые коэффициентом поглощения светового потока, находятся в пределах от 0,17 до 0,51 ед.

Это свидетельствует о том, что при установлении инструктивных сроков службы моторных масел не учитывают индивидуальных особенностей каждого конкретного двигателя. Концентрация нерастворимых продуктов старения находится в пределах от 0,04 до 0,22 ед. и зависит не только от режимов и условий эксплуатации двигателя, его технического состояния,

но и от состояния системы фильтрации. Чем больше загрязнена система фильтрации, тем меньше её производительность, а значит, в работающем масле накапливаются эксплуатационные загрязнения, поэтому коэффициент поглощения светового потока уменьшается. Концентрация нерастворимых продуктов старения в работе рекомендуется в качестве диагностического параметра состояния фильтрующих элементов системы смазки. Эксплуатация масел с большей концентрацией примесей приводит к загрязнению фильтрующих элементов системы смазки, маслопроводящих каналов и нарушению режимов смазки, что в целом влияет на долговечность узлов трения.

Таблица 5.1

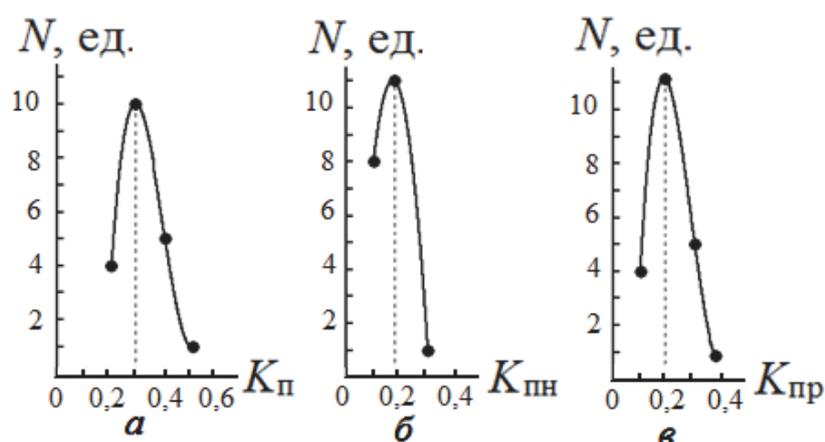
Результаты исследования отработанных частично синтетических моторных масел

№ п/п	Марка масла	Пробег автомобиля, км	Продолжительность работы масла, км	Концентрация продуктов старения		
				$K_{п}$	$K_{пр}$	$K_{пн}$
1	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	161 450	8 000	0,23	0,11	0,12
2	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	184 190	16 000	0,40	0,26	0,14
3	Zic A Plus 5W-30 SL/CF	173 190	11 500	0,51	0,29	0,22
4	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	135 290	8 000	0,29	0,12	0,17
5	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	164 500	9 000	0,33	0,19	0,14
6	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	135 500	10 000	0,19	0,12	0,07
7	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	98 700	10 700	0,17	0,11	0,06
8	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	114 000	7 000	0,17	0,13	0,04
9	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	66 800	8 800	0,41	0,37	0,04
10	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	176 500	10 000	0,27	0,12	0,15
11	Texaco Havoline Extra 10W-40 SJ/CF	188 460	9 800	0,25	0,21	0,04
12	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	85 242	10 000	0,33	0,15	0,18
13	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	103 000	12 500	0,37	0,23	0,14
14	Ravenol HCS 5W-40 SL/CF	195 130	10 000	0,24	0,13	0,11
15	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	319 666	10 000	0,22	0,13	0,09
16	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	30 820	11 000	0,17	0,10	0,07
17	ТНКСупер 5W-40 SL/CF	76 200	10 000	0,24	0,10	0,08
18	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	156 215	6 000	0,24	0,08	0,16
19	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	135 066	10 000	0,29	0,11	0,18
20	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	158 550	6 000	0,24	0,08	0,16

С целью установления предельного состояния отработанных частично синтетических моторных масел при плановой смене проводили статистическую обработку результатов их фотометрирования. Кривые распределения степени загрязнения отработанных частично синтетических моторных масел представлены на рис. 5.1.

Процессы старения представляет собой случайную функцию, а закономерности – это математические ожидания данной случайной функции. В связи с этим математическое ожидание предельного значения по концентрации общих продуктов старения у большинства отработанных частично синтетических масел (10 ед.) по коэффициенту поглощения светового потока K_{Π} составляет 0,3 ед. (рис. 5.1, *a*).

Рис. 5.1. Кривые распределения концентрации общих (*a*), нерастворимых (*б*) и растворимых (*в*) продуктов старения отработанных частично синтетических моторных масел



Кривая распределения концентрации общих продуктов старения частично синтетических отработанных масел описывается уравнением

$$N_{\text{чс}} = 2000K_{\Pi}^3 - 2350K_{\Pi}^2 + 855K_{\Pi} - 89. \quad (5.1)$$

Коэффициент корреляции составил 0,89.

Концентрация нерастворимых продуктов старения (рис. 5.1, *б*) для большинства отработанных частично синтетических моторных масел по значению коэффициента поглощения светового потока $K_{\Pi\Pi}$ составляет 0,2 ед., а уравнение регрессии имеет вид

$$N_{\text{чс}} = -650K_{\Pi\Pi}^2 + 225K_{\Pi\Pi} - 8. \quad (5.2)$$

Коэффициент корреляции составил 0,86.

Математическое ожидание предельного значения отработанных частично синтетических моторных масел по концентрации растворимых продуктов старения $K_{\Pi\Pi}$ (рис. 5.1, *в*) составляет 0,2 ед., а уравнение имеет вид

$$N_{\text{чс}} = 2000K_{\Pi\Pi}^3 - 1750K_{\Pi\Pi}^2 + 445K_{\Pi\Pi} - 25. \quad (5.3)$$

Коэффициент корреляции составил 0,87.

На рис. 5.1, *a* видно, что четыре пробы отработанных масел не достигли предельного состояния, а шесть проб превысили его значение. Поэтому для определения резерва ресурса и оценки сопротивляемости окислению отработанные масла подвергали термостатированию при температуре 180 °С в течение 20 ч.

Любой смазочный материал обладает потенциальной энергией, определяемой качеством базовой основы и комплектом присадок, придающих ему необходимые свойства, однако в процессе эксплуатации двигателя эта энергия расходуется на сопротивление внешним воздействиям. В результате сопротивляемости стареет базовая основа, уменьшается концентрация присадок, а внутренняя энергия смазочного материала снижается. В этом случае испытание масел с различной внутренней энергией при одинаковых температурных условиях приводит к изменению коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$, которое можно объяснить различиями в составе продуктов старения, техническом состоянии цилиндропоршневой группы, фильтрующих элементов системы смазки, топливной аппаратуры и в концентрации продуктов неполного сгорания топлива, попадающего в картер двигателя. На рис. 5.2 показаны зависимости изменения коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ от времени испытания.

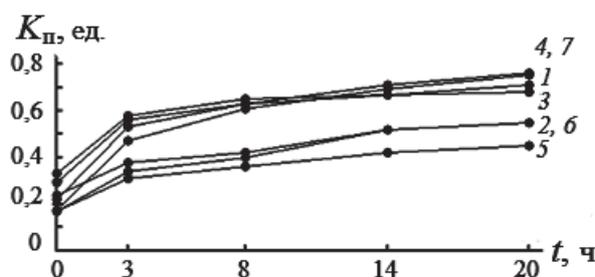


Рис. 5.2. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания при температуре (180 °С) отработанных частично синтетических моторных масел: 1 – Texaco Havoline Extra 10W–40SJ/CF; 2 – Esso Ultra 10W–40SJ/CF; 3 – EssoUltra 10W–40SJ/CF; 4 – Ravenol TSI 10W–40 SM/CF; 5 – BP Visco 3000 10W–40 SJ/CF; 6 – BP Visco 3000 10W–40 SJ/CF; 7 – Ravenol TSI 10W–40 SM/CF

Эти зависимости можно представить двумя участками: начальным (время испытания 3 ч), где наблюдается резкое увеличение коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$, и участком с менее интенсивным его изменением.

Характер изменения коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ в зависимости от наработки может быть различным. Из приведённых данных (рис. 5.2) видно, что исходное значение оптических свойств отработанных моторных масел на первом участке находится в интервале от 0,17 до 0,33 ед., а после их термостатирования (180 °С) в течение 3 ч значения коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ увеличиваются от 0,31 до 0,58 ед. С увеличением времени испытания значения коэффициента поглощения светового потока изменяются незначительно. Однако установлено, что изменения коэффициента $K_{\text{п}}$ не зависят от его исходного значения, а определяются сопротивляемостью масла температурным воздействиям. Так, на рис. 5.2 пробы масла № 5–7 имеют одинаковые исходные значения коэффициента $K_{\text{п}}$, но после термостатирования в течение 3 ч они значительно различаются. Это подтверждает то, что данные отработанные масла

имеют различную сопротивляемость окислению, а значит, и ресурс. Анализ зависимостей $K_{\text{п}} = f(t)$ показал, что значения коэффициентов поглощения светового потока после термостатирования масел в течение 3 ч подтверждают индивидуальность процесса их старения в каждом конкретном двигателе внутреннего сгорания. Мы предлагаем коэффициент $K_{\text{р}}$ работоспособности масел, который определяют по выражению

$$K_{\text{р}} = (K_{\text{пт}} - K_{\text{п исх}}) / K_{\text{п исх}}, \quad (5.4)$$

где $K_{\text{пт}}$ и $K_{\text{п исх}}$ – соответственно значения коэффициента поглощения светового потока термостатированного и исходного отработанных масел.

Данный показатель определяет относительное изменение оптических свойств отработанных масел, характеризует их сопротивляемость окислению при термостатировании и учитывает два фактора: температуру и время испытания. Поэтому для сравнительной оценки различных работавших моторных масел их испытания необходимо проводить при одинаковых температурах и времени. Коэффициент $K_{\text{р}}$ работоспособности частично синтетических отработанных масел (рис. 5.2) составил: 1 – 0,758; 2 – 0,583; 3 – 0,932; 4 – 1,409; 5 – 0,824; 6 – 1; 7 – 1,78 ед. Установлено, что чем больше концентрация продуктов старения в моторном масле, тем больше значения коэффициента $K_{\text{р}}$, поэтому при обосновании предельного значения этого показателя можно корректировать ресурс масел, что повысит эффективность их использования. Из представленных данных видно, что наибольшее значение коэффициента $K_{\text{р}}$ установлено для масла Ravenol TSI 10W–40 SM/CF (рис. 5.2).

Для обоснования предельного состояния отработанных частично синтетических моторных масел использовали данные статистической обработки исходных и термостатированных масел (время испытания 3 ч, прил., табл. П1). Это позволило учитывать резерв по ресурсу тех масел, оптические свойства которых ниже установленного предельного значения для исходных масел. Поэтому пересечение кривых распределения коэффициента поглощения светового потока для исходных и термостатированных масел более объективно определяет их предельное состояние (рис. 5.3).

Согласно полученным данным предельное состояние отработанных масел устанавливается при значении коэффициента поглощения светового потока, равном 0,38 ед. По его величине определяют время замены моторных масел. Однако для практического применения этого показателя установлен допуск $\pm 0,02$ ед. от предельного значения коэффициента $K_{\text{п}}$.

По результатам испытания отработанных масел после их термостатирования видно (см. табл. 5.2), что пробы масел № 1–17 не достигли предельного значения $K_{\text{п пр}} = 0,38$ ед., что составляет 85 % исследованных проб масел, т. е. они слиты из двигателей досрочно и имеют резерв в при-

менении. Пробы масел под № 18–20 (15 % от числа исследованных масел) превысили предельное значение коэффициента $K_{п пр}$, т. е. двигатели работали на непригодном масле.

Испаряемость – эксплуатационный показатель, характеризующий качество любого смазочного материала. Этот показатель характеризует не только экологические свойства, температурную область их применения, но и (косвенно) износ цилиндропоршневой группы. На рис. 5.4 представлены зависимости испаряемости G от времени и температуры испытания (180 ± 1 °С). Установлено, что после 3 ч испытания интенсивность испарения моторных масел наибольшая и масла различаются по этому показателю, что подтверждает разное техническое состояние цилиндропоршневой группы. Увеличение испаряемости можно объяснить попаданием в картер двигателя продуктов неполного сгорания топлива за счёт износа цилиндропоршневой группы, уменьшения концентрации вязкостной присадки [209]. Кроме того, при сгорании топлива, наряду с окислами азота и углерода, образуется вода, которая может быть в эмульсионном или растворённом состоянии и оказывать влияние на величину показателя испаряемости [97].

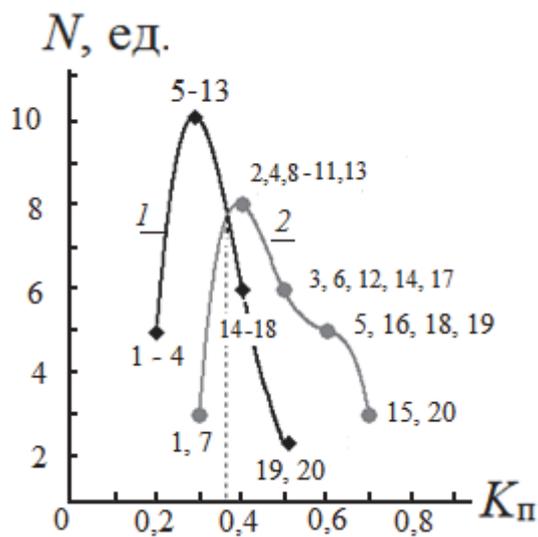


Рис. 5.3. Графическая модель определения предельного состояния отработанных частично синтетических моторных масел по коэффициенту поглощения светового потока: 1 – распределение исходных проб масел; 2 – распределение термостатированных проб масел в течение 3 ч

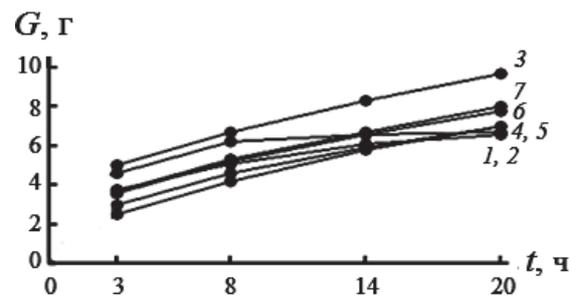


Рис. 5.4. Зависимости испаряемости от времени термостатирования отработавших частично синтетических моторных масел (условные обозначения см. на рис. 5.2)

Испаряемость отработавших масел описывается уравнением регрессии второго порядка

$$G = at^2 + bt + c, \quad (5.5)$$

где a и b – коэффициенты, характеризующие склонность исследуемого масла к испарению; c – коэффициент, характеризующий концентрацию легких фракций в масле.

Результаты испытания рис. 5.5 партии отработанных частично синтетических масел показали (прил., табл. П2), что их испаряемость изменяется от 1,8 до 9,9 г. Согласно представленным данным гистограммы (рис. 5.5) у половины (10 ед.) проб масел испаряемость составила 4,0 г. Практическое применение термостатирования отработанных масел в течение 3 ч позволяет получить информацию о техническом состоянии цилиндропоршневой группы для парка машин и использовать её для плановых ремонтов двигателей.

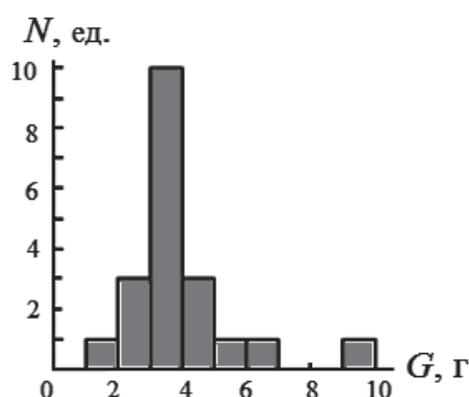


Рис. 5.5. Гистограмма испаряемости отработанных частично синтетических моторных масел после окисления в течение 3 ч при температуре 180 °С

Одно из важнейших свойств масла – вязкость, имеющая многостороннее эксплуатационное значение. От вязкости зависит режим смазки пар трения, отвод тепла от рабочих поверхностей, уплотнение зазоров, величина энергетических потерь в двигателе, его эксплуатационные качества, быстрота запуска двигателя, прокачивание масла по системе смазки, охлаждение трущихся деталей и их очистка от загрязнений.

Вязкость масла, реагируя на изменение работоспособности систем двигателя, режимов работы, качества эксплуатационных материалов, уровня технического обслуживания, позволяет эксплуатационникам сделать своевременные выводы о состоянии узлов и агрегатов автомобиля [209]. Вязкость следует учитывать как показатель, характеризующий предельное состояние отработанных масел. Изменение вязкости исследуемого масла при окислении оценивалось коэффициентом относительной вязкости K_{μ} , определяемым выражением

$$K_{\mu} = \mu_{\text{отр.}} / \mu_{\text{тов.}}, \quad (5.6)$$

где $\mu_{\text{тов}}$ и $\mu_{\text{отр.}}$ – кинематическая вязкость товарного и отработанного масел соответственно, сСт.

Применение данного коэффициента позволяет определить изменение вязкости отработанных масел по отношению к товарному маслу и оценить

процентное изменение. Результаты термостатирования 20 проб отработанных частично синтетических масел приведены в (прил., табл. ПЗ) и на рис. 5.6.

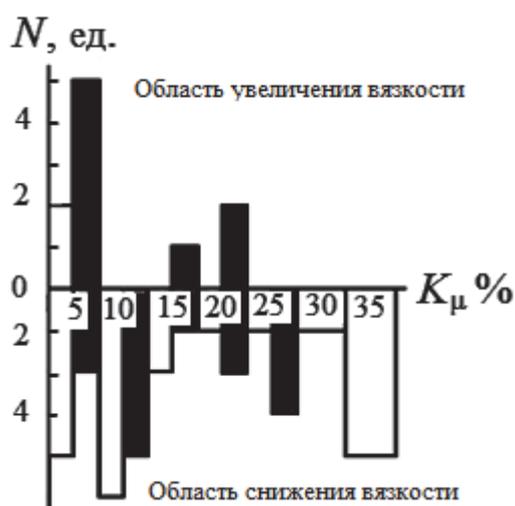


Рис. 5.6. Гистограммы изменения коэффициента относительной вязкости отработанных частично синтетических моторных масел по отношению к вязкости товарных масел: □ – пробы исходных масел; ■ – пробы масел, окисленных в течение 3 ч испытания при температуре 180 °С

Показано, что вязкость отработанных масел ниже вязкости товарных на 5–35 %, а увеличение на 5 % установлено в двух пробах. Ряд авторов [167; 177] ресурс моторных масел рекомендуют оценивать изменением вязкости, причём недопустимо увеличение вязкости работающего масла на 25 % для бензиновых двигателей и на 35 % для дизельных двигателей. При снижении вязкости отработавшего масла на 20 % масло также необходимо заменить, так как нарушается режим жидкостного трения. Научное и практическое значение представляют исследования изменения вязкости при термостатировании отработанных частично синтетических моторных масел, поскольку синтетическая добавка по-разному влияет на этот показатель. Согласно представленным данным увеличение вязкости установлено для восьми проб масел (рис. 5.6). Для большинства проб окисленных масел вязкость ниже, чем товарных, на 5–25 %. Такое изменение вязкости зависит не только от режимов эксплуатации, вязкостно-температурной характеристики масла, но и системы доливов. Проведённые исследования показали, что предельное состояние отработанных моторных масел необходимо оценивать по вязкости, концентрации общих и нерастворимых продуктов старения и их сопротивляемости окислению.

5.2. Результаты исследования отработанных синтетических моторных масел

В этом пункте приведены результаты исследования отработанных синтетических моторных масел различных производителей: Esso Ultron 5W–40 SJ/CF, Texaco Havoline Synthetic 5W–40 SJ/CF, Castrol GTX

Magnatec 10W–40 SL/CF, BP Visco 5000 5W–40 SL/CF, Shell Helix Ultra 0W–40 SL/CF, Ravenol VSI 5W–40 SM/CF. Масла являются всесезонными и универсальными и могут применяться как в бензиновых, так и в дизельных двигателях. Испытания выбранных масел проводились в соответствии с методикой, описанной в главе 3, в два этапа. Первый этап включает определение и обработку экспериментальных данных процессов старения, на втором – исследуемые масла термостатировали при температуре 180 °С в течение 20 ч и фотометрировали при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм. В табл. 5.2 (прил., табл. П4) приведены результаты фотометрирования отработанных синтетических масел, слитых при техническом обслуживании легковых автомобилей, в количестве 20 ед.

Таблица 5.2

Результаты исследования отработанных синтетических моторных масел

№ п/п	Марка масла	Пробег автомобиля, км	Продолжительность работы масла, км	Концентрация продуктов старения		
				K_p	$K_{пр}$	$K_{пн}$
1	Visco BP 5000 5W–40 SJ/CF	196 000	5 000	0,12	0,04	0,08
2	Visco BP 5000 5W–40 SJ/CF	145 700	12 000	0,29	0,15	0,14
3	Visco BP 5000 5W–40 SJ/CF	113 300	9 000	0,19	0,13	0,06
4	Mobil 1 Rally Formula 5W–50 SJ/CF	164 500	9 000	0,4	0,29	0,11
5	Mobil 1 Rally Formula 5W–50 SJ/CF	124 650	11 000	0,31	0,20	0,11
6	Mobil 1 Rally Formula 5W–50 SJ/CF	223 950	10 000	0,06	0,03	0,03
7	Mobil Synthetic 5W–40 SJ/CF	132 300	8 000	0,61	0,59	0,02
8	Castrol GTX Magnatec 5W–40 SL/CF	39 878	8 000	0,11	0,09	0,02
9	Castrol GTX Magnatec 5W–40 SL/CF	230 000	10 000	0,4	0,12	0,28
10	Castrol GTX Magnatec 10W–40 SL/CF	28 500	10 000	0,28	0,15	0,13
11	Castrol GTX Magnatec 10W–40 SL/CF	173 600	20 000	0,23	0,19	0,04
12	Castrol Formula RS 10W–60 SL/CF	74 700	9 000	0,13	0,09	0,04
13	Castrol TXT Softec Plus 5W–30 SJ/CF	98 633	10 000	0,21	0,12	0,09
14	Texaco Havoline Synthetic 5W–40 SJ/CF	89 500	9 000	0,31	0,09	0,22
15	Texaco Havoline Synthetic 5W–40 SJ/CF	39 180	10 000	0,54	0,28	0,26
16	ESSO Ultron 5W–40SL/CF	173 190	11 500	0,51	0,25	0,26
17	ESSO Ultron 5W–40SL/CF	158 500	10 500	0,35	0,15	0,2
18	ESSO Ultron 5W–40SL/CF	123 460	10 000	0,17	0,01	0,16
19	Shell Helix Ultra 0W–40 SL/CF	142 305	10 000	0,18	0,10	0,08
20	Ravenol VSI 5W–40 SM/CF	117 559	9 171	0,26	0,11	0,15

Анализ результатов прямого фотометрирования показал, что концентрация общих продуктов старения отработанных синтетических моторных масел находится в пределах от 0,06 до 0,61 ед., а концентрация нераство-

римых продуктов старения – в пределах от 0,02 до 0,28 ед. Эти данные подтверждают несовершенство существующей системы смены масел по пробегу, так как не учитываются индивидуальные условия эксплуатации и техническое состояние двигателей, частота доливов из-за угара масла и состояние цилиндропоршневой группы, влияющих на скорость его старения, что подтверждает актуальность решаемой в работе задачи.

Для определения предельного состояния отработанных синтетических моторных масел проводилась обработка результатов их фотометрирования. На рис. 5.7 представлены кривые распределения степени загрязнения отработанных синтетических моторных масел в зависимости от количества проб масел N . Математическое ожидание предельного значения (рис. 5.7, а) отработанных синтетических моторных масел по концентрации общих продуктов старения K_{Π} находится в пределах от 0,2 (6 ед.) до 0,3 ед. (6 ед.). Кривая распределения описывается регрессионным уравнением

$$N_c = 250K_{\Pi}^3 - 346,4K_{\Pi}^2 + 132,8K_{\Pi} - 9. \quad (5.7)$$

Коэффициент корреляции составил 0,86.

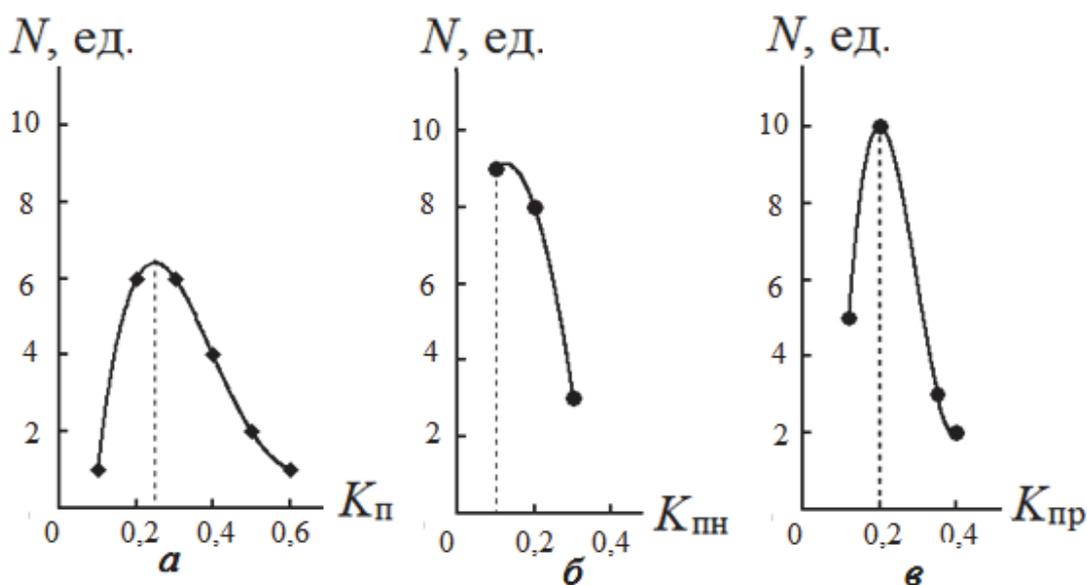


Рис. 5.7. Кривые распределения концентрации общих (а), нерастворимых (б) и растворимых (в) продуктов старения в отработанных синтетических моторных маслах

Концентрация нерастворимых продуктов старения $K_{\Pi H}$ (рис 5.7, б) для большинства отработанных синтетических моторных масел по значению коэффициента поглощения светового потока составляет 0,1 ед. Уравнение регрессии имеет вид

$$N_c = -200K_{\Pi H}^2 + 50K_{\Pi H} + 6. \quad (5.8)$$

Коэффициент корреляции составил 0,92.

Математическое ожидание по концентрации растворимых продуктов старения $K_{пр}$ (рис. 5.7, в) для синтетических обработанных масел составляет 0,2 ед., а уравнение имеет вид

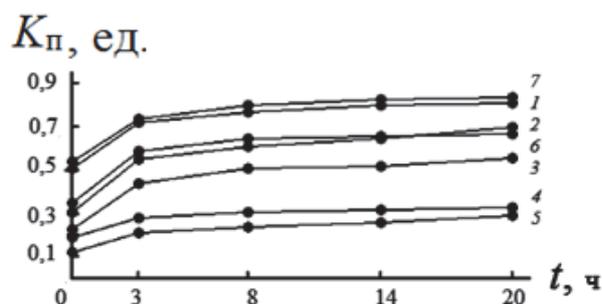
$$N_c = 2171K_{пр}^3 - 1929K_{пр}^2 + 509K_{пр} - 32. \quad (5.9)$$

Коэффициент корреляции составил 1.

По данным рис. 5.7, а установлено, что 7 проб обработанного масла не достигли предельного состояния, а 13 проб превысили его значение, поэтому для определения остаточного ресурса исследуемые масла испытывались на термоокислительную стабильность и противоизносные свойства.

Результаты термостатирования обработанных синтетических моторных масел представлены на рис. 5.8 в виде зависимостей коэффициента поглощения светового потока от времени испытания.

Рис. 5.8. Зависимости коэффициента поглощения светового потока от времени испытания при температуре 180 °С обработанных синтетических моторных масел: 1 – Esso Ultron 5W–40 SJ/CF; 2 – Esso Ultron 5W–40 SJ/CF; 3 – Castrol GTX Magnatec 10W–40 SL/CF; 4 – BP Visco 5000 5W–40 SL/CF; 5 – BP Visco 5000 5W–40 SL/CF; 6 – Texaco Havoline Synthetic 5W–40 SJ/CF; 7 – Texaco Havoline Synthetic 5W–40 SJ/CF



Данные зависимости не имеют принципиальных различий с обработанными частично синтетическими моторными маслами. Характерным признаком полученных зависимостей для обработанных синтетических моторных масел является начальное более интенсивное увеличение коэффициента поглощения светового потока с дальнейшим переходом к стабилизации, что служит общей закономерностью старения масел независимо от базовой основы. Зависимость $K_{п} = f(t)$ можно характеризовать двумя участками. На первом участке исходное значение оптических свойств обработанных моторных масел находится в интервале от 0,12 до 0,54 ед., на втором после их термостатирования в течение 3 ч наблюдается резкое увеличение коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ от 0,21 до 0,74 ед. Амплитуда изменения коэффициента $K_{п}$ зависит от его исходного значения. Увеличение коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ для данных обработанных синтетических моторных масел можно объяснить различным ресурсом: чем меньший ресурс отработало масло, тем меньше изменяется значение коэффициента поглощения светового потока, тем выше

сопротивляемость масла окислению. В этой связи разность между коэффициентами $K_{\text{п}}$ до и после окисления характеризует сопротивляемость масла окислению, причем чем больше концентрация продуктов старения в моторном масле, тем больший ресурс отработало испытываемое масло. Поэтому при обосновании предельного значения этого показателя можно корректировать его ресурс, что повысит эффективность использования моторного масла.

Коэффициент работоспособности $K_{\text{р}}$, определяемый выражением (5.4), для синтетических масел составил: 1 – 0,412; 2 – 0,686; 3 – 0,913; 4 – 0,474; 5 – 0,750; 6 – 0,774; 7 – 0,370 ед. Из представленных данных видно, что наибольшее значение коэффициента $K_{\text{р}}$ установлено для масла 3 – CastrolGTXMagnatec 10W–40 SL/CF.

Результаты испытания (рис. 5.8) показывают, что процесс старения моторных масел в двигателях внутреннего сгорания носит индивидуальный характер и определяется конструктивными особенностями двигателя, производительностью системы очистки и охлаждения, условиями и режимами эксплуатации, а также техническим состоянием топливной аппаратуры, цилиндропоршневой группы, качеством топлива и моторного масла. С увеличением времени испытания (рис. 5.8) значения коэффициента поглощения светового потока изменяются незначительно. Обоснование предельного состояния отработанных синтетических моторных масел производилось с учётом результатов их термостатирования. Распределение коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ отработанных синтетических моторных масел с учётом результатов термостатирования (рис. 5.9, прил., табл. П5) показывает, что предельное значение коэффициента поглощения светового потока, равное $K_{\text{п пр}} = 0,38 \pm 0,02$ ед., определяется пересечением зависимостей до и после окисления (штриховая линия).

По результатам испытания видно, что 16 проб не достигли предельного значения, т. е. слиты досрочно, две пробы масел превысили предельное значение, а две – вовремя.

Важным эксплуатационным показателем любого смазочного материала является его испаряемость (прил., табл. П6, рис. 5.10). Характерная особенность зависимостей $G = f(t)$ – это увеличение испаряемости отработанных масел после 3 ч термостатирования. Данный показатель для исследуемых масел колеблется от 1,6 до 3,3 г. Различия в массе испарившегося масла можно объяснить, с одной стороны, уменьшением вязкости отработанных масел, а с другой – концентрацией в нём продуктов неполного сгорания и топлива и воды.

Зависимости испаряемости от времени термостатирования отработанных синтетических моторных масел представлены на рис. 5.10. Наименее испаряемы синтетические моторные масла BP Visco 5000 5W–40 SL/CF

(кривая 4) 4,3г, BP Visco 5000 5W–40 SL/CF (кривая 5) 5,7 г. Поэтому есть основания утверждать, что в них присутствует малая концентрация продуктов неполного сгорания топлива и воды, что указывает на хорошее техническое состояние цилиндропоршневой группы двигателя. Наиболее испаряемы синтетические масла Esso Ultron 5W–40 SJ/CF (кривая 1) 7,7 г, и Texaco Havoline Synthetic 5W–40 SJ/CF (кривая 2) 6,8г.

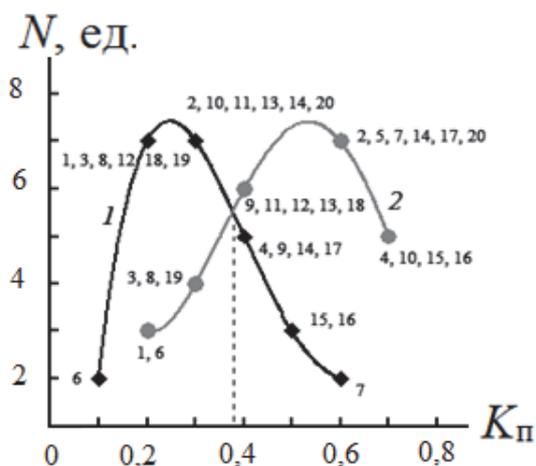


Рис. 5.9. Графическая модель определения предельного состояния отработанных синтетических моторных масел: 1 – распределение исходных проб масел; 2 – распределение термостатированных проб масел в течение 3 ч

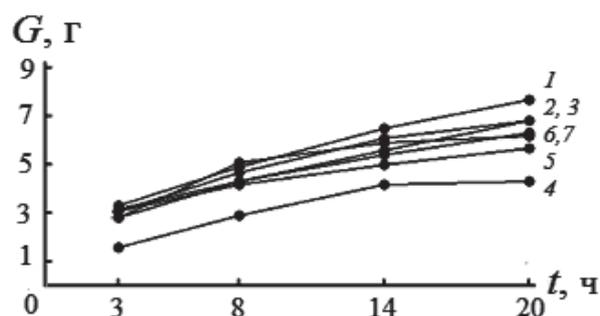


Рис. 5.10. Зависимости испаряемости от времени термостатирования отработанных синтетических моторных масел (условные обозначения см. на рис. 5.8)

Чем больше испаряемость, тем выше концентрация продуктов неполного сгорания топлива в масле, а значит, и степень износа цилиндропоршневой группы двигателя. Зависимости испаряемости увеличиваются по экспоненте, а регрессионное уравнение имеет вид

$$G = at^2 + bt + c. \quad (5.10)$$

Таким образом, параметр испаряемости после 3 ч испытания отработанных масел предлагается в качестве диагностического параметра для оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания (рис. 5.11).

Гистограмма испаряемости отработанных синтетических моторных масел после окисления в течение 3 ч при температуре 180 °С представлена на рис. 5.11. Показано, что из 20 проб отработанных масел в шести испаряемость составила менее 4 г, в семи – 4 г, в двух – 7 г и в одной пробе – 8 г. Данная информация позволяет оценить техническое состояние цилиндропоршневой группы двигателей и объективно планировать текущие ремонты.

Вязкость термостатированных в течение 3 ч отработанных синтетических моторных масел оценивалась коэффициентом относительной вязкости

K_{μ} (см. формулу (5.6)), результаты испытания представлены гистограммой в сравнении с вязкостью товарных масел (рис. 5.12, прил. табл. П6).

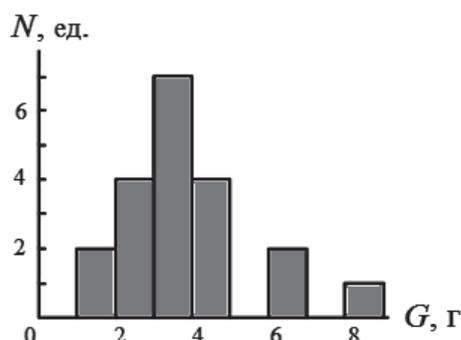


Рис. 5.11. Гистограмма испаряемости отработанных синтетических моторных масел после окисления в течение 3 ч при температуре 180 °С



Рис. 5.12. Гистограммы изменения коэффициента относительной вязкости отработанных синтетических моторных масел по отношению к вязкости товарных масел: □ – пробы исходных масел; ■ – пробы окисленных масел в течение 3 часов испытания при температуре 180 °С

Из числа исходных отработанных синтетических масел две пробы превысили вязкость товарного масла на 5 %, а предельное её снижение (ниже 20 %) установлено для 12 проб масел. После окисления масел в течение 3 ч вязкость увеличилась на 5 % у одной пробы и на 47 % у другой, у двух проб – на 10 %, а число проб ниже допустимой нормы (ниже 20 %) снизилось из 12 до 10 проб, что свидетельствует об испарении продуктов неполного сгорания топлива. Кроме того, установлено, что снижение вязкости на 20 % по литературным данным не обосновано, так как в условиях эксплуатации в некоторых двигателях вязкость синтетических масел уменьшилась на 30 % в пяти пробах, на 35 % и на 40 % – в двух. Таким образом, для синтетических отработанных моторных масел характерны две тенденции изменения относительной вязкости, летучести и коэффициента поглощения светового потока, характеризующиеся резким увеличением этих показателей в течение первых 3 ч термостатирования.

5.3. Различия в механизме старения моторных масел различных базовых основ

Испытания моторных масел различных базовых основ позволяют установить различия в механизме старения и уточнить эффективный

интервал замены. Для этого отбирают пробы работавших масел, делят на две части: первую фотометрируют, определяют коэффициент поглощения светового потока, вторую часть пробы постоянной массы термостатируют с перемешиванием при температуре 180 °С в течение 3 ч, фотометрируют, определяют коэффициент поглощения светового потока. Выбранные параметры испытания позволили сопоставлять результаты испытания исследуемых масел, работавших в двигателях различного технического состояния. Анализ проб масел показал, что их оптические свойства, оцениваемые коэффициентом поглощения светового потока, находятся в таких интервалах: для частично синтетических масел от 0,17 до 0,51 ед., а синтетических – от 0,06 до 0,61 ед. Концентрация нерастворимых продуктов старения составляет для частично синтетических масел – от 0,04 до 0,22 ед., синтетических – от 0,02 до 0,28 ед. Концентрация растворимых примесей, определяемая фотометрированием работавших масел после их центрифугирования, находится в таких интервалах: для частично синтетических масел от 0,08 до 0,37 ед., а для синтетических – от 0,01 до 0,59 ед.

Вязкость работавших частично синтетических масел изменяется в интервалах от 8,11 до 15,17 мм²/с, а синтетических – от 9 до 17,6 мм²/с, тогда как вязкость для частично синтетических товарных масел составляет 14 мм²/с, а синтетических – от 11,8 до 24,4 мм²/с. Эти данные подтверждают несовершенство существующей системы замены масел по пробегу, поскольку не учитываются индивидуальные условия эксплуатации и техническое состояние двигателей.

Таким образом, показатель предельного состояния для частично синтетических и синтетических масел по концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения находятся в близких пределах. Это предположение подтверждается анализом результатов работавших частично синтетических и синтетических моторных масел (рис. 5.13).

Значения концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения совпадают для большинства проб частично синтетических и синтетических масел, поэтому предельное значение концентрации общих продуктов старения работавших масел (рис. 5.13, а) принимается равным 0,3 ед., а с учётом допуска на 10 % – от 0,3 до 0,325 ед. Анализ представленных в табл. 5.1 и 5.2 результатов показывает, что из числа частично синтетических отработанных масел вышли за пределы установленного предельного значения 8 проб, а синтетических – 9 проб. Для обоснования предельного состояния и решения задачи по замене масел необходимо учитывать концентрацию нерастворимых продуктов старения, так как она косвенно характеризует состояние фильтрующих элементов системы смазки двигателя. Согласно полученным данным (рис. 5.13, б) предельное зна-

чение исследуемых масел по концентрации нерастворимых продуктов находится в интервале 0,2–0,22 ед. (с учётом допуска 10 %).

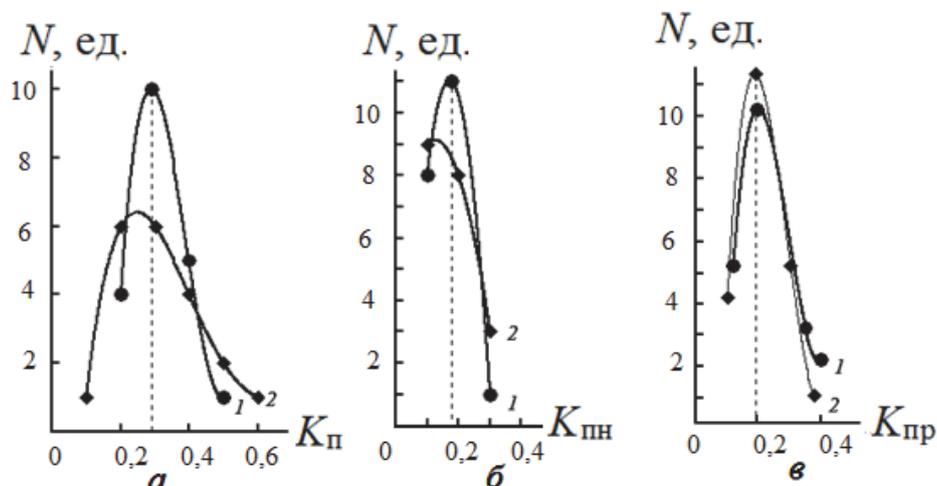


Рис. 5.13. Кривые распределения концентраций общих $K_{п}$ (а), нерастворимых $K_{пн}$ (б) и растворимых $K_{пр}$ (в) продуктов старения обработанных масел: 1 – частично синтетические масла; 2 – синтетические масла

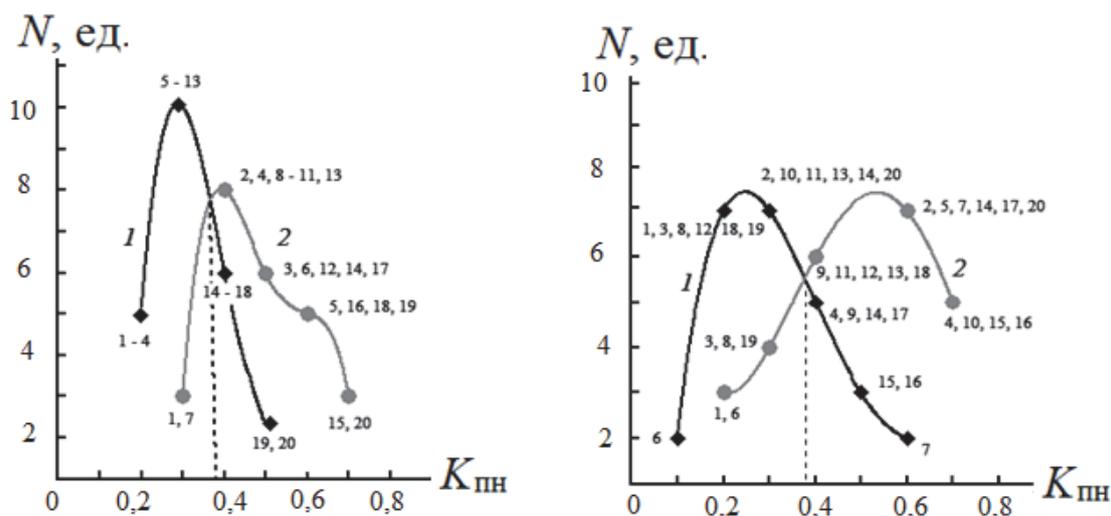


Рис. 5.14. Графическая модель определения предельного состояния обработанных частично синтетических (а) и синтетических (б) моторных масел: 1 – распределение исходных проб масел; 2 – распределение термостатированных проб масел в течение 3 ч

По результатам (табл. 5.1 и 5.2) принятое значение предельного состояния по концентрации нерастворимых продуктов превысили 3 пробы частично синтетических масел, 4 пробы синтетических масел. Установленное предельное состояние масел по концентрации общих продуктов старения занижено. Для уточнения предельного состояния масел необходимо определить их сопротивляемость температурным воздействиям.

На рис. 5.14 представлена графическая модель определения предельного состояния отработанных частично синтетических (а) и синтетических (б) моторных масел с учётом результатов термостатирования при температуре 180 °С (кривая 2) в течение 3 ч по значению коэффициента поглощения светового потока, соответствующему точке пересечения кривых распределения до и после термостатирования. Из рис. 5.14 видно, что после термостатирования при температуре 180 °С предельным состоянием по коэффициенту поглощения светового потока для отработанных частично синтетических и синтетических масел является значение коэффициента поглощения светового потока, равное 0,38 ед., а с учётом его изменения на $\pm 10\%$ установлен предел от 0,36 до 0,4 ед.

По результатам испытаний (табл. 5. 1 и 5. 2) установлено, что из 40 проб масел 5 проб переработали, 5 проб были заменены вовремя, а 30 проб не доработали до предельного состояния. Для обоснования принятого предельного состояния моторных масел различных базовых основ необходимо исследовать их противоизносные свойства.

5.4. Результаты исследования противоизносных свойств отработанных масел

Исследование противоизносных свойств отработанных частично синтетических и синтетических масел проводилось на партии из 10 масел по 5 проб каждой базовой основы с разными значениями коэффициента поглощения светового потока от 0,17 до 0,51 ед. Цель – определение динамики изменения противоизносных свойств. Результаты испытаний отработанных частично синтетических и синтетических моторных масел сведены в табл. 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3

Результаты испытаний отработанных частично синтетических моторных масел

№ п/п	Марка масла	K_p , ед.	U , мм	$K_p/U=\Pi$ 1/мм	$t_{фпк}$, мин.	$K_э$, ед.	$V_{фпк}$, мм/ч
1	Ravenol TSI 10W–40 SM/CF	0,17	0,3	0,57	12,5	0,4	0,024
2	BP Visco 3000 10W–40 SJ/ CF	0,17	0,34	0,50	18,8	0,3	0,018
3	Texaco Havoline Extra10W–40SJ/CF	0,33	0,365	0,9	12,0	0,75	0,030
4	Texaco Havoline Extra10W–40 SJ/CF	0,41	0,38	1,08	23,1	0,55	0,016
5	Zic 5W–30 SL/CF	0,51	0,35	1,45	50	0,25	0,007

Методика испытания на противоизносные свойства и принятые параметры трения описаны в главе 3.

Таблица 5.4

Результаты испытаний отработанных синтетических моторных масел

№ п/п	Марка масла	$K_{п\text{ исх.}}$ ед.	U , мм	$K_{п}/U=П$ 1/мм	$t_{фпк}$, мин.	$K_э$, ед.	$V_{фпк}$, мм/ч
1	Shell Helix Ultra 0W–40 SL/CF	0,18	0,3	0,6	18,7	0,4	0,016
2	Visco BP 5000 5W–40 SJ/CF	0,19	0,36	0,53	30	0,35	0,012
3	Texaco Havoline Synthetic 5W–40 SJ/CF	0,31	0,28	1,11	13,8	0,4	0,020
4	ESSO Ultron 5W–40SL/CF	0,35	0,28	1,25	9,4	0,6	0,029
5	Mobil 1 Rally Formula 5W–50 SJ/CF	0,4	0,318	1,26	13,1	0,65	0,024

На рис. 5.15 представлены диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт, по которым определялись продолжительность суммарной пластической и упругопластической деформаций отработанных частично синтетических моторных масел, обозначенных $t_{фпк}$, и коэффициент $K_э$ электропроводности фрикционного контакта за это же время.

Аналогичные диаграммы получены при испытании отработанных синтетических масел (рис. 5.16).

На диаграммах видны участки, где ток равен заданному (100 мкА), при этом происходит металлический контакт поверхностей трения за счет пластической деформации. В этот период формируются площади фактического контакта. Участки, где ток уменьшается до определенного значения, характеризуют продолжительность упругопластической деформации. Уменьшение тока зависит от интенсивности формирования на поверхностях трения химических соединений продуктов старения и присадок с металлической поверхностью. Участок стабилизации тока характеризует продолжительность упругой деформации, соотношение между скоростями образования и разрушения защитных пленок на поверхностях трения. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт, построены в порядке увеличения коэффициента поглощения светового потока, показывающего общую концентрацию продуктов старения масла. Продолжительность пластической и упругопластической деформаций различна, а это определяет диаметр пятна износа. Величина тока стабилизации и его амплитуда зависят от коэффициента поглощения светового потока (степени старения), коэффициент электропроводности $K_э$ фрикционного контакта определяется отношением тока, протекающего через контакт, к заданному току (100 мкА). С увеличением коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ амплитуда тока на участках его стабилизации уменьшается. В этой связи можно полагать, что величина коэффициента $K_э$ на участке стабилизации влияет на износ пары трения.

На рис. 5.17 представлены зависимости параметра износа от концентрации продуктов старения.

Установлено, что в предлагаемом диапазоне предельного состояния (0,36–0,4 ед.) отработанных масел (по общей концентрации продуктов старения) противоизносные свойства масел находятся также в диапазоне от 0,3 до 0,38 мм. Эти данные показывают, что предельное состояние ($K_{\text{п}}$) имеет резерв на увеличение. Влияние продуктов старения на электропроводность фрикционного контакта представлено зависимостью $K_3 = f(K_{\text{п}})$ (см. рис. 5.18).

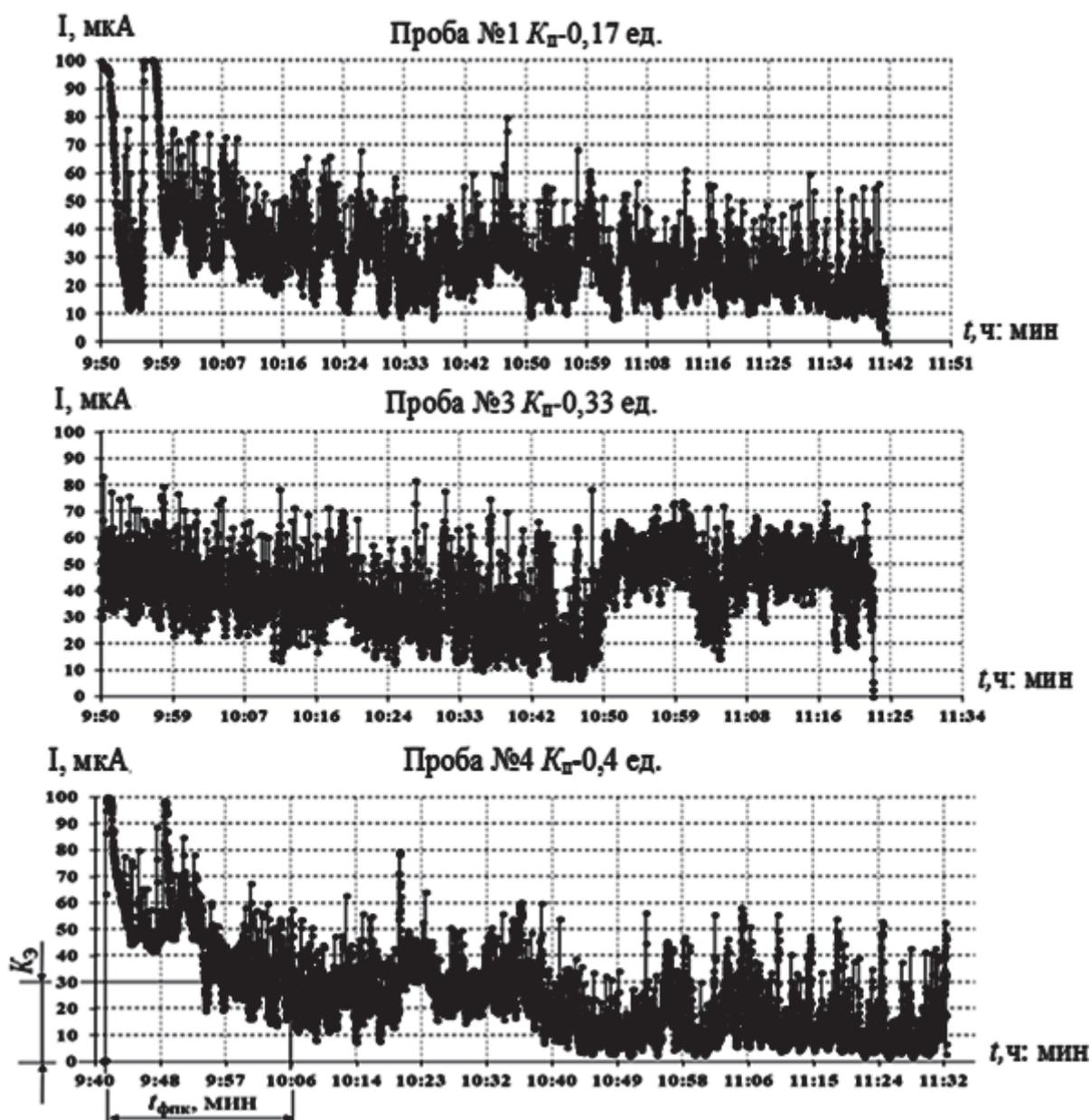


Рис. 5.15. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт, при испытании отработанных частично синтетических моторных масел

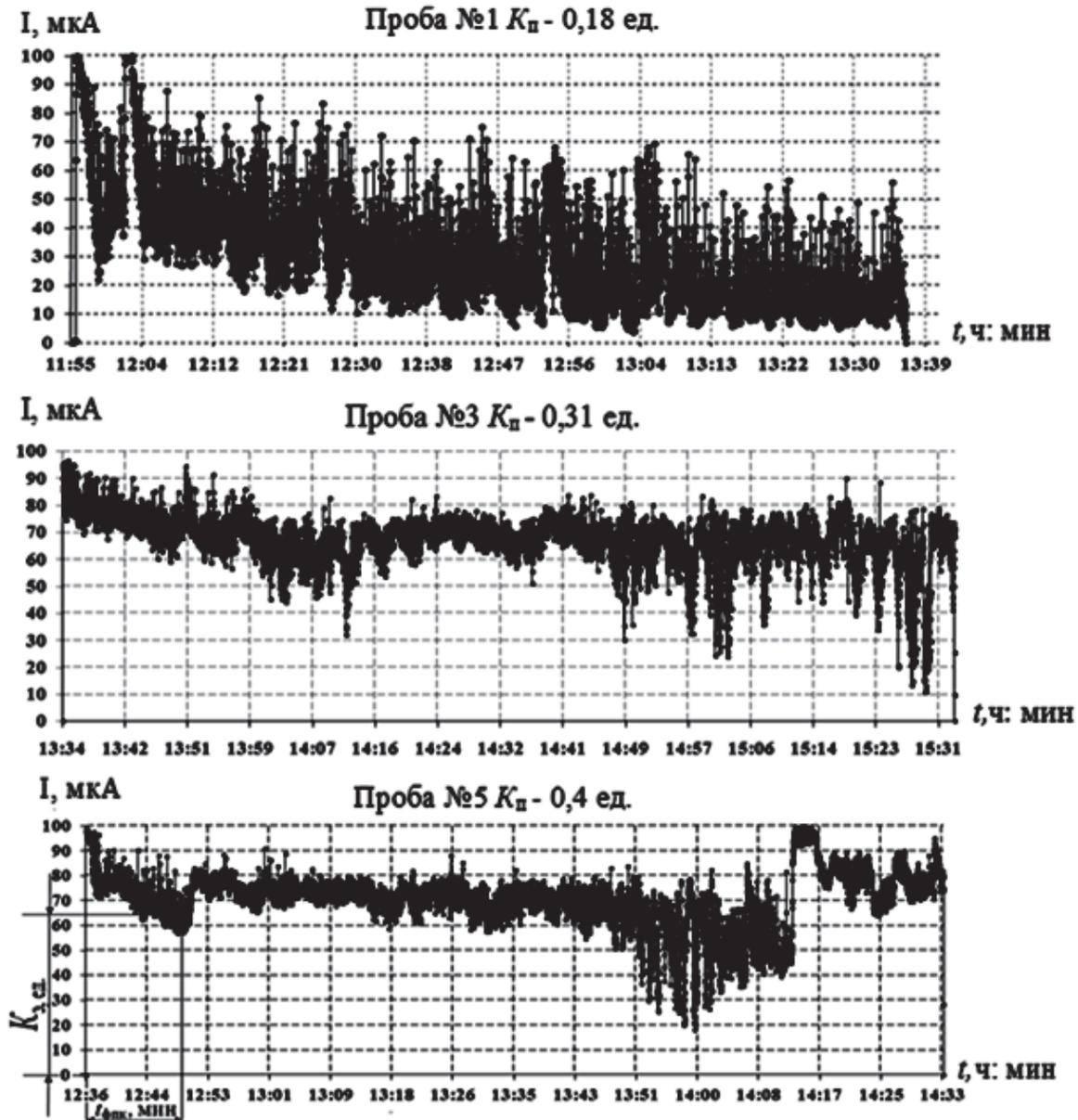


Рис. 5.16. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт, при испытании отработанных синтетических моторных масел

Показано, что с увеличением концентрации продуктов старения до предельного состояния коэффициент электропроводности возрастает как для частично синтетических, так и синтетических масел. Увеличение коэффициента вызвано уменьшением омического сопротивления граничных слоёв, разделяющих поверхности трения. Различие между базовыми основами масел заключается в том, что для частично синтетических масел коэффициент K_{γ} уменьшается в границах предельного состояния, что может объясняться наличием минеральной основы. Для синтетических масел наблюдается увеличение коэффициента K_{γ} во всём диапазоне изменения коэффициента поглощения светового потока. Значение коэффициента

электропроводности фрикционного контакта зависит от вида деформации и склонности смазочного материала к формированию на площади контакта граничного слоя, разделяющего поверхности трения. Была исследована зависимость между этими показателями (рис. 5.19).

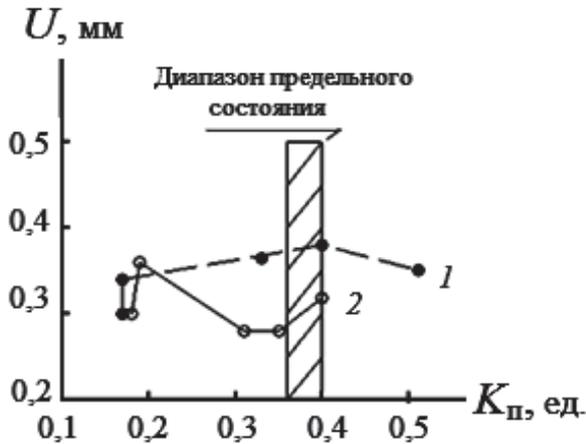


Рис. 5.17. Зависимости параметра износа U от концентрации продуктов старения отработанных масел: 1 – частично синтетические; 2 – синтетические

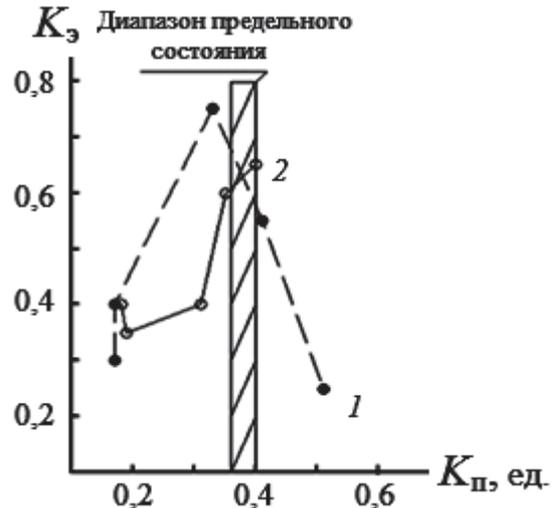


Рис. 5.18. Зависимости коэффициента электропроводности от коэффициента поглощения светового потока при испытании отработанных масел (условные обозначения см. на рис. 5.17)

Установлено, что до значения предельного состояния отработанных масел (штриховая зона) продолжительность суммарной деформации (пластической и упругопластической) не превышает 30 мин. Дальнейшее увеличение концентрации продуктов старения вызывает увеличение продолжительности деформаций как для частично синтетических, так и синтетических масел. Увеличение продолжительности деформаций должно увеличивать параметр износа, поскольку в этом случае на поверхности контакта не образуются прочные защитные хемосорбционные слои. Это подтверждается зависимостью диаметра пятна износа от продолжительности суммарных деформаций (рис. 5.20). Была установлена линейная связь между такими параметрами для частично синтетических и синтетических масел.

На рис. 5.21 показано влияние концентрации продуктов старения в отработанных моторных маслах на среднюю скорость формирования площади фрикционного контакта.

Данные исследования позволили оценить объективность выбора области предельного состояния отработанных масел. Показано, что до принятой области предельного состояния отработанных масел, оцениваемого по коэффициенту поглощения светового потока, средняя скорость формирования площади фрикционного контакта увеличивается в зоне, а после

неё – уменьшается. Увеличение скорости $V_{\text{фпк}}$ обеспечивает быстрое формирование площади контакта за счёт уменьшения времени, и, наоборот, уменьшение скорости $V_{\text{фпк}}$ вызвано увеличением времени $t_{\text{фпк}}$, поэтому существует резерв для повышения концентрации продуктов старения, а значит, для расширения области предельного состояния отработанных масел.

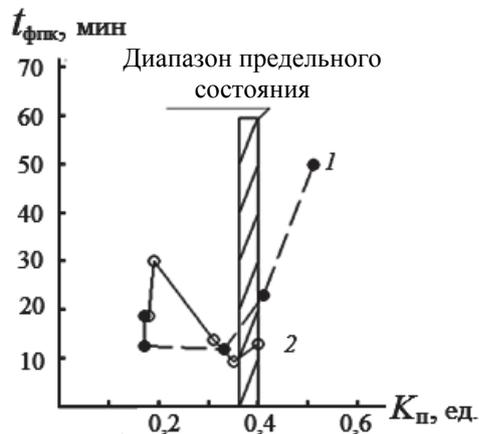


Рис. 5.19. Зависимости суммарной продолжительности пластической и упругопластической деформаций от концентрации продуктов старения в отработанных маслах (условные обозначения см. на рис. 5.17)

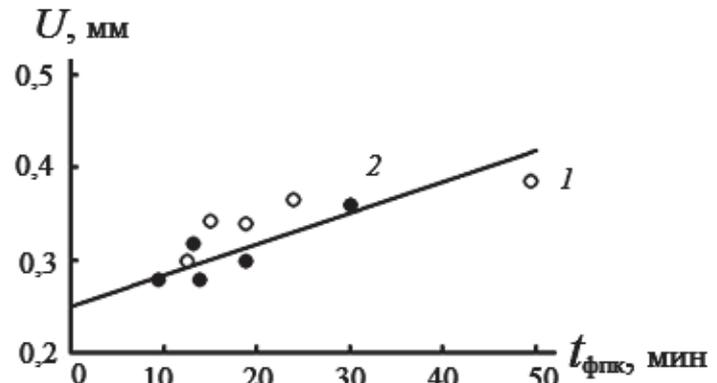


Рис. 5.20. Зависимость диаметра пятна износа от продолжительности суммарных пластической и упругопластической деформаций при испытании отработанных масел (условные обозначения см. на рис. 5.17)

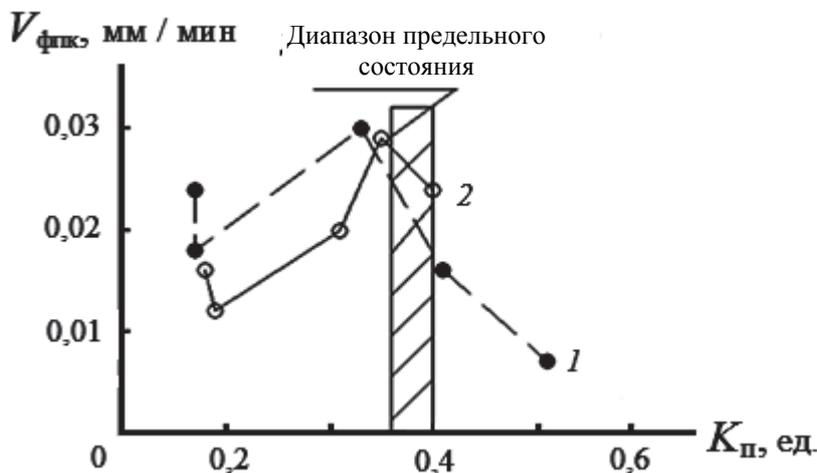


Рис. 5.21. Зависимость средней скорости формирования площади фрикционного контакта от концентрации продуктов старения в отработанных маслах (условные обозначения см. на рис. 5.17)

Таким образом, основным параметром, влияющим на коэффициент электропроводности фрикционного контакта, продолжительность и скорость его формирования, является концентрация продуктов старения в отработанных маслах. В этой связи на рис. 5.22 зависимость предложенного критерия противоизносных свойств отработанных масел Π , определяемого выражением (5.3), от концентрации продуктов старения $K_{\text{п}}$, описывается линейными уравнениями для масел:

частично синтетических (кривая 1)

$$\Pi = 2,84K_{п}; \quad (5.11)$$

синтетических (кривая 2)

$$\Pi = 3,33K_{п}. \quad (5.12)$$

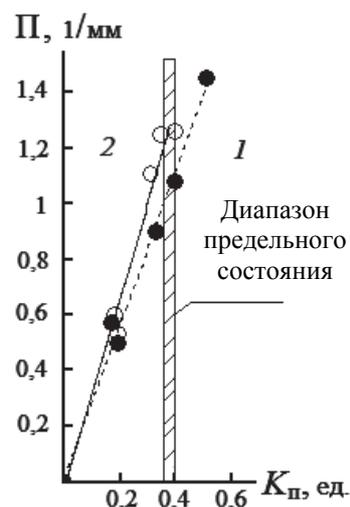


Рис. 5.22. Зависимость критерия противоизносных свойств от концентрации продуктов старения отработанных масел (условные обозначения см. на рис. 5.17)

Анализ зависимостей показывает, что предложенная область предельного работоспособного состояния частично синтетических и синтетических масел находится на линейных участках (штриховая зона), что позволяет прогнозировать противоизносные свойства работающих масел в период эксплуатации двигателя без проведения испытаний на износ. Для этого достаточно определить концентрацию продуктов старения в работающем масле, а по зависимости $\Pi = f(K_{п})$ определить его противоизносные свойства по выражению (5.11). Угол наклона зависимости $\Pi = f(K_{п})$ к оси абсцисс определяет скорость изменения критерия противоизносных свойств исследуемого масла, поэтому чем он больше, тем выше противоизносные свойства масла. Противоизносные свойства синтетических масел в диапазоне установленного предельного состояния (рис. 5.22) выше, чем у частично синтетических масел.

5.5. Динамика изменения эксплуатационных свойств моторных масел за нормативный срок службы

Эксплуатационные испытания – испытания качества моторного масла, используемого по назначению, проводимые в условиях реальной эксплуатации. Для оценки изменений эксплуатационных свойств

выбрано синтетическое масло Ravenol VSI 5W–40 SM/CF, изготовленное путём направленного органического синтеза на основе полиальфаолефинов. На пункте технического обслуживания при плановой смене масла двигатель был промыт специальной жидкостью (в течение 15 мин). Далее в двигатель было залито масло Ravenol VSI 5W–40 SM/CF. В процессе эксплуатации автомобиля из прогретого двигателя периодически отбирали пробу работавшего масла массой 50 г с помощью пробоотборника. Часть пробы масла использовали для прямого фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока. Вторую часть пробы массой 9 г центрифугировали в течение 1 ч, после чего ее подвергали повторному фотометрированию, причём пробу отбирали с верхнего слоя. Это позволило определить концентрацию растворимых продуктов старения, а по разности между коэффициентами поглощения светового потока до и после центрифугирования определяли концентрацию нерастворимых продуктов старения. Третью часть пробы массой 9 г использовали для определения кинематической вязкости, а оставшуюся часть пробы – для определения противоизносных свойств на трёхшариковой машине трения [210]. Изменение свойств моторного масла в процессе эксплуатации оценивали по коэффициенту поглощения светового потока $K_{п}$, измеряемому прямым фотометрированием при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм, по коэффициенту относительной вязкости K_{μ} , определяемому отношением вязкости работавшего масла к вязкости товарного масла и по его противоизносным свойствам по среднеарифметическому значению диаметров пятен износа на трёх шарах [211; 212].

На рис. 5.23 представлена зависимость коэффициента поглощения светового потока от пробега автомобиля.

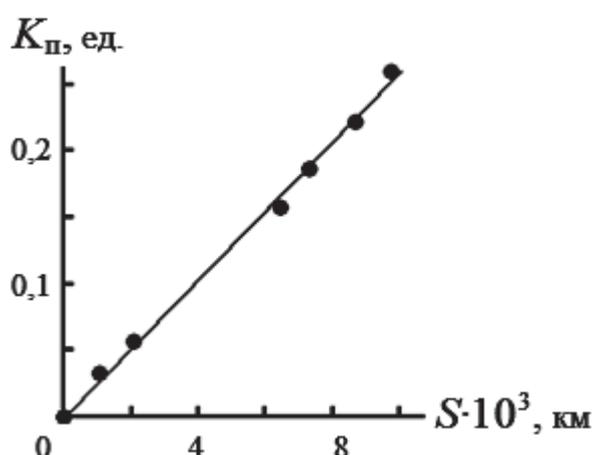


Рис. 5.23. Зависимость коэффициента поглощения светового потока от пробега автомобиля

Согласно инструкции по эксплуатации регламентируемый срок замены масел составляет 10 тыс. км пробега. Установлено, что после пробега автомобиля 9 742 км коэффициент поглощения светового потока составил

0,26 ед. Состав продуктов старения исследовали с помощью центрифугирования проб масел с последующим фотометрированием. Коэффициент поглощения светового потока после центрифугирования составил 0,093 ед., при этом концентрация нерастворимых продуктов – 0,167 ед.

Зависимость $K_{\pi} = f(S)$ (рис. 5.23) описывается линейным уравнением

$$K_{\pi} = aS, \quad (5.13)$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость процесса старения; S – пробег автомобиля, км.

Регрессионное уравнение имеет вид

$$K_{\pi} = 0,0255S + 0,0018. \quad (5.14)$$

Коэффициент корреляции – 0,98.

Данные исследования показали, что значения коэффициента светового поглощения не приблизились к обоснованному браковочному пределу, т. е. слитое масло обладало большим резервом.

Вязкость работавшего синтетического моторного масла в процессе эксплуатации подвержена колебаниям. Установлено, что за первую тысячу километров пробега вязкость уменьшилась на 16 % (рис. 5.24), а за вторую – уменьшилась по сравнению с товарным маслом на 6 %. Такое изменение вязкости может объясняться изменениями молекулярных связей из-за появления в масле продуктов старения и температурной деструкции вязкостной присадки. Дальнейшая эксплуатация автомобиля до пробега 8 700 км вызывает понижение вязкости на 25 %, после чего она вновь увеличивается.

Увеличение вязкости наступает при образовании нерастворимых продуктов старения. Зависимость $K_{\mu} = f(s)$ (рис. 5.24) характеризует изменение пусковых свойств моторного масла и может служить диагностическим параметром. Уменьшение вязкости в процессе эксплуатации двигателя определяет удовлетворительные пусковые свойства масла в холодный период эксплуатации, а в летний период снижение вязкости на 25 % нежелательно.

Противоизносные свойства работающего масла определяются концентрацией продуктов старения (рис. 5.25).

Установлено, что в начале эксплуатации двигателя на свежем масле (точка на ординате) его противоизносные свойства понижаются от 0,273 до 0,427 мм (штриховая линия), однако с увеличением пробега они повышаются и превышают противоизносные свойства товарного масла, т. е. с увеличением коэффициента поглощения светового потока противоизносные свойства работающего масла улучшаются. Это объясняется образованием смолистых веществ и увеличением кислотности масла, что способствует формированию на поверхностях трения хемосорбционных граничных слоёв. Полученные данные о противоизносных свойствах масла показывают, что

оно было слито досрочно, хотя и отработало нормативный пробег (10 000 км). На основании проведенных исследований и анализа литературных данных [213; 214] предложен критерий оценки противоизносных свойств П работающих масел, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к параметру износа, характеризующий условную концентрацию продуктов старения на номинальной площади фрикционного контакта (рис. 5.26).

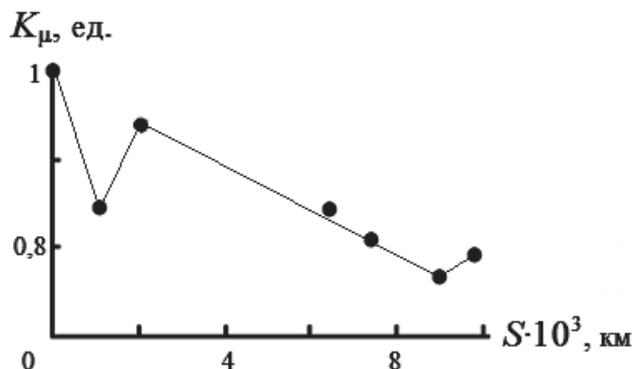


Рис. 5.24. Зависимость коэффициента относительной вязкости синтетического моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CF от пробега автомобиля

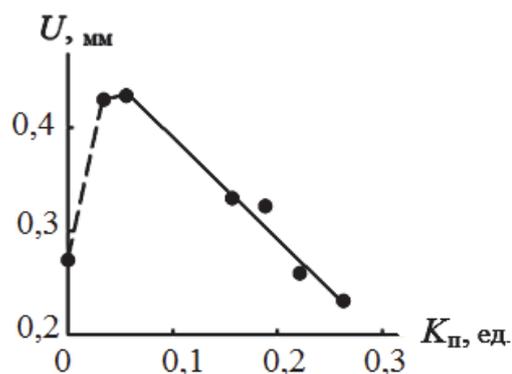


Рис. 5.25. Зависимость параметра износа от коэффициента поглощения светового потока при старении синтетического моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CF в двигателе

Установлено, что до значения коэффициента $K_{\pi} = 0,187$ ед. наблюдается линейная зависимость критерия П, а при $K_{\pi} > 0,187$ ед. наступает изгиб зависимости, вызванный повышением противоизносных свойств за счёт уменьшения параметра износа. Данная зависимость $\Pi = f(K_{\pi})$ может служить эталоном для исследуемого масла и применяться для определения параметра износа при его старении в двигателе внутреннего сгорания. Для этого необходимо отобрать пробу масла, определить коэффициент поглощения светового потока, показатель П, а по формуле $U = K_{\pi}/\Pi$ определить текущее значение противоизносных свойств масла. Например, показатель $\Pi = 0,9$ ед., а $K_{\pi} = 0,2$ ед., параметр износа равен $U = 0,2 / 0,9 = 0,22$ мм.

На рис. 5.27 показана зависимость критерия противоизносных свойств от пробега автомобиля. Показано, что в течение пробега до 7 292 км критерий противоизносных свойств П изменяется по линейной зависимости за счет увеличения концентрации продуктов старения, а дальнейшее увеличение пробега приводит к увеличению критерия П за счет уменьшения параметра износа. Увеличение критерия П после пробега 7 292 км вызвано изменениями механизма изнашивания за счет образования продуктов старения, способствующих формированию на поверхностях трения защитных граничных слоев, уменьшающих параметр износа.

Результаты исследования приведены в табл.5.5.

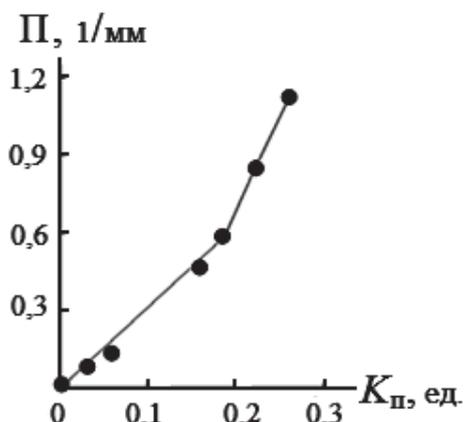


Рис. 5.26. Зависимость критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока

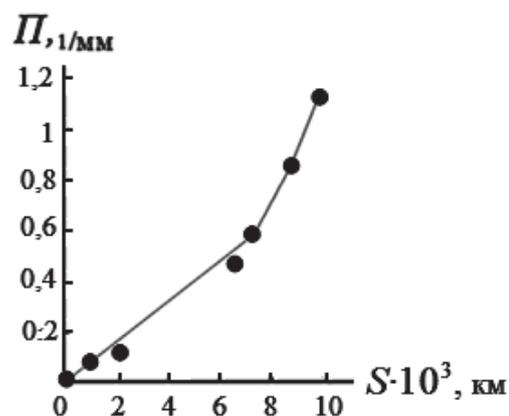


Рис. 5.27. Зависимость критерия противоизносных свойств синтетического моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CF от пробега

Таблица 5.5

Результаты испытания работавшего синтетического моторного масла Ravenol 5W-40 SM/CF

Пробег, км	K_p , ед.	$K_{ц}$, ед.	U , мм	P , 1/мм
исходное	0	1	0,273	0
1046	0,033	0,84	0,427	0,08
2057	0,057	0,94	0,433	0,131
6446	0,157	0,85	0,333	0,471
7296	0,187	0,81	0,323	0,587
8693	0,222	0,75	0,26	0,853
9742	0,26	0,79	0,233	1,12

В ходе исследования синтетического моторного масла Ravenol VSI 5W-40 SM/CF в двигателе от залива до слива установлено, что после пробега 9 742 км коэффициент поглощения светового потока не достиг установленного предельного состояния. При этом вязкость уменьшилась максимально на 20 %, противоизносные свойства в начале испытания понизились от 0,273 мм до 0,433 мм, а в конце – повысились.

6

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ТОВАРНЫХ И РАБОТАЮЩИХ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

6.1. Технология контроля состояния трансмиссионных масел парка машин длительного и кратковременного хранения

Технология контроля состояния трансмиссионных масел по составу продуктов старения. Данная технология предусматривает получение объективной информации по состоянию трансмиссионных масел парка машин и реализуется в два этапа. На первом этапе производится контроль состояния масел на всех машинах, находящихся в воинской части. Затем по показателям качества масел техника разбивается на несколько групп согласно результатам анализа. Второй этап предусматривает проведение планового текущего контроля состояния масел с учетом частоты их эксплуатации или продолжительности хранения.

Для реализации технологии применяются следующие средства измерения: фотометрическое устройство, центрифуга, малообъемный вискозиметр. Пробы масел отбирают в объеме 250 г после небольшого пробега техники с помощью шприца через отверстие налива. Причем пробы масла после измерения вязкости сливают в кювету центрифуги, что обеспечивает уменьшение отбора. Фотометрирование пробы работающего масла производят с использованием кюветы при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм, а продолжительность центрифугирования – 1ч. После центрифугирования в кювету отбирают пробу с верхнего слоя масла и фотометрируют повторно. Причем значение коэффициента поглощения светового потока при фотометрировании пробы после центрифугирования характеризует концентрацию растворимых продуктов старения (в основном продукты окисления и температурной деструкции). Концентрацию нерастворимых продуктов старения $K_{\text{пн}}$ определяют по формуле

$$K_{\text{пн}} = K_{\text{п}} - K_{\text{пр}}, \quad (6.1)$$

где $K_{\text{п}}$ – концентрация общих продуктов старения в масле; $K_{\text{пр}}$ – концентрация растворимых продуктов старения в масле.

Концентрация нерастворимых продуктов характеризует наличие в масле продуктов износа. Полученные экспериментальные данные по вяз-

кости и концентрации общих, растворимых и нерастворимых продуктов старения заносятся в меню компьютера по каждой машине с указанием даты, пробега. Затем строят графические зависимости этих показателей от времени работы механизма и его пробега. Такая схема учета данных по изменению вязкости и концентрации состава продуктов старения позволяет увидеть динамику изменения состояния масел по парку машин и выявить машины, в которых необходима замена масел, а также планировать сроки проведения очередных анализов и подготавливать материальное обеспечение.

Технология контроля концентрации легких фракций и воды в трансмиссионных маслах. Данная технология применяется для контроля товарных и работающих масел. Присутствие воды в смазочных маслах оказывает влияние на их эксплуатационные свойства. В смазочных маслах влага может существовать в разных видах. Некоторое количество влаги может быть растворено в масле, причем растворимость меняется в зависимости от внешних условий. Остальная влага может находиться в масле в состоянии эмульсии, которая частично переходит в растворенную и обратно при изменении давления и температуры [215]. Часть эмульгированной влаги может оставаться и образовывать подтоварную воду. Кроме того, вода может быть в химически связанном состоянии и вступать в реакции гидратации с легирующими присадками масел с образованием кислот, щелочей и других веществ, способных ухудшать их свойства. В тяжелонагруженных узлах вода может испаряться и вызывать разрыв масляной пленки, разделяющей поверхности трения. При добавлении в масла с присадкой до 3 масс % воды их эксплуатационные свойства резко ухудшаются [216]. Наличие воды усиливает коррозионное воздействие масел на металлы, так как в них активнее протекают процессы окисления углеводородов. Кроме того, присутствие воды способствует микробиологическому заражению масел [64]. Поэтому контроль над содержанием влаги имеет важное значение как в товарных, так и работающих трансмиссионных маслах.

Легкие фракции масел образуются при их производстве и эксплуатации в результате механической и температурной деструкции. Такие фракции оказывают влияние на кинематическую вязкость и несущую способность граничного слоя, разделяющего поверхности трения.

Реализация технологии контроля концентрации легких фракций и воды предусматривает использование прибора для термостатирования масел и электронных весов. Пробу масла массой $100 \pm 0,1$ г заливают в стеклянный стакан прибора для термостатирования и термостатируют при температуре 120 °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин в течение 20 мин.

Время испытания установлено экспериментально и обеспечивает испарение 3 г воды. После термостатирования пробу масла взвешивают и определяют массу испарившегося масла. Концентрацию C_B легких фракций определяется по формуле

$$C_B = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100\%, \quad (6.2)$$

где m_1 и m_2 – соответственно массы пробы масла до и после термостатирования, г.

Полученные экспериментальные данные заносят в меню компьютера, по которым строят зависимости суммарной концентрации легких фракций и воды от пробега и времени хранения трансмиссионного масла в технике. По результатам контроля принимаются решения по устранению причин, вызывающих увеличение концентрации легких фракций и воды в маслах.

Технология контроля концентрации продуктов износа в трансмиссионных маслах. Для реализации данной технологии можно использовать два метода контроля. Первый метод предполагает применение фотометрического устройства и магнитного сепаратора (табл. 6.1), а второй – прибора для термостатирования масел и постоянного цилиндрического магнита.

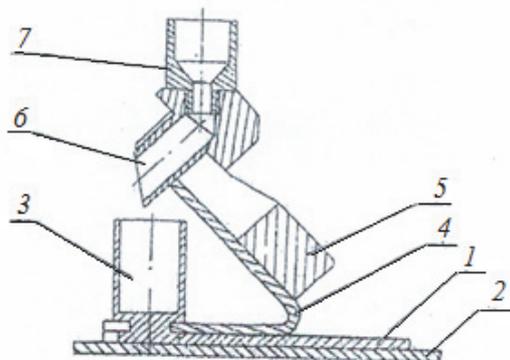


Рис. 6.1. Устройство ферромагнитного сепаратора: 1 – направляющая; 2 – основание; 3 – стакан; 4 – кронштейн; 5 – магнит; 6 – патрубок; 7 – емкость наливная

Конструкция магнитного сепаратора [217] представлена на рис. 6.1 и включает направляющую 1, установленную на основании 2, выполненную с пазом для фиксации стакана 3. На направляющей 1 установлен кронштейн 4, на котором закреплен постоянный магнит 5 и полый патрубок 6 с фланцем и наливной емкостью 7.

Работа сепаратора заключается в пропускании подогретого трансмиссионного масла через патрубок, установленный в магнитном поле, в результате чего ферромагнитные частицы задерживаются. Концентрацию ферромагнитных частиц C_M определяют фотометрированием масла до и после магнитной сепарации по формуле

$$C_m = \frac{K_{\Pi} - K_{\text{пмс}}}{K_{\Pi}} 100 \%, \quad (6.3)$$

где K_{Π} – коэффициент поглощения светового потока масла до магнитной сепарации; $K_{\text{пмс}}$ – коэффициент поглощения светового потока масла после магнитной сепарации.

Таблица 6.1

Техническая характеристика магнитного сепаратора

Параметр	Значение параметра
Объем испытуемого масла, мл	10±2
Температура предварительного нагрева масла, °С	70±5
Продолжительность испытаний, мин.	2±1
Габариты устройства, мм	110×75×65±2
Масса, г	350±10

Второй метод контроля наличия в масле продуктов износа предусматривает помещение кольцевого магнита в стеклянный стакан прибора для термостатирования, который заправляется пробой работавшего масла массой 100 г, ее нагрев до температуры 70–80 °С и перемешивание с частотой вращения мешалки 60 об/мин. Продолжительность испытаний 20 мин. После испытания отсепарированную пробу масла фотометрируют и по формуле (6.3) определяют содержание феррочастиц в масле. По результатам контроля принимается решение о замене масла в трансмиссии.

Технология контроля потенциального ресурса товарных и остаточного ресурса работающих трансмиссионных масел. Потенциальный ресурс как показатель применяется для сравнения различных товарных смазочных масел и выбора из их числа масел с наибольшим временем работоспособности. При этом условия испытания должны быть постоянными и максимально приближенными к режимам эксплуатации проектируемых агрегатов трансмиссий. Остаточный ресурс – показатель, определяющий возможное время работы трансмиссионного масла в агрегате, получаемый при обосновании показателей предельного состояния, что позволяет сравнивать их текущее значение с предельным и прогнозировать остаточный ресурс. Технология контроля потенциального и остаточного ресурса имеет некоторые различия и предусматривает применение следующих средств измерения и испытания: прибор для термостатирования масел; фотометрическое устройство; электронные весы и малообъемный вискозиметр.

Технология реализуется таким образом: пробу товарного масла массой 100±01 г заливают в стеклянный стакан прибора для термостатирования при температуре 150 °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. Продолжительность испытаний составляет

8 ч, после чего пробу окисленного масла взвешивают, определяют массу испарившегося масла и коэффициент испаряемости K_G :

$$K_G = m/M, \quad (6.4)$$

где m – масса испарившегося масла после 8 ч окисления, г; M – масса пробы масла после окисления, г.

Часть пробы окисленного масла отбирают для прямого фотометрирования при толщине фотометрируемого слоя 2 мм. Другую часть пробы (8 г) отбирают для измерения кинематической вязкости, после чего сливают в стеклянный стакан, который повторно взвешивают. По полученным данным определяют коэффициент термоокислительной стабильности масла $E_{\text{тос}}$ после 8 ч испытания по формуле

$$E_{\text{тос}} = K_{\text{п}} + K_G. \quad (6.5)$$

Данный коэффициент учитывает склонность масел к окислению и испарению. Испытание масла продолжается до достижения коэффициентом поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ значений 0,75–0,8 ед. По полученным экспериментальным данным строятся графические зависимости коэффициента термоокислительной стабильности и кинематической вязкости от времени испытания, по которым определяют время достижения коэффициента термоокислительной стабильности значения равного, например, 0,8 ед.

Это время определяет потенциальный ресурс работоспособности исследуемых масел. Кроме того, при определении времени достижения коэффициента термоокислительной стабильности значения 0,8 ед. учитывают значения кинематической вязкости. Если этот показатель после окисления больше 35 % или меньше 20 % кинематической вязкости товарного масла, то ресурс такого масла определяется временем достижения вязкости этих значений. Полученные экспериментальные данные позволяют определить потенциальный ресурс исследуемых масел, обеспечивая возможность их выбора с максимальным ресурсом. На рис. 6.2 и 6.3 представлены экспериментальные данные исследования трансмиссионных масел.

Согласно данным (рис. 6.2, а) максимальный потенциальный ресурс по скорости окисления установлен для масла МС-20 (кривая 2). Предельной кинематической вязкости 35 % достигли масла ТСзп-8 (кривая 1) при 52 ч испытания и МТ-8п – при 108 ч. Максимальная испаряемость установлена для масла ТСзп-8 (рис. 6.3, а кривая 1), а минимальная – для масла МС-20 (рис. 6.3, а – кривая 2). Самый высокий коэффициент термоокислительной стабильности установлен для масла МС-20 (рис. 6.3, б – кривая 2), а самый низкий – для масла ТСзп-8 (рис. 6.3, б – кривая 1). Из представленных данных видим, что применение масла МС-20 более эффективно.

Второй метод контроля потенциального ресурса трансмиссионных масел (альтернативный) заключается в применении коэффициента сопротивления окислению R_o , который находят по формуле

$$R_o = 1 - \frac{K_{\Pi} K_G}{K_{\Pi} + K_G}. \quad (6.6)$$

Данный коэффициент определяется при тех же параметрах и средствах контроля и испытания, что и коэффициент термоокислительной стабильности, только время испытания составляет 40 ч.

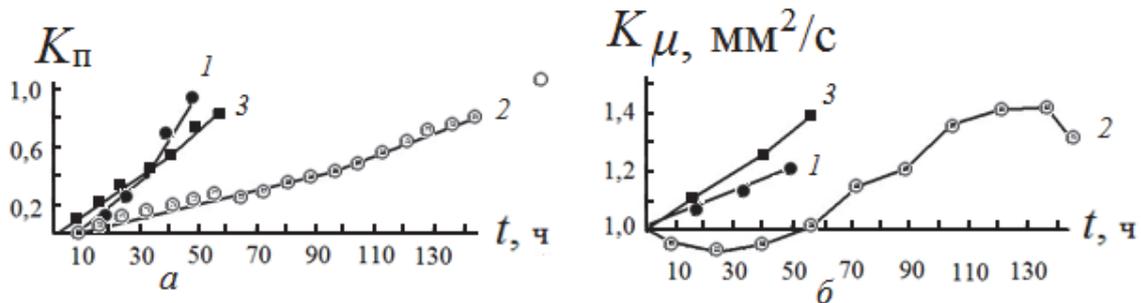


Рис. 6.2. Зависимости коэффициента поглощения светового потока K_{Π} (а) и коэффициента относительной вязкости K_{μ} (б) от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

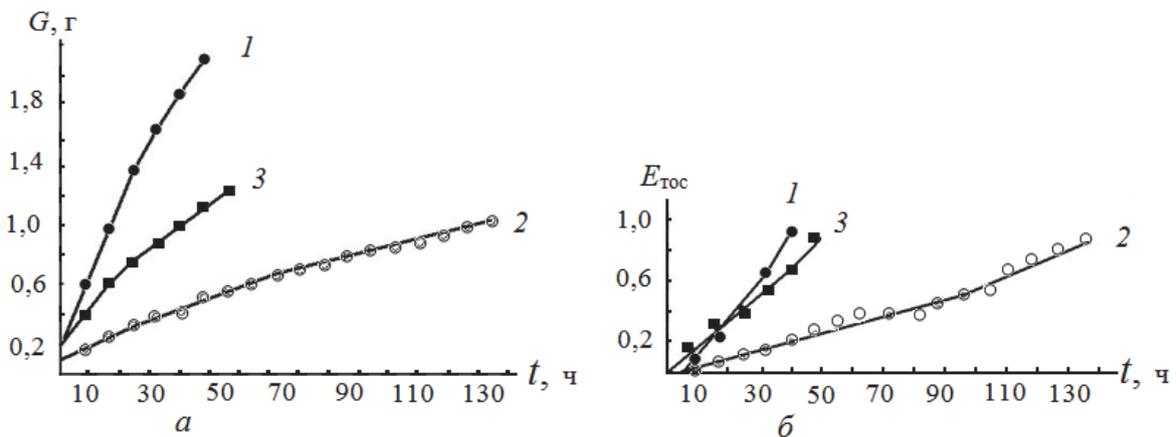


Рис.6.3. Зависимости испаряемости G (а) и коэффициента термоокислительной стабильности $E_{\text{ТОС}}$ (б) от времени окисления трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Результаты испытания минеральных трансмиссионных масел представлены на рис. 6.4, откуда видим, что наименьший коэффициент сопротивления масел окислению 0,96 ед., как альтернативный показатель качества, учитывающий процессы окисления и испарения, установлен для масла МС-20 за 40 ч испытания.

Технология определения остаточного ресурса для работающих масел такая же, как и для товарных масел, но время испытания составляет 8 ч. Остаточный ресурс устанавливается по величине изменения коэффициента поглощения светового потока после термостатирования масла по отношению к коэффициенту $K_{п}$ отобранной пробы и изменению кинематической вязкости масла после термостатирования к вязкости товарного масла и вязкости исходной пробы. Эти показатели сравнивают с предельными значениями, ранее установленными для данного масла. Разность между предельным значением коэффициента поглощения светового потока и его значением для пробы масла, отобранного из агрегата трансмиссии, определяет остаточный ресурс исследуемого масла, а разность между предельным значением коэффициента поглощения светового потока и значением, полученным после термостатирования испытуемого масла, определяет сроки достижения предельного состояния. Так, если эта разность будет отрицательная, т. е. после термостатирования коэффициент поглощения светового потока будет больше предельного значения состояния масла, то в ближайшее время необходимо планировать замену масла. В том случае, когда после термостатирования масла коэффициент поглощения светового потока будет меньше предельного значения, то исследуемое масло допускается к дальнейшей эксплуатации.

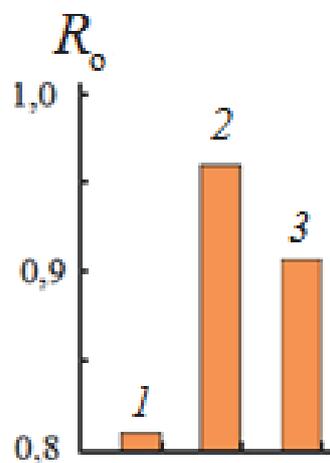


Рис. 6.4. Диаграммы коэффициента сопротивления окислению минеральных трансмиссионных масел после 40 ч испытания: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Такой подход к контролю текущего значения состояния трансмиссионных масел позволяет совершенствовать систему планирования замены масел и повышать эффективность их использования.

Технология контроля сопротивляемости окислению товарных трансмиссионных масел. При выборе трансмиссионных масел для конкретных агрегатов конструкторам и технологам необходимо знать, как изменяется их сопротивляемость старению в процессе эксплуатации. Для получения такой информации применяют следующие средства контроля:

прибор для термостатирования масел, фотометрическое устройство и электронные весы.

Реализация технологии осуществляется следующим образом. Пробу товарного масла заливают в стеклянный стакан массой 100 г и термостатируют при температуре 150 °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин в течение 8 ч. После этого пробу окисленного масла взвешивают, определяя массу испарившегося масла, и вычисляют по формуле (6.4) коэффициент испаряемости. Затем отбирают часть пробы окисленного масла для прямого фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и вычисляют значение коэффициента сопротивляемости окислению по формуле (6.6). Испытания продолжаются до достижения коэффициентом поглощения светового потока значений 0,75–0,8 ед. Далее строят графические зависимости коэффициента сопротивления окислению исследуемого масла от коэффициента поглощения светового потока (рис. 6.5), по которым сравнивают исследуемые масла и производят выбор масел с большим сопротивлением окислению, что обеспечивает максимальный ресурс масла при эксплуатации агрегатов трансмиссии и снижает эксплуатационные затраты.

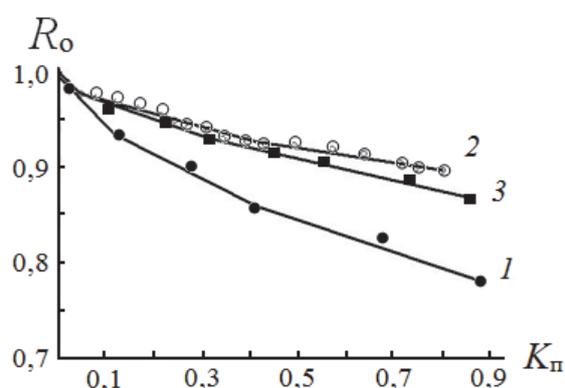


Рис. 6.5. Зависимости коэффициента сопротивляемости окислению от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п

Сравнение масел по коэффициенту сопротивляемости окислению осуществляется при любых значениях коэффициента поглощения светового потока. Например, при коэффициенте поглощения светового потока $K_p = 0,7$ ед. сопротивляемость масла ТСзп-8 равна 0,8 ед., а масла МС-20 – 0,9 ед., т. е. сопротивляемость масла МС-20 в 1,12 раза выше, чем масла ТСзп-8.

Технология контроля температуры начала процессов окисления и испарения трансмиссионных масел. При выборе трансмиссионных масел для агрегатов трансмиссии, работающих при различных режимах и условиях эксплуатации, важно знать температуру начала процессов окисления и испарения. Для реализации технологии контроля за температурой при-

меняют следующие средства: прибор для термостатирования масел, фотометрическое устройство, электронные весы. Термостатирование масел производится по технологии, описанной в параграфе 6.1, с той лишь разницей, что температура термостатирования изменяется каждые 8 ч в диапазоне повышения через 10 °С от 100 до 150 °С и понижения от 150 до 100 °С. Продолжительность термостатирования определяют временем достижения коэффициента поглощения светового потока значений 0,75–0,8 ед. По полученным данным коэффициента поглощения светового потока и испаряемости строят графические зависимости от времени и температуры термостатирования. По данным зависимостям определяют температуру, при которой коэффициент поглощения светового потока и испаряемость стабилизируются, что и будет соответствовать температурам начала окисления и испарения. Если эти показатели стабилизируются при значениях двух или более температур, то выбирают бóльшую из них.

Технология контроля состояния работающих трансмиссионных масел парка машин. Данная технология контроля применяется в условиях предприятий, эксплуатирующих или содержащих технику на длительном хранении. Для реализации данной технологии необходимо:

- 1) определить количество техники, в которой используются агрегаты трансмиссии с одинаковым смазочным материалом;
- 2) предварительно провести исследование по определению предельного состояния для каждого сорта масла;
- 3) зашифровать каждый механизм для введения данных контроля в вычислительную технику;
- 4) разработать программу введения экспериментальных данных контроля по каждому механизму и в целом по парку машин.

Технология контроля предусматривает применение следующих средств измерения и испытания: прибора для термостатирования масел, малообъемного вискозиметра, фотометрического устройства, центрифуги и электронных весов. Процесс контроля парка машин начинается с отбора проб (в объеме 200 мл) из агрегатов трансмиссий после небольшого пробега техники. Показателями состояния работающих трансмиссионных масел приняты коэффициент поглощения светового потока, характеризующий концентрацию в масле общих продуктов старения; кинематическая вязкость, не превышающая значение вязкости товарного масла на +35 % до –20 %. После центрифугирования отработанных масел в течение 1 ч путем фотометрирования верхнего слоя отцентрифугированной пробы определяется коэффициент поглощения светового потока $K_{пр}$, характеризующий концентрацию в работающем масле растворимых продуктов старения. Разность между концентрациями общих и растворимых продуктов старения определяет концентрацию нерастворимых продуктов старения,

которая оказывает основное влияние на снижение качества масла и его ресурс.

Термостатирование отработанных масел при температуре 120 °С с перемешиванием в течение 20 мин. позволяет определить концентрацию легких фракций и воды в масле и характеризует герметичность (износ уплотнений) агрегатов трансмиссий, а термостатирование пробы при температуре 150 °С в течение 8 ч – вычислить коэффициент сопротивляемости работающих масел старению, по которому находят остаточный ресурс и время очередного анализа.

Применение магнитного сепаратора предоставляет возможность контролировать концентрацию ферромагнитных частиц в работающем масле и оценить интенсивность изнашивания элементов трансмиссии.

По полученным экспериментальным данным строят графические зависимости каждого из представленных показателей от времени эксплуатации с целью анализа их изменения в процессе эксплуатации техники и кривую распределения их от количества машин, что позволяет определить состояние масел в технике по парку машин, определить количество машин, в которых необходима замена масел, устранить причины разгерметизации трансмиссии, оценить темп износа элементов трансмиссии, планировать объём поставки трансмиссионных масел для осуществления замены. В целом организация текущего контроля состояния трансмиссионных масел с применением описанных в работе средств контроля позволяет повысить эффективность их использования и надежность агрегатов трансмиссий, получить полную информацию о состоянии масел парка машин и принимать правильные и своевременные решения по устранению неисправностей.

6.2. Технология контроля сопротивляемости старению работающих трансмиссионных масел

Эта технология используется для обоснования предельного состояния трансмиссионных масел, применяемых на данном предприятии, что позволяет измерить остаточный ресурс и установить сроки замены масел. Обоснование предельного состояния производится по кинематической вязкости, измеренной при 100 °С, концентрации феррочастиц, концентрации воды и легких фракций в масле, сопротивляемости старению, противозносным свойствам, концентрации общих продуктов старения, а также электропроводности фрикционного контакта в условиях упругих деформаций.

Пробу работавшего масла массой 100 г заливают в стеклянный стакан прибора для термостатирования и термостатируют при температуре 150 °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин в течение 8 ч. После термостатирования пробу взвешивают, определяют массу испарившегося масла и вычисляют коэффициент испаряемости по формуле (6.4). Отбирают часть пробы для прямого фотометрирования при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм и вычисляют коэффициент сопротивляемости старения по формуле (6.6). Значение данного коэффициента сравнивают с предельным значением этого показателя и определяют остаточный ресурс по формуле

$$P_{\text{ост}} = \frac{R_{\text{сп}} - R_{\text{изм}}}{R_{\text{сп}}} 100 \%, \quad (6.7)$$

где $P_{\text{ост}}$ – остаточный ресурс, %; $R_{\text{сп}}$ – предельное значение коэффициента сопротивления старению, ед.; $R_{\text{изм}}$ – вычисленное значение коэффициента сопротивления старению после испытания масла, ед.

Зная отработанный маслом ресурс, можно определить допустимое время работы испытываемого масла. Например, остаточный ресурс составляет 10 % , т. е. масло отработало 90 % ресурса (или 1 000 ч), тогда остаточный ресурс будет определяться пропорцией и составит 111 ч работы.

Данная технология позволяет совершенствовать систему планирования, текущего контроля и своевременно осуществлять замену отработанных масел.

6.3. Технология контроля противоизносных свойств товарных и работающих трансмиссионных масел

В наше время проблема повышения износостойкости деталей машин не теряет своей актуальности. Несмотря на постоянное совершенствование конструкции машин и агрегатов, технологий их производства, вопросы износостойкости деталей машин во многом еще не решены и находятся в центре внимания конструкторов, технологов и эксплуатационников. Сложность решения этой проблемы заключается в том, что износостойкость материалов пар трения не постоянная величина для данного материала, а определяется его исходной структурой, составом текстурированного слоя, образующегося на поверхностях трения при изнашивании, а также свойствами граничных слоев. Поэтому при выборе материалов пар трения необходимо учитывать их совместимость и приспособляемость

друг к другу в зависимости от изменения свойств смазочного материала [218].

Смазочный материал в любой трибосистеме используется для снижения коэффициента трения, отвода тепла с поверхности трения и уноса частиц износа из зоны трения. В процессе работы механизмов масла подвергаются интенсивному перемешиванию, что способствует их контакту с кислородом воздуха, транспортированию его к поверхностям трения и окислению. Более интенсивно окислительные процессы протекают на поверхности трения и в тонких смазочных слоях вследствие повышенных температур.

Современные смазочные масла включают базовую основу, легированную комплектом присадок, улучшающих антиокислительные, моющие, диспергирующие, противоизносные, депрессорные и противозадирные свойства. Наличие такого количества свойств, выполняющих определенные функции и изменяющихся в процессе эксплуатации техники, а также отсутствие на предприятиях, эксплуатирующих технику и оборудование, средств контроля, усложняют решение задач по оценке качества смазочных масел и их ресурса.

Смазочные свойства масел зависят от температурных условий, особенно их способность химически модифицировать поверхности трения. В этот период наблюдается стабилизация коэффициента трения и наступает равновесие скоростей образования и разрушения модифицированных (защитных) граничных слоев на поверхностях трения [219].

Виды изнашивания оказывают влияние на процесс загрязнения трансмиссионных масел. Так, наряду с частицами износа в масле накапливаются различные соединения металлов в результате коррозионно-механического изнашивания, причем интенсивность загрязнения зависит от уровня поляризации зоны трения, что усиливает электрохимическую коррозию металлов [220].

Предлагаемая технология контроля предназначена для оценки противоизносных свойств как товарных, так и работающих масел и является общей. Оценка противоизносных свойств предусматривает определение следующих триботехнических характеристик масел: среднеарифметического значения диаметра пятна износа на трех шарах; среднеарифметической площади пятна износа; критерия противоизносных свойств; продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформаций; электропроводности фрикционного контакта и влияния продуктов окисления или старения на значения перечисленных показателей, а также применяется при обосновании предельного состояния работающих трансмиссионных масел.

Технология предусматривает использование трехшариковой машины трения, оптического микроскопа «Альтами МЕТ1М» и устройства для пе-

реточки цилиндра. Для определения электропроводности фрикционного контакта и его зависимости от концентрации продуктов окисления или старения через одну пару трения (шар – цилиндр) пропускался постоянный ток от внешнего источника стабилизированного напряжения 3В. Влияние продуктов окисления или старения на противоизносные свойства масел оценивалось по отношению к товарному маслу.

Определение триботехнических характеристик товарных трансмиссионных масел заключается в следующем: пробу масла объемом 15 мл заливают в ёмкость для исследуемого масла, которая крепится к станине корпуса машины трения, при этом цилиндр погружается в масло. На шарнире поднимается и фиксируется термостат, в который погружается емкость с испытуемым маслом. Температура испытания устанавливается с помощью терморегулятора ТРМ-101. Три шара опускаются на поверхность цилиндра и задается величина тока (100 мкА), протекающего через фрикционный контакт, затем их поднимают и с помощью рычагов фиксируют в верхнем положении. Включается нагрев масла и вращение цилиндра. После набора установленной температуры в 80 °С на компьютере запускается программа записи величины тока, протекающего через фрикционный контакт, на цилиндр опускаются последовательно шары и прикладывается нагрузка величиной – 13 Н. Продолжительность испытаний составляет 2 ч, после чего шары с нагрузкой фиксируют в верхнем положении; прекращают нагрев масла в термостате и останавливают запись диаграммы изменения тока, протекающего через контакт. Шары последовательно откручивают совместно с оправкой, промывают в бензине, затем в спирте, с помощью оптического микроскопа замеряют наибольший и наименьший диаметр пятна износа, вычисляют средние значения диаметров пятен износа на каждом шаре, а затем среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах.

Триботехнические характеристики товарных трансмиссионных масел по параметру среднеарифметического значения диаметра пятна износа составили: для минеральных масел ТСзп-8 – 0,565 мм; МС-20 – 0,285 мм; МТ-8п – 0,298 мм; Bizol 85W-90GL4 – 0,26 мм; ТНК транс 85W-90GL5 – 0,527 мм; частично синтетических Bizol Hypoid 75W-GL4, GL5 – 0,308 мм; Agip Rotva Fe 75W-80 GL5 – 0,507 мм; синтетического Bizol Hypoid 75W-90 GL5 – 0,375 мм.

По полученным данным осуществляется предварительный выбор трансмиссионных масел с учетом их сопротивляемости окислению.

Триботехнические характеристики окисленных трансмиссионных масел исследовали после их термостатирования при температуре 150 °С с перемешиванием. После каждых 8 ч испытания проба окисленного масла фотометрировалась для определения коэффициента поглощения светового

потока, затем отбиралась проба окисленного масла объемом 15 мл для испытания на трехшариковой машине трения при достижении коэффициента поглощения светового потока значений 0,1; 0,2...0,8 ед. После отбора пробы окисленного масла в прибор для термостатирования доливали масло товарное до первоначальной массы $100 \pm 0,1$ г. Триботехнические характеристики окисленных масел оценивали по среднеарифметическим значениям диаметра пятна износа на трех шарах, критерию противоизносных свойств, времени формирования номинальной площади фрикционного контакта и его электропроводности в области упругих деформаций.

Результаты изменения параметра износа минеральных трансмиссионных масел и критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока приведены на рис. 6.6, а, б.

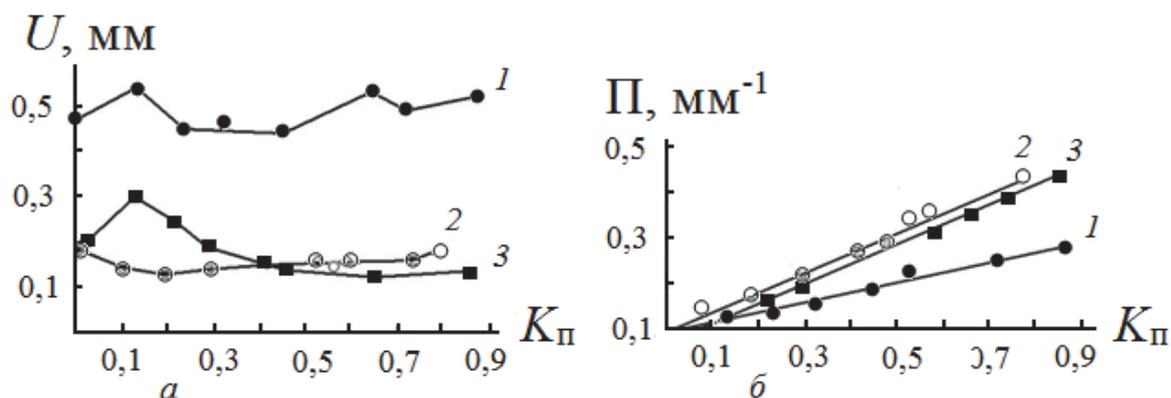


Рис.6.6. Зависимости диаметра пятна износа $U(a)$ и критерия противоизносных свойств Π (б) от коэффициента поглощения светового потока при триботехнических испытаниях минеральных трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 –МС-20; 3 – МТ-8п

Анализ результатов контроля минеральных трансмиссионных масел по сопротивляемости окислению (рис. 6.6) и критерию противоизносных свойств (рис. 6.6, б) показал, что масло МС-20 характеризуется наибольшим сопротивлением окислению и лучшими противоизносными свойствами, масло ТСзп-8 имело худшие результаты по термоокислительной стабильности и противоизносным свойствам (рис. 6.6, б кривая 1). Поэтому, чтобы улучшить термоокислительную стабильность масла ТСзп-8, его предельную температуру работоспособности необходимо снизить от 150 до 130 °С, тогда его триботехнические характеристики, термоокислительная стабильность и потенциальный ресурс будут превосходить все исследованные масла, а надежность агрегатов трансмиссии, в которых используется данное масло, будет максимальной.

Анализ результатов исследования масла МТ-8п показал: предельную температуру его работоспособности следует занижать до 140 °С, что обес-

печит увеличение потенциального ресурса, а его противоизносным свойствам – достаточную надежность агрегатов трансмиссий.

Предельная температура работоспособности масла МС-20 составляет 150 °С, при ней обеспечиваются максимальный потенциальный ресурс, противоизносные свойства и надёжность трансмиссий.

Важными триботехническими характеристиками трансмиссионных масел являются не только параметры износа и величина критерия противоизносных свойств, но и время формирования номинальной площади фрикционного контакта $t_{фпк}$, и его электропроводность, характеризующая кислотность масла, и его способность формировать на поверхностях трения защитные граничные слои, представляющие собой комплексные соединения металлов с органическими кислотами, повышающими нагрузку схватывания.

Согласно данным на рис.6.7, при малых значениях коэффициента поглощения светового потока ($K_{п} < 0,2$ ед.) коэффициент электропроводности фрикционного контакта приобретает значения меньше 0,2 ед. (рис. 6.7, а), а время его формирования (рис. 6.7, б) увеличено, что характеризует образование адсорбционных граничных слоёв, разделяющих поверхности трения. При увеличении коэффициента поглощения светового потока возрастает кислотность масла, поэтому электропроводность граничного слоя увеличивается, а время формирования фрикционного контакта уменьшается за счет образования на поверхностях трения хемосорбционных граничных слоёв, представляющих собой химические соединения металлической поверхности с органическими кислотами.

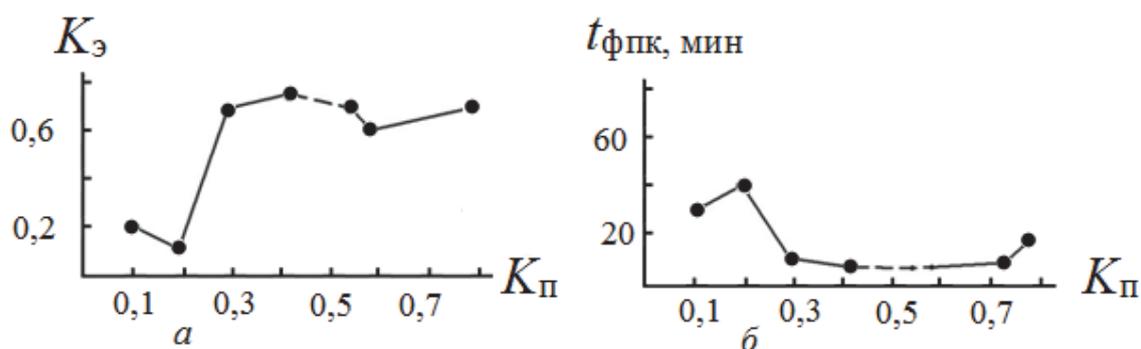


Рис. 6.7. Зависимости коэффициента электропроводности фрикционного контакта $K_э$ (а) и времени его формирования $t_{фпк}$ (б) от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионного масла МС-20

Полученные данные позволяют обосновать причину высоких противоизносных свойств исследуемых масел, сравнивать их по этим показателям и оценить влияние продуктов окисления на триботехнические характеристики.

6.4. Рекомендации по выбору трансмиссионных масел для трансмиссий

Для обоснованного выбора трансмиссионных масел рекомендуется использовать следующие средства испытания и измерения: прибор для термостатирования масел; фотометрическое устройство; электронные весы; малообъемный вискозиметр; трехшариковую машину трения со схемой «шар – цилиндр»; оптический микроскоп и установку для переточки цилиндров. При испытании масел параметры принимаются постоянными, что обеспечит их объективное сравнение и выбор. Масса пробы для испытания на всех устройствах должна быть постоянной в соответствии с техническими характеристиками средств испытания и контроля. В качестве показателей для сравнения физико-химических и триботехнических характеристик испытуемых масел принимают: коэффициент поглощения светового потока; коэффициент относительной вязкости; испаряемость; коэффициент термоокислительной стабильности; коэффициент сопротивления окислению, определяемый после 40 ч термостатирования; потенциальный ресурс; критерий противоизносных свойств после 40 ч термостатирования масел с перемешиванием; время формирования номинальной площади фрикционного контакта и его электропроводность.

По полученным экспериментальным данным строят графические зависимости коэффициента поглощения светового потока, относительной вязкости и испаряемости от времени термостатирования. По зависимости коэффициента относительной вязкости от времени термостатирования определяют время превышения предельного значения её увеличения (35–40 %) и уменьшения (20 %), которое учитывают при вычислении коэффициента термоокислительной стабильности. Строят графические зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени термостатирования, по которым определяют масла с наименьшей скоростью изменения этого показателя. Коэффициент термоокислительной стабильности учитывает склонность масел к окислению и испарению, поэтому является более объективным, чем коэффициент поглощения светового потока. По данным графическим зависимостям определяют потенциальный ресурс исследуемых масел, т. е. время достижения значения коэффициента термоокислительной стабильности, например 0,8 ед.

Для снижения трудоемкости определения термоокислительной стабильности исследуемых масел можно использовать коэффициент сопротивления окислению, учитывающий как изменение оптических свойств, так и испаряемости масел за 40 ч испытания.

Триботехнические характеристики трансмиссионных масел предложено контролировать по критерию противоизносных свойств, определяе-

тому отношением коэффициента поглощения светового потока к среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах или площади пятна износа на трех шарах, характеризующему концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта. Причем чем выше значение критерия, тем выше противоизносные свойства исследуемого масла. Изменение критерия противоизносных свойств можно оценивать по его зависимости от коэффициента поглощения светового потока или определять после 40 ч термостатирования масла с последующими испытаниями на машине трения.

Такие триботехнические характеристики трансмиссионных масел, как время формирования номинальной площади фрикционного контакта и его электропроводность, определяют для оценки влияния продуктов окисления на эти показатели и склонности масел к образованию на поверхностях трения комплексных соединений металла с органическими кислотами, их прочности соединения с основой металла. Эти комплексные соединения увеличивают нагрузки схватывания.

В том случае, если масла термостатировались при температуре 150 °С, то для выбора следует использовать лучшие показатели термоокислительной стабильности и противоизносных свойств, а если масла показали худшие результаты, их необходимо разделить на две группы в соответствии со значениями этих показателей и установить предельные температуры их работоспособности при 140, 130 и 120 °С, что повысит термоокислительную стабильность, потенциальный ресурс и противоизносные свойства.

6.5. Рекомендации по классификации трансмиссионных масел

Многообразие вырабатываемых промышленностью трансмиссионных масел, предназначенных для разнообразной техники, требует их классификации для обоснованного принятия решения вопроса о выборе сорта масла для данной конструкции трансмиссии. В ГОСТ 17479.2–85 отражена отечественная классификация. В ней предусматривается (в зависимости от уровня кинематической вязкости при 100 °С), разделение трансмиссионных масел на четыре класса, а в зависимости от эксплуатационных свойств и возможных областей применения – разделение ещё на пять групп: ТМ-1–ТМ-5, учитывающих уровень напряженности работы трансмиссии и температуру масла в объеме. Так, к группе ТМ-1 относятся передачи, работающие при контактных напряжениях от 900 до 1 600 МПа и температуре масла в объеме до 90 °С:

ТМ-2 – контактное напряжение до 2 100 МПа, температура до 130 °С;

ТМ-3 – контактное напряжение до 2 500 МПа, температура до 150 °С;
 ТМ-4 – контактное напряжение до 3 000 МПа, температура до 150 °С;
 ТМ-5 – контактное напряжение выше 3 000 МПа, температура до 150 °С.

Классификация трансмиссионных масел по ГОСТ 17479.2–85 соответствует классификации по API GL1- GL5.

Применение фотометрического метода контроля термоокислительной стабильности и установления эмпирической связи концентрации продуктов окисления с противоизносными свойствами трансмиссионных масел позволяет выдвинуть альтернативный метод их классификации, учитывающий температурные условия, определяемые коэффициентом сопротивления окислению R_o , и триботехнические характеристики окисленных масел по критерию противоизносных свойств.

На рис. 6.8, *а*, *б* представлены зависимости коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока при испытании трансмиссионных масел при температуре 150 °С. Классификация масел основана на определении значения коэффициента сопротивления окислению при значении коэффициента поглощения светового потока, равного, например, 0,7 ед.

При значениях коэффициента сопротивления окислению больше 0,9 ед. эти масла могут работать при температуре 150 °С и соответствуют группе эксплуатационных свойств ТМ-5 (GL5). К этой группе относятся масла МС-20; Bizol 80W-90GL4; BizolHypoid 75W-90 GL4, GL5 BizolHypoid 75W-90 GL5.

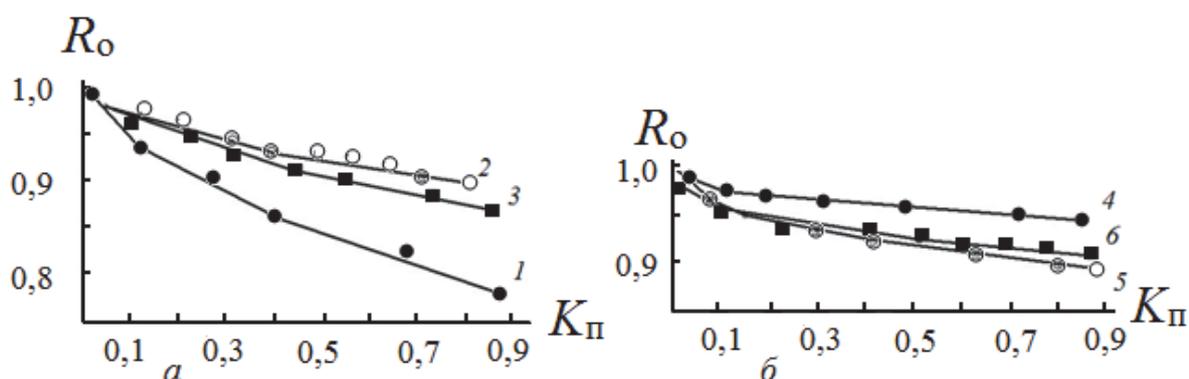


Рис.6.8. Зависимости коэффициента сопротивления окислению от коэффициента поглощения светового потока при испытании трансмиссионных масел при температуре 150 °С: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п; 4 – Bizol 80W-90 GL4; 5 – Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 6 – Bizol Hypoid 75W-90 GL5

Масла, в которых коэффициент сопротивления окислению изменяется от 0,9 до 0,85 ед. (МТ-8п), должны относиться к группе ТМ-4 (GL4), где предельная температура их работоспособности не превышает 140 °С,

что обеспечивает увеличение потенциального ресурса и замедление скорости окисления. Масла, в которых коэффициент сопротивления окислению изменяется в пределах от 0,85 до 0,8 ед. (ТСзп-8), должны относиться к группе эксплуатационных свойств ТМ-3. Классификацию масел по уровню напряженности работы трансмиссий и группам эксплуатационных свойств предложено производить, используя значения критерия противозносных свойств Π , определяемые при коэффициенте поглощения светового потока равном 0,7 ед. (рис. 6.9, а, б).

Так, если данный критерий равен или больше 3 мм^{-1} , то данные масла относятся к группе ТМ-5 (GL5). К этой группе относятся масла МС-20 и Bizol 80W-90 (GL4) (рис. 6.9, кривые 2, 4). При значении критерия противозносных свойств, изменяющихся в пределах от 2 до 3 мм^{-1} , масла относятся к группе ТМ-4. К этой группе относятся масла МТ-8п и частично синтетическое BizolHypoid 75W-90 GL4, GL5 (рис. 6.9, кривые 3, 5). При значениях критерия противозносных свойств, изменяющихся в пределах от 1 до 2 мм^{-1} , масла относятся к группе ТМ-3. К этой группе относятся масла ТСзп-8 и синтетическое Bizol Hypoid 75W-90 GL5 (рис. 6.9, кривые 1, б).

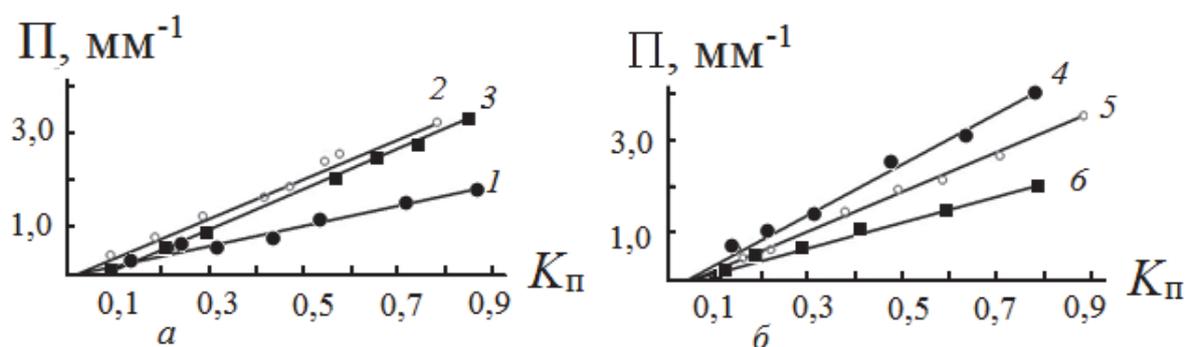


Рис. 6.9. Зависимости критерия противозносных свойств от коэффициента поглощения светового потока при окислении трансмиссионных масел: 1 – ТСзп-8; 2 – МС-20; 3 – МТ-8п; 4 – Bizol 80W-90 GL4; 5 – Bizol Hypoid 75W-90 GL4, GL5; 6 – Bizol Hypoid 75W-90 GL5

Классификация трансмиссионных масел по группам эксплуатационных свойств является основной, так как определяет надежность трансмиссий, однако если коэффициент сопротивляемости окислению очень низок, а критерий противозносных свойств высок, то данное масло классифицируется на одну группу ниже по отношению к критерию противозносных свойств, что позволит повысить его сопротивляемость окислению, но понизит предельную температуру работоспособности.

Для определения температурной области работоспособности трансмиссионных масел необходимо определить температуры начала процессов окисления и испарения. Для этого испытания следует проводить при циклическом изменении температуры в диапазоне от 110 до 150 °С, повышая

на 10 °С, а затем понижая; далее определяют приращения скоростей окисления и испарения. Температуры начала окисления и испарения определяются при нулевых значениях скоростей. Предельной температурой работоспособности исследуемого масла назначается температура на 20 °С выше температуры начала процессов окисления и испарения.

6.6. Рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел

Данные рекомендации предусматривают применение следующих средств контроля: фотометрическое устройство; центрифуга; малообъемный вискозиметр; электронные весы и магнитный сепаратор. Они предназначены для проведения текущего контроля состояния работающих трансмиссионных масел и планирования очередного контроля. Эффективность применения разработанных рекомендаций зависит от оснащенности предприятий средствами контроля, наличия научно обоснованного предельного состояния масел, применяемых на данном предприятии, и установленных экспериментальных зависимостей критерия противоизносных свойств от коэффициента поглощения светового потока, характеризующих концентрацию продуктов старения в масле, что обеспечит прогнозирование сроков замены, определения противоизносных свойств и остаточного ресурса.

При внедрении рекомендаций необходима организация контроля наработки часов каждым механизмом для вычисления остаточного ресурса и службы диагностики с обучением специалистов работе на средствах контроля. Текущий контроль предусматривает экспрессивный анализ, по результатам которого планируются сроки проведения очередного анализа, а для масел, работающих на грани предельных показателей, проведение полного анализа с оценкой их противоизносных свойств, что в целом позволяет создать базу данных по изменению противоизносных свойств масел в летний и зимний периоды эксплуатации техники. В качестве показателей качества масел при экспресс-анализе приняты такие: коэффициент поглощения светового потока, характеризующий концентрацию общих продуктов старения в масле; концентрация растворимых и нерастворимых продуктов старения; концентрация ферромагнитных частиц; кинематическая вязкость, измеряемая при 100 °С.

Отбор проб массой 30 г необходимо осуществлять с помощью шприца через заливное отверстие трансмиссии после пробега техники для обеспечения тщательного перемешивания масла в трансмиссии.

Оценка состояния работающих масел по коэффициенту поглощения светового потока позволяет определить противоположные свойства по значениям эталонной зависимости критерия противоположных свойств от коэффициента поглощения светового потока по формуле

$$U = K_{\text{п}} / \Pi, \quad (6.8)$$

где U – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа, мм; $K_{\text{п}}$ – коэффициент поглощения светового потока; Π – критерий противоположных свойств, мм^{-1} , а также остаточный ресурс t_0 исследуемого масла, вычислив скорость старения масла V_c за данный период эксплуатации t_3 :

$$V_c = K_{\text{п}} / t_3, \quad (6.9)$$

$$t_0 = \frac{(K_{\text{пп}} - K_{\text{п}})}{V_c}, \quad (6.10)$$

где $K_{\text{пп}}$ – предельное значение коэффициента поглощения светового потока, установленное на основе статистических данных старения масел данного сорта.

По результатам остаточного ресурса планируют сроки проведения очередного анализа, а по кинематической вязкости оценивают состояние работающих масел по сравнению с предельными ее значениями: увеличение не более чем на 35–40 % или уменьшение на 20 %. При превышении этих значений работавшее масло необходимо заменить.

Основной причиной, снижающей надежность трансмиссий, является наличие в масле нерастворимых продуктов, концентрация которых определяется в процессе фотометрирования масел после их центрифугирования. Если после центрифугирования обнаружена концентрация нерастворимых продуктов старения, то данное масло необходимо пропустить через магнитный сепаратор для определения концентрации ферромагнитных частиц: если они обнаружены, то масло вызывает повышенный износ узлов трансмиссии, значит, его необходимо слить и путем фильтрации устранить примеси. В том случае, если ферромагнитные частицы отсутствуют, причиной наличия концентрации нерастворимых продуктов могут быть атмосферные загрязнения, попадающие через уплотнения, или температурные условия эксплуатации, которые превысили допустимые значения, вызвавшие образование нерастворимых продуктов старения в виде органических смол. В любом случае текущий контроль должен проводиться не более четырёх раз за весь период эксплуатации трансмиссионного масла.

Таким образом, полученные данные текущего контроля состояния работающих трансмиссионных масел позволяют получить объективную информацию для принятия правильных решений по устранению причин, вызывающих ускоренное изменение физико-химических показателей каче-

ства масел, повысить эффективность их использования, совершенствовать систему планирования технического обслуживания и повысить надежность трансмиссий.

6.7. Технология определения предельного состояния отработанных моторных масел

Старение масел при работе двигателей – сложный процесс. В картере работающего двигателя формируется сложная смесь исходного масла с самыми разнообразными продуктами его старения, от которых полностью очистить масло (фильтрацией) не удаётся, вследствие чего количество углеродистых частиц в масле повышается [221]. Состав продуктов загрязнения (старения) моторных масел представлен на рис. 6.10.



Рис. 6.10. Схема процесса загрязнения (старения) моторного масла

При разработке технологии определения предельного состояния работающих моторных масел принимались во внимание её простота в применении, достоверность и доступность для предприятий в сфере обслуживания транспортных средств, простота средств контроля [222].



Рис. 6.11. Схема определения и обоснования предельного состояния работающих моторных масел

Схема разработанной технологии определения предельного состояния работавших масел представлена на рис. 6.11, технология предусматривает применение комплекта приборов, предназначенных для контроля качества отработанных масел любой базовой основы и парка машин различного состава и количества. Для этого парк машин разбивают на однотипные машины, в которых применяют масла одной марки. Контроль отработанных масел осуществляется при отработке ими инструктивных сроков, рекомендованных заводами-изготовителями двигателей. При этом накапливаются статистические данные по оптическим свойствам масел, их вязкости и концентрации общих, растворимых и нерастворимых примесей. На основании полученных данных строят графические зависимости распределения этих показателей от количества исследуемых машин и определяют математическое ожидание значений этих показателей, при которых производилась замена масла у большинства машин.

Для определения остаточного ресурса отработанных масел используют средства контроля, позволяющие установить сопротивляемость отработанных масел окислению, наличие топливных фракций, противоизносные свойства и изменение вязкости.

Испытания проводят в течение 20 ч, причём через каждые 3, 8, 14 и 20 ч отбирают пробы термостатированных масел для определения изменений оптических свойств, вязкости, испаряемости и противоизносных свойств. На основании полученных данных строят графические зависимости коэффициента поглощения светового потока от количества исследованных проб масел до и после термостатирования. По точке их пересечения определяют предельное значение коэффициента поглощения светового потока, при достижении которого необходимо произвести замену испытанного масла.

6.8. Технология определения текущего контроля состояния работающих моторных масел

Работоспособность моторных масел не имеет чёткой зависимости от времени наработки (пробега), так как определяется индивидуальными факторами. Для каждого механизма вследствие его индивидуальных особенностей и различий в режимах и условиях эксплуатации предельные показатели достигаются через разные промежутки времени. Своевременная замена масел в двигателях внутреннего сгорания увеличивает срок службы трибосопряжений. Основным путём повышения эффек-

тивности использования масел является контроль текущего состояния масла в течение эксплуатации.

Так как до сих пор нет системы стандартизированных показателей для оценки качества работавших масел, то происходит либо преждевременная их замена, влекущая за собой перерасход масел из-за невыработанного ресурса, либо двигатель работает на загрязнённом масле, вызывая износ деталей, приводящий к увеличению зазора между гильзами и поршнями двигателя, что в свою очередь повышает угар масла [166].

С этой целью нами была разработана технология определения текущего состояния масла на основе результатов исследований, представленных в главе 3. Эта технология предусматривает наличие комплекта приборов, позволяющих определить коэффициент поглощения светового потока и коэффициент вязкости. По данным показателям можно судить о необходимости замены масел, а также корректировать сроки и полностью исключить возможность слива доброкачественных работающих масел или работу на непригодных.

Оснащение предприятий комплектом приборов требует изменения организационной структуры технических служб, в том числе создания специальных служб диагностики смазочных материалов. Основными их задачами будут планирование отбора проб масел из механизмов парка машин, составление и заполнение графика отбора проб, анализ масел, обработка результатов анализа, планирование техобслуживания с указанием потребности в замене масел [167].

Результаты текущего контроля позволят оценить состояние работающих масел и сделать заключение о процессе их старения в двигателях. Он осуществляется путём отбора проб масла из масляной системы двигателя в объёме 10 мл. Взятые пробы масла фотометрируют, определяют вязкость, на основании полученных данных проводят анализ текущего состояния и прогнозируют момент замены масла, сравнив полученные показатели с предельными. При приближении к предельному показателю необходимо провести дополнительные исследования, включающие центрифугирование проб с целью определения концентраций нерастворимых и растворимых продуктов старения. Далее нужно сравнить результаты с предельными значениями, определить состояние фильтрующих элементов системы смазки двигателя и наличие моющих присадок, принять решение о сроках замены масла.

При текущем контроле состояния моторного масла важно установить начальную чистоту двигателя при замене масла на новое. Для этого после залива товарного масла из двигателя, проработавшего 10–15 мин, нужно отобрать пробу, которую фотометрируют; далее определяют коэффициент поглощения светового потока и по его значению судят о качестве проведенного технического обслуживания. Чем больше значение

коэффициента поглощения светового потока, тем больше загрязнена масляная система двигателя, поэтому при очередном техническом обслуживании необходимо запланировать промывку системы.

Описанный подход к контролю масел позволяет корректировать сроки службы в зависимости от индивидуальных особенностей эксплуатируемой техники, исключить слив доброкачественных масел. Кроме того, текущий контроль состояния смазывающего материала позволяет рационально использовать его ресурс и своевременно проводить работы по замене применяемых масел.

6.9. Технология диагностирования состояния фильтрующих элементов системы смазки двигателя

Одной из существенных предпосылок нормальной работы двигателя внутреннего сгорания является непрерывная смазка движущихся частей, причём моторное масло для избежания преждевременного износа деталей должно оставаться на требуемом уровне чистоты. В этом процессе важную роль играет фильтрующий элемент, который обеспечивает непрерывную очистку моторного масла, удерживая твёрдые частицы, образующиеся при нормальном износе двигателя, а также продукты окисления и частицы сажи. Преждевременное снижение производительности фильтрующих элементов системы смазки двигателя приводит к более интенсивному загрязнению масел. Эффективность использования фильтра характеризуется затратами на очистку определённого количества масла при необходимой степени надёжности фильтра. Однако в настоящее время отсутствует научно обоснованная система критериев, позволяющая оценивать надёжность фильтров.

Основные понятия и определения теории надёжности, сформулированные применительно к фильтрам, имеют специфические особенности и связаны с необходимостью промывки или замены фильтрующих элементов после накопления определённого количества загрязнений [228; 229].

Для оценки степени загрязнения фильтрующих элементов системы смазки двигателя в рекомендациях было предложено применение прибора для определения оптических свойств смазочных масел и центрифугирование. Показателем степени старения масла принят коэффициент поглощения светового потока K_n , который характеризует концентрацию общих продуктов старения, образовавшихся за время эксплуатации механизма. Центрифуга с частотой вращения ротора не менее 8 000 об/мин позволяет определить концентрацию нерастворимых примесей, которые выпадают

в осадок при центрифугировании масла. Время центрифугирования – не менее 60 мин. По концентрации нерастворимых продуктов старения делается заключение о производительности системы фильтрации и принимается решение о замене фильтров.

Концентрацию нерастворимых примесей $K_{\text{пн}}$ определяют путём фотометрирования работающих масел после их центрифугирования. Контроль фильтрующих элементов системы смазки рекомендуется проводить перед обработкой двигателем конструктивного срока.

Применение центрифугирования работающих масел позволяет контролировать наличие в них моющих присадок по плотности осадков в кювете центрифуги. Гелеобразный или мягкий осадок свидетельствует о наличии моющих присадок. При срабатывании этих присадок цвет осадка меняется на тёмный; осадок плотный и тяжело смывается бензином. Наличие твёрдого осадка в кювете центрифуги свидетельствует о необходимости смены масла, так как отсутствие моющих присадок способствует коагуляции продуктов старения и загрязнению фильтрующих элементов. Разработанная технология позволяет оценить отработанный моторными маслами ресурс, определить состав эксплуатационных примесей и состояние фильтрующих элементов системы смазки двигателя.

6.10. Технология диагностирования состояния цилиндропоршневой группы

Моторесурс двигателя, определяющий долговечность его работы, в первую очередь зависит от износа деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма (поршневые кольца, коренные и шатунные подшипники) [159].

Предлагаемая технология предусматривает определение технического состояния цилиндропоршневой группы по испаряемости работающего моторного масла. Испаряемость масел характеризует моторные свойства и определяет температурную область их применения, она изменяется и зависит от степени износа цилиндропоршневой группы. Прорыв газов в картер разжижает масло, что вызывает понижение вязкости и температуры вспышки. На испаряемость масел оказывает влияние вода, попадающая в картер из камеры сгорания и из-за конденсации паров влаги в зимний период эксплуатации двигателей в период их пуска. Чем больше продуктов неполного сгорания топлива и влаги попадает в моторное масло, тем больше его испаряемость.

Текущие значения испаряемости работающих масел определяются с помощью прибора для термостатирования и весов. Для этого пробу масла

постоянной массы (100 г) заливают в стакан прибора и термостатируют при температуре 120 °С (для моторных масел) в течение 3 ч. После испытания пробу термостатированного масла взвешивают и по разности масс до и после термостатирования определяют массу испарившегося масла. Испаряемость моторного масла определяет состояние цилиндропоршневой группы: чем она больше, тем больше изношена цилиндропоршневая группа. При больших значениях необходимо провести диагностику технического состояния цилиндропоршневой группы, мощностных характеристик двигателя и расхода топлива, что позволит определить необходимость проведения текущего или капитального ремонтов. Масла с повышенной испаряемостью при эксплуатации техники более интенсивно загрязняются продуктами неполного сгорания топлива.

6.11. Технология диагностирования противоизносных свойств работающих моторных масел

Данная технология предназначена для текущего контроля противоизносных свойств работающих масел и применяется совместно с другими описанными в данной главе технологиями. Для реализации технологии применяют фотометрическое устройство, малообъемный вискозиметр и трёхшариковую машину трения со схемой «шар–цилиндр».

Способ текущего контроля противоизносных свойств работающих моторных масел осуществляется следующим образом. Из хорошо прогретого двигателя отбирается проба масла массой 25 г, которая фотометрируется при толщине фотометрируемого слоя 0,15 мм. Во второй части пробы измеряют вязкость при температуре 100 °С. Если вязкость работающего масла ниже 20 % или выше на 30–35 %, чем у товарного масла, то принимают решение о замене данного масла.

Текущий контроль работающих моторных масел осуществляется до предельного значения коэффициента поглощения светового потока, установленного для каждого сорта масла, по методике, описанной в пунктах 4.1, 4.2. Для контроля совпадений значений противоизносных свойств, определяемых по эталонной зависимости с истинными значениями, проводят испытания пробы масла на трёхшариковой машине трения.

|| ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам наших исследований разработан универсальный метод контроля состояния трансмиссионных масел, моторных масел различной базовой основы, включающий: прямое фотометрирование, центрифугирование, определение показателей термоокислительной стабильности, противоизносных свойств и интенсивности процессов, протекающих при окислении и на поверхностях трения. Он позволяет получить дополнительную информацию о состоянии товарных масел и обосновать их выбор для трансмиссий и ДВС.

Получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения процессов окисления товарных трансмиссионных масел различной базовой основы при статической и циклически изменяющейся температурах, на основании которых установлено, что процессы окисления протекают последовательно с образованием первичных продуктов окисления, переходящих во вторичные с бóльшей оптической плотностью, что вызывает явление перераспределения тепловой энергии между этими продуктами и испарением, оцениваемое коэффициентом интенсивности процессов самоорганизации. Циклическое изменение температуры испытания позволяет определить температуры начала процессов окисления и испарения, обосновать принадлежность масел к группам эксплуатационных свойств.

Предложен критерий термоокислительной стабильности, учитывающий оптические свойства и испаряемость масел при окислении, альтернативный критерий, характеризующий сопротивляемость окислению и испарению, который позволит определить температурную область работоспособности, и альтернативный критерий противоизносных свойств, учитывающий концентрацию продуктов окисления на номинальной площади фрикционного контакта, определяемый отношением коэффициента поглощения светового потока к площади контакта. Это даст возможность осуществлять обоснованный выбор масел в зависимости от степени нагруженности трансмиссий и ДВС, совершенствовать систему классификации по группам эксплуатационных свойств.

Применение электрометрического метода контроля процессов, протекающих на фрикционном контакте, позволило обосновать целесообразность использования дополнительных показателей триботехнических характеристик масел, включая продолжительность пластических, упруго-пластических и упругих деформаций, электропроводность фрикционного контакта и время его формирования, коэффициент интенсивности механо-

химических процессов. Это помогает оценить влияние механической и химической составляющих на изнашивание.

Разработан метод контроля предельного состояния моторных масел различной базовой основы, позволяющий повысить эффективность использования смазочных материалов.

Анализ отработанных моторных масел различной базовой основы парка машин (40 ед.) показал, что концентрация общих продуктов старения колеблется от 0,06 до 0,61 ед., нерастворимых – от 0,02 до 0,28 ед., растворимых – от 0,01 до 0,59 ед., вязкость изменяется в пределах от 8,11 до 24,4 мм²/с, противоизносные свойства от – 0,28 до 0,38 мм, что указывает на несовершенство существующей системы замены масел по пробегу автомобиля.

На базе статистической обработки результатов исследования отработанных моторных масел различной базовой основы обосновано предельное значение концентрации общих продуктов старения, определяемое фотометрическим методом и численно равное $K_{п} = 0,37 \pm 0,02$ ед.

Предложено оценивать состояние фильтрующих элементов масляной системы двигателя по концентрации нерастворимых продуктов старения, а состояние цилиндропоршневой группы двигателя – по испаряемости отработанных масел, термостатированных при температуре 120 °С.

Разработаны практические рекомендации, включающие технологию контроля: состояния трансмиссионных масел по составу продуктов окисления (старения); концентрации легких фракций, а также воды и продуктов износа; потенциального ресурса товарных и остаточного ресурса работающих масел; сопротивляемости окислению; температуры начала процессов окисления и испарения; состояния работающих масел парка машин; противоизносных свойств. Также даны рекомендации по выбору трансмиссионных масел и их классификации; рекомендации по периодичности контроля состояния работающих трансмиссионных масел парка машин.

Наши рекомендации включают технологии определения предельного состояния отработанных масел; текущего контроля состояния работающих моторных масел; технического состояния цилиндропоршневой группы и фильтрующих элементов системы смазки; противоизносных свойств, направленные на повышение эффективности применения моторных масел, совершенствование системы планово-предупредительных ремонтов и снижение эксплуатационных затрат.

|| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, М.В. Отечественные бронированные машины 1945–1965 / М.В. Павлов // Т и В. – 2008. – № 5–9, 11, 12.
2. 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. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский центр «Техинформ», 1999. – С. 596.
3. Коулмен, В. Расчет конических и гипоидных зубчатых колес на заедание / В. Коулмен // Экспресс-информация. Сер. Детали машин. – 1966. – № 37.
4. Рыбак, Б.М. Анализ нефтей и нефтепродуктов / Б.М. Рыбак. – М. : Гостопиздат, 1962. – С.880.
5. ГОСТ 25371–97. Нефтепродукты. Расчет индекса вязкости по кинетической вязкости. – М.: Изд-во стандартов, 1997.
6. Папок, К.К. Словарь по топливам, маслам, смазкам, присадкам и спецжидкостям / К.К. Папок, Н.А. Рогозин. – М. : Химия, 1975. – С. 392.
7. Климов, К.И. Трансмиссионные масла / К.И. Климов, Г.Н. Кичкин. – М. : Химия, 1970. – С. 250.
8. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2 кн. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 400.
9. Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г.И. Фукс. – М. : Машгиз, 1953. – С. 654.
10. Шрам, В.Г. Метод контроля влияния температуры и механической нагрузки на триботехнические свойства моторных масел: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В.Г. Шрам. – Томск, 2014. – С. 21.
11. Петров, О.Н. Метод контроля влияния продуктов деструкции смазочных масел и электрического потенциала на противоизносные свойства: автореф. дис. ...канд. техн. наук / О.Н. Петров. – Томск, 2013. – С. 20.
12. Детали машин: справочник: в 2 кн. Кн.1 / под ред. Н.С. Ачеркана. – М. : Машгиз, 1953. – С. 654.
13. Часовщиков, Л.Д. Передачи зацепления / Л.Д. Часовщиков. – М. : Машиностроение, 1969. – С. 487.
14. Чичинадзе, А.В. Диаграмма переходов и экранирующее действие смазочного слоя / А.В. Чичинадзе, И.А. Буяновский, Б.Э. Гурский // Трение и износ. – 2002. – № 3 (23). – С. 334–340.
15. Семенов, А.П. О теории схватывания металлов / А.П. Семенов // Теория трения и изнашивания : сб. тр. – М.: Наука, 1965. – С.164–170.

16. Виноградов, Г.В. Условия и виды заедания при трении закаленной стали в углеродных смазочных средах / Г.В. Виноградов, Ю.Я. Подпольский, Н.В. Карелова // Машиностроение. – 1965. – № 5. – С. 109–114.
17. Крагельский, И.В. О природе заедания при сухом и граничном трении / И.В. Крагельский, Н.М. Алексеев, Л.Е. Фисун // Трение и износ. – 1980. – № 2. – С. 197–208.
18. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев : Техника, 1970.
19. Кащеев, В.Н. К вопросу об изнашивании стали в условиях интенсивного схватывания / В.Н. Кащеев // ФХММ. – 1969. – № 4. – С. 21–30.
20. Марков, Д.П. Адгезионно-инициируемые типы катастрофического изнашивания / Д.П. Марков, Д. Келли // Трение и износ. – 2002. – № 5 (23). – С. 483–493.
21. Владимиров, В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М. : Металлургия, 1984.
22. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушения металлов / В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – С. 280.
23. Гарбар, И.И. О структуре и строении поверхностных слоев сопряженных трущихся пар / И.И. Гарбар // Трение и износ. – 1990. – Т.11, № 4. – С. 581–593.
24. Жарин, А.Л. Определение характеристик усталостного разрушения материалов при трении скольжения. 4.1. Анализ методов / А.Л. Жарин, Н.А. Шипица, Д.И. Сорока // Трение и износ. – 2001. – № 4 (22). – С. 410–414.
25. Справочник по триботехнике : в 2 т. Т. 1 / под ред. М. Хебди, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение; Варшава: ВКЛ, 1989.
26. Методика расчетной оценки износостойких поверхностей трения деталей машин. – М. : Изд-во стандартов, 1979.
27. Журков, С.Н. Временная зависимость прочности твердого тела / С.Н. Журков // Журнал технической физики. – 1953. – Вып. 10 (23). – С. 167–168.
28. Кудши, Н.Н. Статическая модель контактной усталости шероховатых тел / Н.Н. Кудши // Трение и износ. – 1991. – № 2 (12). – С. 197–203.
29. Крагельский, И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добыгин, В.С. Камбалов. – М. : Машиностроение, 1977.
30. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск : Высш. шк., 1999.
31. Марченко, Е.А. Циклический характер накопления искажений II рода в поверхностном слое как физическое подтверждение усталостной природы износа / Е.А. Марченко, Е.Ф. Непомнящий, Г.М. Хараг // Доклады АН СССР. – 1968. – № 5 (181). – С. 103–104.

32. Марченко, Е.А. О закономерностях образования микротрещин в поверхностных слоях металлов в условиях трения при пластическом контакте / Е.А. Марченко, Г.М. Хараг // Доклады АН СССР. – 1976. – № 4 (231). – С. 835–837.

33. Марченко, Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении / Е.А. Марченко. – М. : Наука, 1979.

34. Алексеев, Н.М. Основные закономерности усталостного разрушения фрикционного контакта / Н.М. Алексеев, А.В. Блюмен, А.М. Шапиро // Механика. – 1986. – № 7 (5). – С. 45–51.

35. Ковальский, Б.И. Электрометрический метод контроля механохимических процессов при граничном трении скольжения / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, О.Н. Петров: сб. науч. тр. 10-й междунар. конф. «Трибология и надежность». – СПб., 2010.

36. Жарин, А.Л. Определение характеристик усталостного разрушения материалов при трении скольжения: в 2 ч. Ч. 2. Периодические изменения работы выхода электрона трущейся поверхности как параметр усталостного разрушения при трении / Л.А. Жарин, Н.А. Шипица, Д.Н. Сорока // Трение и износ. – 2001. – № 5 (22). – С. 535–539.

37. Гаркунов, Д.Н. О связи окислительно-восстановительных реакций в парах трения с контактной разностью потенциалов / Д.Н. Гаркунов, А.А. Марков, Г.А. Голиков // Теория смазочного действия и новые материалы. – М. : Наука, 1966. – С. 12–17.

38. Matveevsky R. M The effect of nature of friction surfaces and librikant on the absorption and temperature stability of lubricant layers / R.M. Matveevsky, A.B. Vipper, A.A. Markov // Wear. – 1977. – (45). – P. 143–150.

39. Марков, А.А. Измерение работы выхода электрона при трении / А.А. Марков // Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. – М. : Наука, 1973. – С. 28–34.

40. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А.Л. Жарин. – Минск : Репринт, 1966. – С. 240.

41. Жарин, А.Л. Метод непрерывного контроля процессов трения / А.Л. Жарин // Трение и износ. – 1993. – № 3 (14). – С. 570–582.

42. Жарин, А.Л. Влияние контактных напряжений на величину работы выхода электрона поверхностей / А.Л. Жарин, Е.И. Фишбейн, Н.А. Шипица // Трение и износ. – 1995. – № 3 (16). – С. 489–503.

43. Мельников, В.Г. Влияние параметров трения на энергию активации трибо-химического разложения смазочных материалов в зоне трения качения / В.Г. Мельников // Трение и износ. – 2001. – № 5 (22). – С. 567–573.

44. Климов, К.И. Антифрикционные пластичные смазки / К.И. Климов. – М. : Химия, 1980.

45. Сосулина, Л.Н. Исследование состава продуктов триботехнических превращений пластичных смазок в условиях трения качения / Л.Н. Сосулина, Т.Г. Скрябина // Трение и износ. – 1984. – № 5 (5). – С. 923–929.
46. Сосулина, Л.Н. Состояние рабочей и резервной смазки в шарикоподшипнике при повышенных рабочих температурах / Л.Н. Сосулина, Н.К. Волобуев, Т.Г. Скрябина // Трение и износ. – 1984. – № 6 (5). – С. 130–134.
47. Буяновский, И.А. К применению кинетического подхода для описания процесса граничной смазки / И.А. Буяновский // Трение и износ. – 2003. – № 3 (24). – С. 313–321.
48. Буяновский, И.А. Граничная смазка: Этапы развития трибологии / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина. – М. : Нефть и газ, 2002.
49. Климов, К.И. Противозадирные свойства масел. Функция скорости их разложения в зоне трения / К.И. Климов // Доклады АН СССР. – 1966. – № 1 (167). – С. 45–48.
50. Буяновский, И.А. К оценке нижних температурных пределов действия химически активных присадок / И.А. Буяновский // Трение и износ. – 1981. – № 4 (2). – С. 702–706.
51. Кончиц, В.В. Смазочные свойства органических отложений на поверхностях трения при повышенной температуре / В.В. Кончиц, С.В. Короткевич, С.Д. Саутин // Трение и износ. – 2003. – № 8 (23). – С. 170–175.
52. Кончиц, В.В. Смазка скользящих электромеханических переключателей / В.В. Кончиц, Ю.Е. Кирпиченко, Г.А. Польщиков // Трение и износ. – 1992. – № 3 (13). – С. 451–459.
53. Shinshi, A. Electric contact surface of Pd-plated metal in organic gas / atmosphere / A. Shinshi, Y. Imada, F. Honda, K. Nasajima // Wear. – 1999. – (230). – P. 78–85.
54. Кончиц, В.В. Особенности формирования и физические свойства смазочных слоев на стали при повышенных температурах / В.В. Кончиц и др. // Трение и износ. – 2000. – № 2 (21). – С. 513–526.
55. Гершман, И.С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И.С. Гершман, А.Н. Буше // Трение и износ. – 1995. – № 1 (16). – С. 61–69.
56. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, М.Г. Носовский, Л.И. Бершадский. – Киев : Техника, 1976.
57. Гершман, И.С. Самоорганизация вторичных структур при трении / И.С. Гершман, Н.А. Буше, А.Е. Миронов // Трение и износ. – 2003. – № 3 (24). – С. 329–334.
58. Кужаров, А.С. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Ч. 5. Самоорганизация в условиях граничного трения / А.С. Кужа-

ров, С.Б. Булгаревич, А.А. Кужаров, К. Кравчик // Трение и износ. – 2002. – № 6 (23). – С. 645–651.

59. Венцель, С.В. Смазка двигателей внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М. : Машгиз, 1963. – С. 180.

60. Венцель, С.В. Исследование противоизносных свойств масел серии ИГП с помощью пластинчатых насосов / С.В. Венцель, Г.В. Либада // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 6. – С. 131–135.

61. Вилькин, В.Ф. Методические основы установления рациональных сроков смены трансмиссионных масел: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Ф. Вилькин. – М., 1988. – С. 17.

62. Ковальский, Б.И. Термоокислительная стабильность смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Д.Г. Барков // Вестник КГТУ. Вып. 20. Транспорт ; под ред. В.И. Пантелеева. – Красноярск: КГТУ, 2000. – С. 132–135.

63. Спаньковский, Л. Сложные эфиры как компоненты защищенных трансмиссионных масел : автореф. дис. ... кандидата техн. наук / Л. Спаньковский. – М., 1992. – С. 28.

64. Коваленко, В.П. Загрязнение и очистка нефтяных масел / В.П. Коваленко. – М. : Химия, 1978. – С. 302.

65. Крабец, И.А. Оценка процесса изнашивания деталей по электрической проводимости пары трения / И.А. Крабец, Н.Н. Кривенко // Проблемы трения и изнашивания : науч. техн. сб. Вып. 17. – Киев : Техника, 1980. – С. 28–31.

66. Крагельский, И.В. Экспериментальные исследования эффекта пленочного голодания / И.В. Крагельский, Н.М. Алексеев // Трение и износ. – Т.3, № 3. – С. 485–489.

67. Михеев, В.А. Стабильность масел в динамических условиях и эффект последействия / В.А. Михеев, Е.М. Никоноров // Улучшение качества смазочных материалов и присадок: тр. ВНИИ НП. – Вып. XIV. – М. : Химия, 1976. – С. 186–192.

68. Гарзанов, Е.Г. Техническая диагностика поршневых газоперекачивающих агрегатов по анализу масел / Е.Г. Гарзанов, В.А. Ильин // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 2. – С. 284–289.

69. Маркова, Л.В. Трибодиагностика машин / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин, – Минск : Бел. наука, 2005. – С. 251.

70. Barnes M. Water–The Forgotten Contaminant [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : www. noria.com](http://www.noria.com).

71. Lewand L. Understanding Water in Transformer systemsL. Lewand // NETA World Spring. – 2002. – P.1– 4.

72. U.S.Pat № 5656767, MKN Go № 027/22 Automatic determination of moisture content and lubricant type. R.E. Garvey, A.A. Cavey. 12.08.97.

73. Vaisala. Measuring moisture in oil. P.1. Measuring moisture in oil [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http : www.vaisala.com](http://www.vaisala.com).
74. Barnes, M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy / M. Barnes // Practising oil Analysis. Magazine. March 2002.
75. Foster N.S. Detection of trace levels of water in oil by photo acoustic spectroscopy / N.S. Foster, Y.E. Amonette, T. Autrey, Y. Hollsensons and Aeutatous. – 2001. – Bd. 77. – P. 620–624.
76. Химическая энциклопедия : в 85 т. Т. 4 / ред. колл. : И.Л. Кмунянец и др. – М. : Большая рос. энциклопедия, 1992.
77. ГОСТ 7822–75. Масла нефтяные. Метод определения содержания растворенной воды : в 3 кн. – М. : Изд-во стандартов, 1975.
78. Измерения в промышленности : справочник: в 3 кн. Кн. 3. Способы измерения и аппаратура / под ред. П. Профоса. – М. : Metallurgia, 1990. – С. 344.
79. Johnson, J.H. Monitoring of machine wear by used oil analysis // Inproc. Inf. Conf / J.H. Johnson // Tribology in the 80's, 1984, NASA Conf. Publication 2300. 1984. – P. 831–853.
80. Westcott, V.C. Monitoring of wear in fundamentals of tribology / V.C. Westcott. Cambridge MA. MIT Press, 1978. – P. 811–829.
81. Anderson, D.P. Wear particle atlas (revised), Naval Air Eng. Center, Report. NAEC – 92 – 163, 1982 II Burlington : Foxboro Edition, 1982. – 192 p.
82. Bowen, R. Tribology international / R. Bower, D. Scon, W. Seifert, V. Westcott. – 1976. – Vol. 9, № 3. – P. 109–115.
83. Kleis J. The physiat mechanism of the formation of metal microspheres in the wear process / J. Kleis, U. Muiste, U. Pilvre, H. Vuemois, H. Uetz // Wear. – 1979. – Vol. 53, № 1. – P. 79–85.
84. Росоцк, G The observation of spherical debris from a failed soft baking / G. Росоцк // Wear. – 1976. – Vol. 38, № 1. – P. 189–191.
85. Диагностика изнашивания смазанных подвижных соединений / Н.К. Мышкин, О.В. Холодилов, Л.В. Маркова, М.С. Семенюк // Трение и износ. – 1986. – Т. 6, – № 6. – С. 91–101.
86. А.с. № 851111 СССР. МКИ G01 J1/04. Фотометрический анализатор / Б.И. Ковальский, Г.М. Сорокин : опубл. 30.07.81, Бюл. № 28.
87. Пат. № 2428677 РФ, МПК G01N 19/02. Устройство для испытания трущихся материалов и масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, О.Н. Петров, В.И. Тихонов : опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25.
88. Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л.А. Кондаков. – М. : Транспорт, 1974. – С. 156.
89. Аксенов, А.Ф. Применение авиационных технических жидкостей / А.Ф. Аксенов, А.А. Литвинов. – М. : Транспорт, 1974. – С. 156.

90. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение: справочник / под ред. Б.В. Лосикова. – М. : Химия, 1966. – С. 776.
91. Шишков, И.Н. Авиационные горюче-смазочные материалы и специальные жидкости / И.Н. Шишков, В.Б. Белов. – М. : Транспорт, 1979. – С. 247.
92. ГОСТ 13300–67. Масла моторные. Метод определения коррозионных свойств и окисляемости на установке ПЗЗ. – М. : Изд-во стандартов, 1967.
93. ГОСТ 11063–77. Масла моторные с присадками. Метод определения стабильности по индукционному периоду осадкообразования. – М. : Изд-во стандартов, 1977.
94. Пат. №2057326 РФ МКИ G01 № 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Л.Н. Деревягина, И.А. Кириченко; опубл. 1992, Бюл. № 9.
95. Пат. №2199114 РФ МКИ G01 № 33/28. Прибор для оценки эксплуатационных свойств моторных масел / Б.И. Ковальский, Д.Г. Барков, Р.А. Ерашов, С.И. Васильев; опубл. 2003, Бюл. № 5.
96. Пат. № 2219530 РФ МКИ G01 № 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Е.Ю. Янаев; опубл. 2003, Бюл. № 35.
97. Пат. № 2222012 РФ МКИ G01 № 33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Р.А. Ерашов и др.; опубл. 2004, Бюл. № 2.
98. Пат. № 2247971 РФ МКИ G01 № 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Ю.Н. Безбородов, А.А. Бадьина; опубл. 2005, Бюл. № 7.
99. Пат. № 2274850 РФ МКИ G01 № 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Ю.Н. Безбородов, В.В. Гаврилов; опубл. 2006, Бюл. № 11.
100. А.с. № 744325 СССР, МКИ G01 № 33/28. Прибор для оценки термоокислительной стабильности масел / Е.П. Федоров, Н.Т. Разгоняев, В.В. Горячев, О.А. Запорожская; опубл. 1980, Бюл. № 24.
101. ГОСТ 18136–72. Масла. Метод определения стабильности против окисления в универсальном приборе. – М. : Изд-во стандартов, 1972.
102. ГОСТ 981–75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления. – М. : Изд-во стандартов, 1967.
103. Пат. №2318206 РФ, МПК G01 №25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, В.С. Даниленко, Н.Н. Малышева, Ю.Н. Безбородов; опубл. 2008, Бюл. № 6.

104. Пат. №2334976 РФ, МПК G01 №25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, А.А. Метелица, Ю.Н. Безбородов; опубл. 2008, Бюл. № 27.

105. Пат. №2371706 РФ, МПК G01 №25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Е.А. Вишневская, Ю.Н. Безбородов Н.Н. Малышева; опубл. 2009, Бюл. № 30.

106. Пат. №2453832 РФ, МПК G01N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Е.Г. Мальцева, Ю.Н. Безбородов, В.С. Янович, А.А. Игнатъев; опубл. 2012, Бюл. № 17.

107. Пат. №2485486 РФ МПК G01 №25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, А.В. Юдин, В.Г. Шрам, В.С. Янович, М.М. Рунда; опубл. 2013, Бюл. № 17.

108. Пат. № 2408886 РФ МПК G01 №33/30. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, Н.Н. Игнатъев, Е.Г. Мальцева; опубл. 2011, Бюл. № 1.

109. Пат. № 2528083 РФ. МПК G01N 33/30, G01N 3/56. Способ определения качества смазочных масел / Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, Е.Г. Кравцова; опубл. 10.09.2014, Бюл. №25.

110. Пат. № 2454654 РФ. МПК G01 №3/56, G01 №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; опубл. 2012, Бюл. № 18.

111. Пат. № 2222012 РФ. МПК G01 №33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Р.А. Ерашов, Е.Ю. Янаев, А.А. Бадьина; опубл. 2004, Бюл. № 2.

112. Пат. № 2451293 РФ. МПК G01 №33/30. Способ определения работоспособности смазочных масел / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, А.В. Юдин, М.М. Рунда; опубл. 2012, Бюл. № 14.

113. Кораблев, С.А. Термоокислительная стабильность частично синтетического трансмиссионного масла Consol транс люкс 75W-90 GL5/ С.А. Кораблев, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева // Вестник Крас ГАУ.–2007. – Вып. 3. – С. 200–204.

114. Ананьин, Н.Н. Результаты испытаний на термоокислительную стабильность минерального трансмиссионного масла ТНК Транс ойл 85W-90GL5 / Н.Н. Ананьин, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Р.М. Галиахметов: Материалы междунар. науч-техн. конф. «Двигатели 2008». – Хабаровск, 2008. – С. 324–330.

115. Ковальский, Б.И. Исследование влияния продуктов окисления на противоизносные свойства минерального трансмиссионного масла ТСзп-8 / Б.И. Ковальский, В.С. Янович, М.М. Рунда и др. // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та, № 6 (88). – 2011. – С. 55–61.

116. Ковальский, Б.И. Влияние продуктов термоокислительной деструкции на противоизносные свойства трансмиссионного масла МТ-8п / Б.И. Ковальский, В.Г. Шрам, А.В. Юдин, М.М. Рунда // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний. – 2013. – № 10. – С. 17–19.

117. Ковальский, Б.И. Результаты контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел различной базовой основы / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, В.С. Янович и др. // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 4 (190). – С. 74–76.

118. Васильева, Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы: Учебник для вузов. / Л.С. Васильева. – М.: Транспорт, 1986. – С. 177–189.

119. Трейгер, М.И. Экономное и рациональное использование смазочных материалов / М.И. Трейгер. – Л.: ЛДНТП, 1982. – С. 280.

120. Мартынюк, Н.П. Автомобильные эксплуатационные материалы: обзор. информ. / Н.П. Мартынюк, А.П. Корпочан. – М., 1993. – С. 275.

121. Венцель, С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – С. 238.

122. А.с. № 1105815 G 01 №33/28. Устройство для термической деструкции масел / Л.А. Ашкинази, А.С. Куракин, Н.А. Ряполова; опубл. 1984, Бюл. № 28.

123. А.с. № 1269018 G 01 №33/22. Способ оценки термоокислительной стабильности нефтяного топлива / Я.Б. Чертков, В.С. Азев, Р.М. Березина, Т.И. Кирсанова; опубл. 1986, Бюл. № 41.

124. А.с. №1525576 G01 №33/30. Способ определения термической стабильности смазочного масла / П.Ф. Григорьев, О.А. Лебедев; опубл. 1989, Бюл. № 44.

125. Пат. № 2419791 РФ МПК G01 №33/30, G01 № 3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Б.И. Ковальский, О.Н. Петров, А.В. Кузьменко, А.С. Ромащенко, А. В. Берко; опубл. 2011, Бюл. №15.

126. А.с. № 527660 СССР, МКИ G01 № 33/30. Способ определения свойств моторного масла / А.В. Непогодьев, В. Г. Колупаев; опубл. 1976, Бюл. № 33.

127. Пат. № 2057326 РФ МКИ³ G01 № 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Л.Н. Деревягина, И.А. Кириченко; опубл. 1996, Бюл. № 9.

128. Пат. №2219530 РФ МКИ³ G01 № 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Е.Ю. Янаев; опубл. 2003, Бюл. № 35.

129. Пат. № 222012 РФ МКИ³ G01 №33/30. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Р.А. Ерашов и др.; опубл. 2004, Бюл. № 2.

130. Пат. № 2298173 РФ МПК⁷ G01 N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, М.А. Шунькина, А.А. Метелица, В.В. Гаврилов, опубл. 2007, Бюл. № 12.

131. Безбородов, Ю.Н. Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных масел по параметрам термоокислительной стабильности: дис. ... д-ра техн. наук / Безбородов Ю. Н. – Красноярск, 2009. – С. 65.

132. Любарский, И.М. Превращения на поверхности трения и их влияние на износостойкость сталей в вакууме / И.М. Любарский, Г.В. Добровольская, И.Л. Лебедева // Трение и износ. – 1980. – Т.1, № 2. – С. 280–292.

133. Грозин, Б.Д. Фазовые и структурные изменения в углеродистой стали при импульсном воздействии высоких температур и давлений / Б.Д. Грозин, С.Б. Нижник. – М.: ФММ, 1961. – Т. 12, № 1. – С. 84–90.

134. Буше, Н.А. Совместимость трущихся поверхностей / Н.А. Буше, В.В. Копытько. – М.: Наука, 1981.

135. Коровчинский, М.В. Прикладная теория подшипников трения / М.В. Коровчинский. – М.: Машгиз, 1954. – С. 186.

136. Масино, М.А. Автомобильные материалы / В.Н. Алексеев, Г.В. Мотовилин // Справочник инженера-механика. – М.: Транспорт, 1979. – С. 288.

137. Дерябин, А.А. Смазка и износ дизелей / А.А. Дерябин. – Л.: Машиностроение, 1974. – С. 184.

138. Автомобильный каталог. – М.: НИИавтопром. 1973. – Т. 4. – Ч. 1–2. – С. 334.

139. Маркова, Л.В. Трибодиагностика машин / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин. – Минск: Белорус. наука, 2005. – С. 13.

140. Химическая энциклопедия: в 5 т. / редкол.: И. Л. Кнунянц (гл. ред.) и др. – М.: Большая Российская энцикл., 1992. – Т. 3.

141. Справочник по триботехнике: в 3 т. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990.

142. Автомобильный каталог. – М.: НИИавтопром, 1974. – Т. 6. – Ч. 1–10. – С. 10.

143. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 688.

144. Трение, изнашивание и смазка: справочник / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение. – 1978. – 400 с. – Кн.1.

145. Виноградова, И.Э. Противоизносные присадки к маслам / И.Э. Виноградова. – М.: Химия, 1972. – С. 272.
146. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Изд-во физ-мат. лит., 1963. – С. 472.
147. Ишлинский, А.Ю. Развитие науки о трении и износе в СССР / А.Ю. Ишлинский, В.А. Белый // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 1. – С. 7–11.
148. Марковский, Е.А. Радиоактивный контроль износа деталей двигателей внутреннего сгорания / Е.А. Марковский, В.И. Тихонович. – Киев: Техника, 1965.
149. Костецкий, Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении / Б.И. Костецкий // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 2. – С. 201–212.
150. Безбородов, Ю.Н. Методы и средства повышения эффективности использования трансмиссионных масел: монография / Ю.Н. Безбородов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. – С. 154.
151. Ковальский, Б.И. Методы и средства повышения эффективности использования смазочных масел / Б.И. Ковальский. – Новосибирск: Наука, 2005. – С. 34.
152. Терентьев, В.Ф. Смазка и смазочные материалы в трибосистемах / В.Е. Редькин, С.И. Щелканов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – С. 7–20.
153. Гольберг, Д.О. Контроль производства масел и парафинов / Д. О. Гольберг. – М.: Химия, 1964. – С. 245.
154. 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.
155. Зуйдема, Г.Г. Эксплуатационные свойства смазочных масел / Г.Г. Зуйдема. – М.: Гостоптехиздат, 1957. – С. 170.
156. Обслуживание старых легковых автомобилей. ServicezeitmitOldtimern // AMZ: Auto, Mot., Zubehor. – 2002. – № 95 (нем).
157. Большаков, Г.Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов / Г.Ф. Большаков. – Л.: Недра, 1974. – С. 318.
158. Соколов, А.И. Измерения качества масел и долговечность автомобильных двигателей / А.И. Соколов. – Томск. Изд-во Томского ун-та, 1976. – С.120.
159. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев: Техника, 1970. – С. 396.
160. Кропачев, В.С. Трение и износ стали ШХ-15 в водно-органическом растворе / В.С. Кропачев, М.А. Толстая, И.А. Буяновский // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 5. – С. 897–902.

161. Коваленко, В.П. Загрязнённость нефтяных масел при трансформировании и хранении и их очистка / В.П.Коваленко. – М.: Изд-во УНИИТЭ-нефтехим, 1974.–С.60.
162. Ковальский, Б.И. Методы и средства повышения эффективности использования смазочных материалов / Б.И. Ковальский. – Новосибирск: Наука, 2005. – С. 341.
163. Скиндер, Н. И. Портативный комплект средств / Н. И. Скиндер, Ю.А. Гурьянов // Химия и технология топлив и масел. – 2001. – № 1. – С. 38–41.
164. Ковальский, Б.И. Разработка комплексного метода оценки работоспособности дизельных масел: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.И. Ковальский. – М., 1985. – С. 24.
165. А.с № 2057326 (СССР), МКИ³G01№25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Л.Н. Деверягина, И.А. Кириченко; заявитель и патентообладатель Государственный проектный научно-исследовательский и конструкторский институт. – № 5046019/25; опубл. 1996, Бюл. № 9.
166. Пат. № 2057326 РФ, МКИ³ G 01 № 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Р.А. Ерашов и др.; опубл. 2004, Бюл. № 35.
167. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1968. – С. 97.
168. А.с. 610534 РФ, МКИ³ G01 J1/04. Регрессионный анализ многофакторных экспериментальных исследований (Eregre) / С.П. Ереско; опубл. 2004, Бюл. № 28.
169. Ковальский, Б.И. Термоокислительная стабильность трансмиссионных масел : монография / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Л.А. Фельдман, Н.Н. Малышева. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – С. 150.
170. Верещагин, В.И. Методика оценки ресурса моторных масел / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, А.С. Попов // Вестник Крас ГАУ. Вып. 6. – Красноярск, 2007. – С. 169–174.
171. Сорокин, Г.М. Термоокислительная стабильность трансмиссионного масла ТС / Г.А. Сорокин, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева // Вестник машиностроения, 2008. – № 6.
172. Розенберг, Ю.А. Влияние смазочных масел на долговечность и надёжность деталей машин / Ю.А. Розенберг. – М.: Машиностроение, 1970. – С. 315.
173. Венцель, С.В. Смазка двигателей внутреннего сгорания / С. В. Венцель. – М.: Машгиз, 1963. – С. 179.

174. Ковальский, Б.И. Методология контроля и диагностики смазочных материалов как элементов систем приводов многокомпонентных машин / Б.И. Ковальский: сб. науч. тр. – Красноярск, – 2005. – С. 412.

175. Ахматов, А.С. Граничный смазочный слой как квазитвердое тело / А.С. Ахматов. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1965. – Т. 3. – С. 144–154.

176. Верещагин, В.И. Методика оценки ресурса моторных масел / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, А.С. Попов // Вестн. КрасГАУ. – 2007. – № 6. – С. 169–174.

177. 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, транспорта и архитектуры. – Бишкек, 2009. – С. 335–339.

178. ГОСТ 981–75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления. – М. : Изд-во стандартов, 1975.

179. Безбородов, Ю.Н. Методика исследования противоизносных свойств товарных моторных масел и механохимических процессов при граничном трении скольжения / Ю.Н. Безбородов, Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, Е.Г. Мальцева // Известия Том. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 42–43.

180. Ковальский, Б.И. Влияние степени окисления моторных масел на их противоизносные свойства / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.В. Юдин, О.Н. Петров / Науч. техн. конф. с участием иностр. специалистов, посвященная 120-летию выдающегося триболога М.М. Хрущова. 7–10 декабря, 2010, г. Москва. – М., 2010.

181. Рунда, М.М. Исследование влияния срока хранения минеральных моторных масел на термоокислительную стабильность и противоизносные свойства / М.М. Рунда, Б.И. Ковальский, В.С. Янович, Н.А. Лебедева // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2012. – № 9. – С. 12–17.

182. Ковальский, Б.И. Процессы, протекающие на фрикционном контакте при триботехнических испытаниях работающих масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, В.Г. Шрам, М.М. Рунда // Контроль. Диагностика.– № 13.– 2013. – С. 172–177.

183. Алексеев, Р.И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа / Р.И. Алексеев, Ю.И. Коробин. – М. : Атомиздат, 1972. – С. 72.

184. Пустыльник, Е.Н. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.Н. Пустыльник. – М. : Наука, 1968. – С. 288.

185. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – М. : Наука, 1968. – С. 97.

186. А.с. № 610534 РФ, МКИ³ G01 №1/04. Регрессионный анализ многофакторных элементарных исследований (Eregre) / С.П. Ереско, опубл. 2004, Бюл. №25.

187. Черножуков, Н.И. Химия минеральных масел / Н.И. Черножуков, С.Э. Крейн, Б.В. Лосиков и др. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – С. 417.

188. Маркова, Л.В. Современные требования к контролю работоспособности масла дизельного ДВС / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин, Х. Конг и др. // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 4. – С. 425–435.

189. Ковальский, Б.И. Влияние климатических условий эксплуатации двигателей на процессы старения моторных масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, М.М. Рунда, В.С. Янович, В.Г. Шрам // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний. – 2013. № 12. – С. 8–10.

190. Ковальский, Б.И. Результаты испытания частично синтетических моторных масел на термоокислительную стабильность / Б.И. Ковальский, О.Н. Петров, В.Г. Шрам, В.С. Янович // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2014. № 7. – С. 23–28.

191. Ковальский, Б.И. Оптический метод контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел / Б.И. Ковальский, В.С. Янович, О.Н. Петров // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. II. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 302–311.

192. Пат. №2406087 РФ МПК G01 №33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева и др.; опубл. 2010, Бюл. № 34.

193. Ковальский, Б.И. Методика исследования противоизносных свойств и механохимических процессов при граничном трении скольжения / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, С.Б. Ковальский и др. // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 42–46.

194. Ковальский, Б.И. Исследование связи процессов окисления смазочных материалов с их противоизносными свойствами / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, А.А. Метелица и др. // Тр. 4 Междунар. симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо» / под ред. С.Г. Чулкина и П.М. Лысенкова. – СПб. : Изд-во «Ломоинфраспек», 2010. – С. 86–91.

195. Верещагин, В.И. Влияние процесса старения моторного масла RavenoIVSI 5W–40SM/CF на его противоизносные свойства / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, М.М. Рунда и др. // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 5, (99). – С. 91–97.

196. Даниленко, В.С. Метод определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / В.С. Даниленко, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов и др. // Вестник КрасГАУ. – 2009. – Вып. 1 (22). – Ч. 2 – С. 93–96.

197. Попов, А.С. Процесс окисления минеральных масел с учетом доливов/ А.С. Попов, Б.И. Ковальский, С.И. Васильев // Химия и технология топлив и масел. – 2009. – № 4. – С. 94–95.

198. Ковальский, Б.И. Исследование синтетических моторных масел на термоокислительную стабильность при циклическом изменении температуры / Б.И. Ковальский, В.Г. Шрам, Н.Н. Малышева // Известия Тул. гос. техн. ун-та. – 2012. – Вып. 10. – С. 254–259.

199. Даниленко, В.С. Метод исследования термоокислительной стабильности моторных масел при циклическом изменении температуры испытания / В.С. Даниленко, Б.И. Ковальский, Е.А. Вишневская и др. // Вестник СибГАУ. – 2009. – Вып. 1 (22). – Ч. 2. – С. 97–99.

200. Ковальский, Б.И. Методы и средства повышения эффективности использования смазочных материалов / Б.И. Ковальский. – Новосибирск : Наука, 2005. – С. 341.

201. Давыдов, П.Н. Исследование старения масла в двигателях / П.Н. Давыдов, И.И. Сабарова. – М. : ЦНИИ ТЭНефтехим, 1968. – С. 28–42.

202. Ковальский, Б.И. Результаты анализа отработанных моторных масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, В.С. Даниленко, Н.Н. Малышева // Вестник университетского комплекса: сб. науч. тр. / под общей ред. Н.В. Василенко. – Красноярск: ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ, 2006. – № 8(22). – С. 257.

203. Маркова, Л.В. Современные требования к контролю работоспособности масла дизельного ДВС / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин и др. // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 4. – С. 425–435.

204. 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 Междунар. науч.-техн. конференции / Кырг. гос. ун-т строит-ва, транспорта и архитектуры. – Бишкек, 2009. – С. 349–353.

205. Пинчук, В.Г. О взаимосвязях изменения структуры поверхностных слоев твердых тел и смазочной среды при трении / В.Г. Пинчук, Р.Г. Пинчук // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 2. – С. 335–338.

206. Ковальский, Б.И. Влияние климатических условий эксплуатации двигателей на процесс старения моторного масла / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, М.М. Рунда и др. // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – М., 2013. – № 12. – С. 8–10.

207. Чиченадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чиченадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др. – М.: Машиностроение, 2003. – С. 576.

208. Безбородов, Ю.Н. Методы и средства повышения эффективности использования трансмиссионных масел: монография / Ю.Н. Безбородов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн ин-т, 2007. – 154 с.

209. Буше, Н.А. Совместимость трущихся поверхностей / Н.А. Буше, В.В. Копытько. – М. : Наука, 1981. – 128 с.
210. Лашхи, В.Л. Исследование эффективности действия антифрикционных присадок к моторным маслам / В.Л. Лашхи, А.Б. Виппер, И.А. Буяновский и др. // Трение и износ. – 1982. – Т. 3. – С. 988–993.
211. Матвеевский, Р.М. Оценка энергии активации процесса химического модифицирования поверхности трения в условиях граничной смазки / Р.М. Матвеевский, И.А. Буяновский и др. // Химия и технология топлив и масел. – 1976. – № 3. – С. 50–52.
212. Пинчук, Л.С. О некоторых возможностях поляризации пар трения / Л.С. Пинчук, А.С. Неверов, В.А. Гольгаде // Трение и износ. – 1980. – № 6. – С. 1089–1092.
213. Ковальский, Б.И. Кинетика приспособляемости пар трения / Б.И. Ковальский // Совершенствование навесного оборудования строительных машин и технологии земляных и свайных работ. – Красноярск, 1984. – С. 68–77.
214. Сорокин, Г.М. Оценка совместимости материалов пар трения электрическим методом / Г.М. Сорокин, Б.И. Ковальский // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 2. – С. 234–239.
215. Сорокин, Г.М. О связи механизма изнашивания с механохимическими процессами на фрикционном контакте в условиях граничной смазки / Г.М. Сорокин, Б.И. Ковальский // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 4. – С. 720–723.
216. Ковальский, Б.И. Ускоренный метод оценки эксплуатационных свойств трансмиссионных масел / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, С.И. Васильев и др. // Механизация строительства. – 2004. – № 10. – С. 18–20.
217. А. с. 1270642 СССР, МКИ³G01N 3/56 Способ оценки вида изнашивания поверхностей трения / Б.И. Ковальский, Г.М. Сорокин; опубл. 15.11.86, Бюл. № 42.
218. А. с. 1670521 СССР, МКИ³G01N 3/56 Способ определения смазывающей способности масел / Б.И. Ковальский, Н.К. Мышкин, Н.Н. Титовский; опубл. 1991, Бюл. № 30.
219. Ковальский Б.И. Метод оценки качества отработанных моторных масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, А.А. Метелица, А.С. Попов // Наука и технологии: труды XXVI Российской школы. – М.: РАН, 2006. – С. 295.
220. Верещагин, В.И. Технология определения предельного состояния работавших моторных масел / В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский, Е.Г. Мальцева // Энергетика в глобальном мире: сб. тез. докл. Первого междунар. науч.-техн. конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010. – С. 313.

221. Верещагин, В.И. Диагностика состояния фильтрующих элементов в процессе эксплуатации двигателя внутреннего сгорания/ В.И. Верещагин, Б.И. Ковальский // Механики XXI века. VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. – Братск : Брат. ун-т, 2008. – С. 428.

222. Ковальский, Б. И. Вопросы прогнозирования долговечности технических систем по параметрам смазочного материала / Б. И. Ковальский, В. И. Верещагин // Современные проблемы развития науки, техники и образования : сб. науч. тр. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – С. 359–368.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Протоколы экспериментальных данных моторных масел

Таблица П1

Результаты изменения коэффициента поглощения светового потока (K_p) отработанных частично синтетических моторных масел от времени и температуры испытания (180 °С)

№ п/п	Марка масла	Пробег авто-мобиль, км	Продолжительность работы масла, км	Время испытания, ч				
				Исходное	3	8	14	20
1	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	161 450	8 000	0,23	0,43	0,47	0,48	0,49
2	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	184 190	16 000	0,40	0,72	0,76	0,79	0,80
3	Zic A Plus 5W-30 SL/CF	173 190	11 500	0,51	0,72	0,77	0,80	0,81
4	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	135 290	8 000	0,29	0,33	0,35	0,38	0,38
5	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	164 500	9 000	0,33	0,73	0,82	0,87	0,89
6	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	135 500	10 000	0,19	0,35	0,39	0,40	0,50
7	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	98 700	10 700	0,17	0,31	0,36	0,42	0,45
8	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	114 000	7 000	0,17	0,35	0,41	0,53	0,55
9	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	66 800	8 800	0,41	0,62	0,77	0,87	0,90
10	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	176 500	10 000	0,27	0,56	0,63	0,66	0,68
11	Texaco Havoline Extra 10W-40 SJ/CF	188 460	9 800	0,25	0,38	0,58	0,59	0,6
12	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	85 242	10 000	0,33	0,58	0,65	0,67	0,71
13	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	103 000	12 500	0,37	0,41	0,41	0,45	0,49
14	Ravenol HCS 5W-40 SL/CF	195 130	10 000	0,24	0,30	0,60	0,60	0,62
15	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	319 666	10 000	0,22	0,53	0,63	0,71	0,76
16	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	30 820	11 000	0,17	0,47	0,61	0,69	0,75
17	THKСупер 5W-40 SL/CF	76 200	10 000	0,24	0,39	0,42	0,52	0,55
18	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	156 215	6 000	0,24	0,39	0,42	0,52	0,55
19	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	135 066	10 000	0,29	0,57	0,63	0,67	0,68
20	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	158 550	6 000	0,24	0,38	0,42	0,52	0,55

Таблица П2

**Результаты изменения испаряемости отработанных частично синтетических моторных масел
от времени и температуры испытания (180 °С)**

№ п/п	Марка масла	Пробег автомобиля, км	Продолжительность работы масла, км	Время испытания, ч			
				3	8	14	20
1	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	161 450	8 000	4,8	6	7	8
2	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	184 190	16 000	3,5	4,9	5,8	6,6
3	Zic A Plus 5W-30 SL/CF	173 190	11 500	3,3	4,9	6,5	7,7
4	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	135 290	8 000	5,7	7,9	9,6	11
5	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	164 500	9 000	3,9	6,1	8,2	9,7
6	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	135 500	10 000	3,6	5,28	6,8	7,25
7	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	98 700	10 700	2,5	4,2	5,8	7
8	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	114 000	7 000	3,6	5	6,6	7,8
9	Texaco Havoline Extra 10W-40SJ/CF	66 800	8 800	6,9	8,5	10,1	11,5
10	Texaco Havoline Extra 10W-40 SJ/CF	176 500	10 000	3,5	4,8	5,6	6,4
11	Texaco Havoline Extra 10W-40 SJ/CF	188 460	9 800	2,8	3,7	4,6	5,5
12	Texaco Havoline Extra 10W-40 SJ/CF	85 242	10 000	4,6	6,2	6,6	6,7
13	Texaco Havoline Extra 10W-40 SJ/CF	103 000	12 500	1,8	3,7	4,9	6,2
14	Ravenol HCS 5W-40 SL/CF	195 130	10 000	3,4	4,6	5,7	6,8
15	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	319 666	10 000	3,0	4,6	5,9	7
16	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF;	30 820	11 000	3,7	5,3	6,7	8
17	THK CUIEP 5W-40 SL/CF	76 200	10 000	9,9	15,1	16,5	19,3
18	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	156 215	6 000	3,8	5,1	6,1	6,6
19	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	135 066	10 000	5,0	6,4	8	9,7
20	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	158 550	6 000	3,8	4,8	5,3	6,6

Результаты изменения коэффициента относительной вязкости (K_{μ}) отработанных частично синтетических моторных масел от времени и температуры испытания(180 °С)

№ п/п	Марка масла	$\mu_{\text{тов}} 100^{\circ}\text{C},$ сСт	$\mu_{\text{исх}}$	$\frac{\mu_{\text{исх}}}{\mu_{\text{тов}}} = K_{\mu}$	%	$\mu_{\text{окисл}}$ 3 ч	$\frac{\mu_{\text{окисл}}}{\mu_{\text{тов}}} = K_{\mu\text{о}}$	%
1	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	14,78	14,24	0,96	4	15,08	1,02	-2
2	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	14,78	15,17	1,03	-3	16,81	1,14	-14
3	Zic A Plus 5W-30 SL/CF	11,68	8,11	0,69	31	8,71	0,75	25
4	Zic A Plus 10W-40 SL/CF	14,3	9,65	0,67	33	11,62	0,81	19
5	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	14,3	14,04	0,98	2	14,48	1,01	-1
6	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	14,3	13,25	0,93	7	14,74	1,03	-3
7	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	14,3	14,04	0,98	2	14,78	1,03	-3
8	BP Visco 3000 10W-40 SJ/CF	14,3	12,66	0,89	11	13,40	0,94	6
9	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	14,6	15,08	1,03	3	16,95	1,16	-16
10	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	14,6	13,74	0,94	6	14,14	0,97	3
11	Texaco Havoline Extra 10W-40SJ/CF	14,6	13,30	0,91	9	17,05	1,17	-17
12	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	14,6	13,55	0,93	7	13,75	0,94	6
13	Texaco Havoline Extra10W-40 SJ/CF	14,6	14,59	1,00	0	15,08	1,03	-3
14	Ravenol HCS 5W-40 SL/CF	14,6	13,05	0,89	11	13,10	0,90	10
15	Ravenol TSI 10W-40 SM/CF	14	13,00	0,93	7	13,10	0,94	6
16	Ravenol TSI 10W-40SM/CF;	14	10,73	0,77	23	10,73	0,77	23
17	THK CUIEP 5W-40 SL/CF	14,22	10,29	0,72	28	12,71	0,89	11
18	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	14,4	9,79	0,68	32	11,28	0,78	22
19	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	14,4	11,82	0,82	18	13,64	0,95	5
20	ESSO Ultra 10W-40 SJ/CF	14,4	9,79	0,68	32	11,72	0,81	19

Результаты изменения коэффициента поглощения светового потока (K_p) отработанных синтетических моторных масел от времени и температуры испытания (180 °С)

№ п/п	Марка масла	Пробег авто-мобиля, км	Продолжительность работы масла, км	Время испытания, ч				
				Исходное	3	8	14	20
1	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	196 000	5 000	0,12	0,21	0,24	0,26	0,29
2	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	145 700	12 000	0,29	0,60	0,66	0,68	0,74
3	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	113 300	9 000	0,19	0,28	0,31	0,33	0,33
4	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF	164 500	9 000	0,4	0,72	0,73	0,81	0,81
5	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF	124 650	11 000	0,31	0,6	0,66	0,68	0,71
6	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF	223 950	10 000	0,06	0,15	0,19	0,25	0,35
7	Mobil Synthetic 5W-40 SJ/CF	132 300	8 000	0,61	0,64	0,64	0,65	0,66
8	Castrol GTX Magnatec 5W-40 SL/CF	39 878	8 000	0,11	0,3	0,35	0,39	0,62
9	Castrol GTX Magnatec 5W-40 SL/CF	230 000	10 000	0,4	0,44	0,44	0,50	0,51
10	Castrol GTX Magnatec 10W-40 SL/CF	28 500	10 000	0,28	0,69	0,8	0,85	0,91
11	Castrol GTX Magnatec 10W-40 SL/CF	173 600	20 000	0,23	0,44	0,52	0,51	0,56
12	Castrol Formula RS 10W-60 SL/CF	74 700	9 000	0,13	0,4	0,45	0,48	0,48
13	Castrol TXT Softec Plus 5W-30 SJ/CF	98 633	10 000	0,21	0,53	0,54	0,57	0,59
14	Texaco Havoline Synthetic 5W-40 SJ/CF	89 500	9 000	0,31	0,55	0,61	0,65	0,7
15	Texaco Havoline Synthetic 5W-40 SJ/CF	39 180	10 000	0,54	0,74	0,8	0,83	0,84
16	ESSO Ultron 5W-40SL/CF	173 190	11 500	0,51	0,72	0,77	0,8	0,81
17	ESSO Ultron 5W-40SL/CF SH/EC	158 500	10 500	0,35	0,59	0,65	0,66	0,67
18	ESSO Ultron 5W-40SL/CF	123 460	10 000	0,17	0,40	0,43	0,55	0,55
19	Shell Helix Ultra 0W-40 SL/CF	142 305	10 000	0,18	0,31	0,33	0,34	0,34
20	Ravenol VSI 5W-40 SM/CF	117 559	9 171	0,26	0,62	0,69	0,45	0,75

Таблица П5

**Результаты изменения испаряемости отработанных частично синтетических моторных масел
от времени и температуры испытания (180 °С)**

№ п/п	Марка масла	Пробег автомобиля, км	Продолжительность работы масла, км	Время испытания, ч				
				3	8	14	20	
1	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	196 000	5 000	3,1	4,2	5	5,7	
2	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	145 700	12 000	4,2	6	7,5	8,9	
3	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	113 300	9 000	1,6	2,9	4,2	4,3	
4	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF	164 500	9 000	4,1	5,6	7,1	7,6	
5	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF	124 650	11 000	3,5	4,8	6	7,1	
6	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF	223 950	10 000	6,8	9,5	11,2	12,6	
7	Mobil Synthetic 5W-40 SJ/CF	132 300	8 000	1,5	3,0	4,5	5,7	
8	Castrol GTX Magnatec 5W-40 SL/CF	39 878	8 000	2,1	3,4	4,4	5	
9	Castrol GTX Magnatec 5W-40 SL/CF	230 000	10 000	4,8	7,4	8,8	9,2	
10	Castrol GTX Magnatec 10W-40 SL/CF	28 500	10 000	6,7	9,5	11,5	13,4	
11	Castrol GTX Magnatec 10W-40 SL/CF	173 600	20 000	2,8	4,3	5,6	6,8	
12	Castrol Formula RS 10W-60 SL/CF	74 700	9 000	3,7	5	6	6,6	
13	Castrol TXT Softec Plus 5W-30 SJ/CF	98 633	10 000	4,5	6,6	8,1	9,3	
14	Texaco Havoline Synthetic 5W-40 SJ/CF	89 500	9 000	2,8	5,1	5,9	6,2	
15	Texaco Havoline Synthetic 5W-40 SJ/CF	39 180	10 000	3,2	4,3	5,4	6,3	
16	ESSO Ultron 5W-40SL/CF	173 190	11 500	3,3	4,9	6,5	7,7	
17	ESSO Ultron 5W-40SL/CF SH/EC	158 500	10 500	3,1	4,7	6,1	6,8	
18	ESSO Ultron 5W-40SL/CF	123 460	10 000	3,5	4,9	6,3	7,4	
19	Shell Helix Ultra 0W-40 SL/CF	142 305	10 000	2,2	3,3	4,3	5,3	
20	Ravenol VSI 5W-40 SM/CF	117 559	9 171	8,2	11	13,4	15	

Таблица П6

**Результаты изменения коэффициента относительной вязкости (K_{μ}) отработанных синтетических моторных масел
от времени и температуры испытания (180 °С)**

№ п/п	Марка масла	$\mu_{\text{тов}} 100^{\circ}\text{C},$ сСт	$\mu_{\text{исх}}$	$\frac{\mu_{\text{исх}}}{\mu_{\text{тов}}} = K_{\mu}$	%	$\mu_{\text{окисл.}}$ 3 ч	$\frac{\mu_{\text{окисл.}}}{\mu_{\text{тов}}} = K_{\mu\text{о}}$	%
1	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	14,3	10,14	0,71	29	10,78	0,75	25
2	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	14,3	15,62	1,09	-9	21,01	1,47	-47
3	Visco BP 5000 5W-40 SJ/CF	14,3	9,7	0,68	32	9,70	0,68	32
4	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF;	17	17,6	1,04	-4	18,63	1,10	-10
5	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF;	17	13,99	0,82	18	17,21	1,01	-1
6	Mobil 1 Rally Formula 5W-50 SJ/CF;	17	10,78	0,63	37	11,97	0,70	30
7	Mobil Synthetic 5W-40 SJ/CF	15,5	11,13	0,72	28	11,47	0,74	26
8	Castrol GTX Magnatec 5W-40 SL/CF	13,7	10,93	0,80	20	11,27	0,82	18
9	Castrol GTX Magnatec 5W-40 SL/CF	13,7	10,04	0,73	27	10,75	0,78	22
10	Castrol GTX Magnatec 10W-40 SL/CF	15,2	15,47	1,02	-2	16,87	1,11	-11
11	Castrol GTX Magnatec 10W-40 SL/CF	15,2	12,97	0,85	15	13,74	0,90	10
12	Castrol Formula RS 10W-60 SL/CF	24,4	17,3	0,71	29	18,05	0,74	26
13	Castrol TXT Softec Plus5W-30 SJ/CF	11,8	9,35	0,79	21	9,40	0,80	20
14	Texaco Havoline Synthetic 5W-40 SJ/CF	13,8	9,99	0,72	28	9,99	0,72	28
15	Texaco Havoline Synthetic 5W-40 SJ/CF	13,8	9	0,65	35	10,29	0,75	25
16	ESSO Ultron 5W-40SL/CF	14,2	8,11	0,57	43	8,71	0,61	39
17	ESSO Ultron 5W-40SL/CF SH/EC	14,2	11,82	0,83	17	13,68	0,96	4
18	ESSO Ultron 5W-40SL/CF	14,2	10,88	0,77	23	11,72	0,83	17
19	Shell Helix Ultra 0W-40 SL/CF	13,5	11,52	0,85	15	12,02	0,89	11
20	Ravenol VSI 5W-40 SM/CF	14	10,48	0,75	25	10,78	0,77	23

Научное издание

Верещагин Валерий Иванович
Янович Валерий Станиславович
Ковальский Болеслав Иванович
Безбородов Юрий Николаевич
Ганжа Владимир Александрович

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ
И МОТОРНЫХ МАСЕЛ
ПРИ ИХ ОКИСЛЕНИИ
И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ**

Монография

Редактор *Т. М. Пыжик*
Корректор *В. Р. Наумова*
Компьютерная верстка *Н. Г. Дербенёвой*

Подписано в печать 26.09.2017. Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 13,0. Тираж 500 экз. Заказ № 1505

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru