

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Ермилов Евгений Александрович

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ  
ТЕРМООКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ  
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНЫХ  
МАСЕЛ**

Специальность:

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор  
Безбородов Ю. Н.

Красноярск – 2021

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ .....	10
1.1 Теоретические основы процессов старения смазочных масел различного назначения .....	10
1.2 Методы контроля термоокислительной стабильности моторных масел .....	16
1.3 Методы контроля температурной стойкости моторных масел .....	22
1.4 Методы оценки противоизносных свойств смазочных масел различного назначения .....	26
1.5 Выводы по первой главе.....	31
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ .....	32
2.1 Выбор моторных масел для исследования .....	32
2.2 Основные требования к средствам контроля и испытания .....	33
2.2.1 Прибор для термостатирования моторных масел при исследовании термоокислительной стабильности .....	34
2.2.2 Прибор для исследования температурной стойкости моторных масел .....	35
2.2.3 Трехшариковая машина трения .....	36
2.2.4 Фотометрическое устройство .....	38
2.2.5 Малообъемный вискозиметр .....	39
2.3 Методика исследования термоокислительной стабильности моторных масел .....	40
2.4 Методика исследования температурной стойкости моторных масел .....	42
2.5 Методика контроля противоизносных свойств термостатированных моторных масел .....	43
2.6 Методика математической обработки результатов экспериментальных исследований .....	44
2.7 Выводы по второй главе.....	48
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ .....	49
3.1 Результаты испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO Gasoline 10W-40 SL .....	49
3.2 Результаты испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF .....	67
3.3 Результаты испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.....	85

3.4 Анализ результатов исследования моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств ...	101
3.5 Выводы по третьей главе.....	107
4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО КОНТРОЛЮ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ .....	111
4.1 Технология контроля термоокислительной стабильности моторных масел различной базовой основы .....	111
4.2 Технология контроля температурной стойкости моторных масел различной базовой основы .....	112
4.3 Технология контроля триботехнических свойств окисленных и термостатированных моторных масел.....	113
4.4 Технология контроля влияния продуктов окисления и температурной деструкции на вязкостно-температурные характеристики моторных масел.....	114
4.5 Технология определения преобладающего влияния продуктов окисления или температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел.....	115
4.6 Предложения по усовершенствованию существующей системы классификации моторных масел .....	116
4.7 Выводы по четвертой главе .....	117
ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....	118
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	119
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	128
Приложение А.....	129
Приложение Б.....	130
Приложение В.....	134

## ВВЕДЕНИЕ

Моторное масло оказывает существенное влияние на надежность двигателя внутреннего сгорания (ДВС). После достижения предельного состояния моторное масло необходимо заменить на новое. Предельное состояние моторных масел определяется заводами-изготовителями по мото часам или пробегу, но так как не учитываются индивидуальные условия и режимы эксплуатации, техническое состояние двигателя и система доливов, то это не обеспечивает их эффективное использование. Данную проблему можно решить только с помощью организации текущего контроля состояния моторных масел, системы фильтрации, обоснования показателей качества и их предельных значений.

К основным функциям моторных масел относятся уменьшение коэффициента трения, поглощение теплоты, выделяемой при трении и удаление частиц износа. От правильного выбора моторных масел будет зависеть их ресурс. При этом необходимо учитывать степень нагруженности двигателя, которую определяет классификация масел по группам эксплуатационных свойств. Однако единая нормативная база для классификации отсутствует.

Качество моторного масла определяет комплекс его эксплуатационных свойств, к которым относят моюще-диспергирующие, антиокислительные, антикоррозионные, противоизносные и вязкостно-температурные свойства. Введение комплекта полярно-активных присадок позволяет улучшить эти свойства, а именно обеспечивать, повышение температуры работоспособности. Например, температура работоспособности для масел нефтяного происхождения составляет до  $\approx 200$  °С, а синтетических – до 500 °С. Существует стандарт по определению температурной стойкости (ГОСТ 23.221–84), однако его не указывают ни в одном сертификате качества нефтепродуктов.

Следует отметить, что до сих пор не выявлен механизм действия присадок на участках непосредственного контакта микронеровностей. Предполагают, что под действием давлений и высоких температур, возникающих на участках контакта, присадки выступают в роли поставщиков серы, хлора или фосфора, которые на поверхностях трения образуют легкоплавкие сульфиды и хлориды металлов, а также легкоплавкие эвтектики различных фосфидов. Данные расплавленные пленки предотвращают схватывание металлов и, следовательно, возникновение задиров на поверхностях трения. Молекулы органических присадок и легкоплавкие неорганические пленки претерпевают сложные реакции разложения, которые сопровождаются гомолитическим (образование свободных радикалов) и гетеролитическим (образование ионов) разрывом ковалентных химических связей в молекулах, или промежуточные продукты разрыва химических связей присадок могут инициировать различные химические реакции деструкции молекул моторного масла, которые протекают как по радикальному, так и по ионному механизмам. За счет нежелательных побочных процессов снижается качество моторного масла и сокращается срок его службы. Для предотвращения этого процесса необходимо

изменять химическую природу противозадирных и противоизносных присадок таким образом, чтобы в процессе их воздействия и возможного распада при трении не образовывались органические радикалы и катионы, инициирующие при эксплуатации деструкцию масел.

В условиях граничного трения при умеренных температурах формируются слои физически адсорбированных молекул моторного масла, которые слабо связаны с поверхностью твердых тел. При температуре выше 180 °С на поверхностях трения образуются хемосорбционные слои, которые прочно связаны с поверхностью твердых тел и составляет преимущественно из продуктов окисления. Формированию на поверхностях трения химически модифицированных слоев способствует дальнейшее повышение температуры в результате прямых химических реакций поверхностей металла с активированными молекулами присадок.

Температурную стойкость моторных масел определяют приведенные выше механизмы действия присадок, происходящее на поверхностях трения под воздействием температуры. Влияние процессов окисления на свойства моторных масел оценивается (ГОСТ 981-75, ГОСТ 11063-2020, ГОСТ 18136-2017, ГОСТ 20457-75, ГОСТ 20944-75, ГОСТ 23175-78, ГОСТ 23797-79) и многочисленными инструментальными методами, которые позволяют определять термоокислительную стабильность по изменению вязкости, оптических свойств, кислотности, тангенса угла диэлектрических потерь, коррозионной активности, испаряемости, количества отложений и других показателей. Однако влияние этих показателей на триботехнические характеристики окисленных моторных масел изучено недостаточно. Кроме того, при исследовании температурной стойкости и термоокислительной стабильности выявлено, что моторные масла термостатируются. Процессы окисления и температурной деструкции протекают одновременно, но с различной интенсивностью. Доминирующее влияние одного из процессов на физико-химические и противоизносные свойства моторных масел изучено недостаточно, поэтому поиск новых методов контроля направлен на установление количественных показателей преимущественного влияния одного из процессов на физико-химические и противоизносные свойства масел.

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

В связи с этим, современный уровень развития техники и технологий транспортных средств требует применение высокоэффективных моторных масел, производство которых, возможно при наличии новейших технологий,

средств и методов контроля качества, что обосновывает цель и задачи диссертационного исследования.

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

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

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

Для оценки доминирующего влияния продуктов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства масел проведен анализ работ в этой области. Существенный вклад в изучение процессов, протекающих на фрикционном контакте, внесли И. В. Крагельский, Б. И. Костецкий, Р. М. Матвеевский, И. А. Буяновский, Ю. С. Заславский, И. С. Гершман, А.

С. Кужаров, Н.А. Буше, Г.И. Шор, Б.И. Ковальский и др. Однако эти ученые при оценке противоизносных свойств учитывали все процессы, протекающие на фрикционном контакте одновременно. В данной работе противоизносные свойства оценивались при постоянных параметрах трения окисленных и термостатированных масел в диапазоне температур от 170 до 180 °С, что позволило выявить различия во влиянии продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства масел, обосновать общий критерий противоизносных свойств, учитывающий концентрацию продуктов окисления или температурой деструкции на номинальной площади фрикционного контакта, и предложить обобщенный показатель противоизносных свойств (ОППС), учитывающий скорости изменения критериев противоизносных свойств окисленных и термостатированных масел, установить доминирующее влияние продуктов окисления или температурной деструкции на механизм изнашивания.

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

**Задачи исследования:**

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

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

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

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

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

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

**Методы исследования.** Решение поставленных задач осуществлялось с применением анализа методов контроля процессов окисления и температурной деструкции углеводородов и присадок к ним, теории экспериментов,

теории трения, износа и смазки, методов расчета ресурса смазочных материалов, методов контроля оптических, физических и теплотехнических свойств.

При выполнении работы применялись стандартные и специально разработанные средства испытания и контроля, а для обработки результатов экспериментальных исследований – методы математической статистики и регрессионного анализа.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором**, подтверждается теоретически и экспериментально. Научные положения аргументированы. Теоретические результаты и выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями и их математической обработкой, непротиворечивостью данным других авторов, использованием экспериментального оборудования, позволяющего с достаточной точностью осуществлять измерения требуемых параметров, а также стандартных программ для обработки экспериментальных данных с применением современных средств вычислительной техники в соответствии с поставленными задачами.

**На защиту выносятся:**

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

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

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

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

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

**Научная новизна работы:**

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

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

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

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

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

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

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

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, включая 10 работ в издании, рекомендованном перечнем ВАК, и 2 работы в издании, рекомендованном перечнем SCOPUS, получено 4 патента РФ (см. приложения А–Г).

# 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

## 1.1 Теоретические основы процессов старения смазочных масел различного назначения

При эксплуатации двигателей внутреннего сгорания моторные масла подвергаются процессу старения, в результате которого изменяются стандартные показатели качества моторных масел: температура вспышки, вязкость, кислотное число, плотность, оптические свойства, т.е. физическое состояние и химический состав. Чтобы определить и спрогнозировать ресурс моторного масла, необходимо знать механизм процесса старения, математическое описание и обоснованные допустимые значения показателей качества.

Моторное масло при эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания подвергается механическим, термоокислительным, температурным и химическим воздействиям в присутствии контактирующих материалов (металлы, полимеры, вода, воздух, кислоты), многие из которых ускоряют процесс старения моторных масел. Постоянно воздействующим фактором является тепловая энергия, которая определяет статические процессы старения. Механическая энергия возникает при дросселировании, сжатии, разрежении, вибрациях, перемешивании и в граничном слое, разделяющем поверхности трения.

Термоокислительные и температурные воздействия вызывают процессы окисления и температурной деструкции не только базовой основы масла, но и присадок. В результате внешних воздействий происходит комплекс физико-химических изменений, которые можно разделить на 5 группы [1]:

1) *изменения физического характера* – испарение компонентов масла, накопление продуктов изнашивания и коррозии, растворение газов, воды и компонентов эластомеров;

2) *изменение количественного состава присадок* за счет температурной деструкции и образования сорбционных пленок на поверхностях трения;

3) *изменения химического характера* – окисление углеводородов базового масла, реакции гидролиза базового масла и присадок вследствие присутствия воды и водных растворов, реакции ацидолиза при наличии карбоновых кислот, реакции присадок с металлами;

4) *изменения механохимического характера* – участие масла в процессах трения, перемешивания, трибохимических процессах на поверхностях трения, а также стимулирующее влияние механических воздействий на химические реакции;

5) *изменения, вызванные влиянием продуктов неполного сгорания топлива* (оксидов азота, серы, углерода) при работе двигателей внутреннего сгорания.

Процесс окисления протекает многостадийно, поэтому некоторыми авторами [1–6] кислотное число принимается за основной показатель, характеризующий интенсивность окислительных процессов и ресурс работоспособности смазочных масел.

Цепная реакция автоокисления значительно замедляется при наличии в маслах антиокислительных присадок, роль которых сводится к ее прерыванию и превращению активных радикалов и гидроперекисей в стабильные продукты [1].

Математическое описание процесса окисления моторного масла из-за разнообразия химических структур присадок и различия характера их взаимодействия с поверхностью металлов и продуктами окисления связано со значительными трудностями [7; 8]. Принято считать, что большая часть процессов окисления углеводородов относится к химическим реакциям первого порядка, описываемым кинетическим уравнением

$$V_i = k_i c_i, \quad (1.1)$$

где  $k_i$  – константа скорости реакции;

$c_i$  – концентрация вещества.

Решение этого уравнения приводит к зависимости изменения концентрации от времени реакции:

$$c_i = c_{0i} e^{k_i t}. \quad (1.2)$$

Обычно изменения концентрации  $c_i$  компонентов окисления оценивают одним интегральным критерием, например кислотным числом.

Кинетические кривые процесса окисления могут описываться уравнением

$$y = y_0 e^{x^n}, \quad (1.3)$$

где  $y_0$  – начальное значение показателя;

$x = kt$ ;

$n$  – показатель степени ( $n=1$ , иногда  $n=0-2,0$ ).

Время достижения одинаковых величин показателя при разных скоростях реакции  $k$  определяется соотношением  $k_1 t_1 = k_2 t_2$ . Константу скорости процесса окисления  $k$  рассчитывают по уравнению Аррениуса

$$k = A e^{-U/RT}, \quad (1.4)$$

где  $A$  – постоянная, характеризующая частоту столкновений реагирующих молекул, 1/с;

$U$  – энергия активации, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,313 Дж/(моль °С).

Постоянная  $A$  дает представление об индивидуальных особенностях нефтепродукта.

Однако формула (1.4) справедлива при умеренных (докритических) температурах испытания, поэтому при описании процесса старения моторного масла константа скорости химической реакции  $k$  и энергия активации приобретают обобщенный характер, интегрально отражая множество происходящих процессов. При форсировании температурного режима испытания смазочного масла возможно изменение закономерности процесса окисления начиная с некоторого времени  $t_x$ . Это может быть вызвано разложением антиокислительной присадки при высоких температурах или образованием новых соединений, каталитически действующих на процесс окисления. Поэтому ускоренные испытания масел обычно проводят при температуре не выше  $t_x$ , которую устанавливают экспериментально.

Для учета процесса старения и расходования органических присадок на формирование граничных защитных пленок на поверхностях трения используют формулу [1]

$$y = y_1 e^{kt} + \frac{2y_2}{e^{mkt} + e^{-mkt}}, \quad (1.5)$$

где  $y_1$  и  $y_2$  – исходная величина кислотного числа базового масла и присадок соответственно;

$m$  – коэффициент;

$mk$  – константа скорости расходования присадок;

$k$  – константа скорости окисления базового масла.

Принято считать, что закономерности процессов старения моторных масел имеют одинаковый характер [1; 9; 10]. В начале работы двигателя на свежем масле интенсивно возрастает концентрация механических примесей органического и неорганического происхождения, увеличивается кислотное число и одновременно снижается щелочность. По истечении некоторого времени процесс стабилизируется в основном из-за работы фильтров тонкой очистки масла и доливов свежего масла в процессе эксплуатации ДВС [11].

Явление стабилизации не означает прекращения процесса окисления, а характеризует протекание его с меньшей интенсивностью. Так, активизация щелочного запаса может быть описана уравнением первого порядка:

$$x = x_0 e^{-kt}, \quad (1.6)$$

где  $x_0$  – начальная концентрация присадки;

$x$  – текущее значение концентрации присадки.

При отсутствии угара и доливов масла в картер двигателя время срабатывания присадки  $t$  определяется формулой:

$$t = k^{-1} \ln(x_0/x). \quad (1.7)$$

Изменение концентрации присадки в масле с учетом непрерывного угара и долива можно представить в виде выражения для допустимого времени срабатывания присадки:

$$t_{\text{дон}} = \frac{G_m}{k + Q_y} \ln \frac{x_0(k - Q_y) - Q_g x_g}{x_{\text{мин}}(k + Q_y) - Q_g x_g}, \quad (1.8)$$

где  $G_m$  – масса масла;

$Q_y, Q_g$  – скорость, соответственно, угара и долива масла;

$x_g$  – концентрация присадки в доливаемом масле.

Выражение (1.8) справедливо при условии  $x_{\text{мин}} > \frac{Q_g x_g}{k + Q_y}$ .

Авторы [11] предлагают осуществлять доливы маслом, обогащенным присадкой, которая рассчитывается по формуле

$$x_g = x_0(k + Q_y)/Q_y. \quad (1.9)$$

Использование уравнений (1.4), (1.6), (1.9) при расчете параметров в эксплуатации двигателей внутреннего сгорания затруднено из-за необходимости определения скоростей угара и долива, текущей концентрации присадки и скорости ее срабатывания. Более того, если учитывать влияние металлов, доливов и продуктов неполного сгорания топлива на процессы старения моторных масел, то проблема их аналитического описания становится невозможной.

Особое значение при выборе и обосновании критериев оценки качества работающих масел имеют результаты исследования механизмов их загрязнения эксплуатационными примесями, скорость образования которых определяется условиями работы, температурным режимом, техническим состоянием узлов и системы фильтрации двигателя, качеством самого моторного масла и содержанием в нем воды. Под воздействием высоких температур в присутствии кислорода воздуха масла разлагаются, окисляются и полимеризуются. Кроме того, на процесс старения оказывает влияние контактное окисление на поверхностях трения. Механизм окисления минеральных масел исследовался Н. И. Черножуковым и С. Б. Крейном [12–18]. Авторами установлено, что процесс окисления масел происходит по двум направлениям с образованием кислых и нейтральных продуктов [1; 14]. Кислые продукты усиливают коррозию металлов и увеличивают интенсивность коррозионно-

механического изнашивания, а нейтральные – загрязняют масляную систему. При этом, образующиеся при сгорании топлива оксиды серы и азота взаимодействуют с металлами и усиливают нагарообразование. Интенсивность процесса окисления определяется не только качеством масла, но и воспламеняемостью, вязкостью и фракционным составом топлива [19].

Основное влияние на процесс образования нерастворимых примесей оказывают условия работы двигателя, особенно температура, от которой зависит скорость процесса окисления масла. При низких температурах процесс окисления замедляется, однако увеличивается количество отложений на деталях двигателя за счет продуктов неполного сгорания топлива. При повышении температуры хладагента двигателя топливо и вода испаряются, поэтому количество примесей уменьшается, но ускоряется процесс окисления масла.

Смазочные свойства масел также зависят от температуры, особенно при химической модификации поверхностей трения. При этом наблюдается стабилизация коэффициента трения и равновесие скоростей образования и разрушения модифицированных слоев на поверхности трения [8; 20].

На процесс загрязнения масел оказывают влияние различные виды изнашивания. Так, кроме частиц износа в масле накапливаются разнообразные соединения в результате коррозионно-механического изнашивания, причем интенсивность их образования зависит от уровня поляризации зоны трения, что усиливает электролитическую коррозию металлов [21; 22].

В. П. Коваленко подразделяет образующиеся примеси на органические и минеральные, влияние которых на эксплуатационные свойства изучено недостаточно [23]. Известно, что при определенном соотношении они нейтрализуют агрессивные примеси, а в целом увеличивают нагарообразование, засоряют маслопроводящие каналы и очистительные устройства, нарушают температурный режим работы, снижают давление в масляной системе и повышают интенсивность окислительных процессов [23].

Органические загрязнения не оказывают такого влияния на износ деталей, как твердые неорганические частицы. В ряде случаев органические загрязнения уменьшают абразивное изнашивание за счет образования вокруг абразивной частицы оболочек, препятствующих непосредственному ее контакту с поверхностями трения. Неорганические загрязнения влияют на износ коренных и шатунных шеек коленчатого вала, а загрязнения, попадающие в ДВС с воздухом, вызывают износ поршневых колец и гильз цилиндров [23].

На механизм загрязнения масел оказывает влияние и вода. В растворенном виде или в составе эмульсии она вступает в реакции и образует кислоты, щелочи и другие вещества, ухудшающие свойства моторных масел, особенно с присадками. Обводненное масло усиливает коррозию металлов, повышает активность низкомолекулярных кислот и интенсивность процесса окисления самого масла, а также увеличивает коксуемость и снижает производительность системы фильтрации.

В дизельных двигателях основным источником загрязнения являются продукты неполного сгорания топлива (сажа), поэтому дизельные масла имеют иную окраску.

Краткий анализ механизма загрязнения масел показал, что он представляет собой сложный процесс изменения свойств не только базового масла, но и состава и структуры образующихся продуктов и зависит от многих факторов. В связи с этим существует множество методов оценки качества масел и их ресурса, кроме того, возникает необходимость выделения основных эксплуатационных свойств, позволяющих осуществлять периодический контроль за состоянием моторных масел.

Вопрос о сроках службы масел широко исследуется как отечественными, так и зарубежными учеными [24–28], однако единое мнение отсутствует. Для решения этой задачи необходимо найти и обосновать такой критерий эксплуатационных свойств масел, который определялся бы простым, но достоверным методом и коррелировал бы с их противоизносными свойствами и вязкостно-температурными характеристиками.

Одним из важных и малоизученных показателей эксплуатационных свойств смазочных масел является температурная стойкость, характеризующая процессы температурной деструкции базового масла и присадок. Данный показатель определяет температурную область работоспособности и температуру начала деструкции. Он устанавливается по изменению коэффициента трения при температуре испытания [29–31] или в объеме по лаконогаброобразованию [32]. Разработан стандарт определения температурной стойкости смазочных материалов при трении [33].

Для повышения информативности процессов температурной деструкции существует ряд способов [34–38], предусматривающих оценку температурной стойкости по таким параметрам, как вязкость, температура начала деструкции и нагарообразования, коэффициент поглощения светового потока, испаряемость, коэффициент температурной стойкости, разность коэффициентов поглощения светового потока до и после центрифугирования термостатированных масел, а также по противоизносным свойствам.

Таким образом, процессы окисления и температурной деструкции протекают на поверхностях трения, влияют на свойства масел и оцениваются одинаковыми физико-химическими показателями, поэтому действие противоизносных и противозадирных присадок должно определяться температурой. Механизм действия присадок при непосредственном контакте микронеровностей до сих пор не выявлен. Однако полагают, что под действием высокой температуры и давления органические присадки разлагаются, выступая в роли поставщиков атомов хлора, серы и фосфора [39–43], которые образуют на поверхностях легкоплавкие хлориды, сульфиды и эвтектики фосфидов, взаимодействующие с материалами трущихся поверхностей. В этом случае расплавленные пленки соединений покрывают контактирующие неровности и предотвращают схватывание. Если конечный результат действия присадок сводится к образованию легкоплавких органических пленок, то молекулы ор-

ганических присадок претерпевают сложные реакции разложения, которые сопровождаются гетеролитическим (образование ионов) и гомолитическим (образование свободных радикалов) разрывом ковалентных химических связей в молекулах. Промежуточные продукты связей органических молекул присадок могут инициировать различные реакции деструкций базовой основы моторных масел, которые будут протекать по ионному либо радикальному механизму. Эти нежелательные побочные процессы снижают качество смазочного материала и сокращают срок его службы. В этой связи научный и практический интерес представляет определение количественных показателей процессов окисления и температурной деструкции, а также влияния их продуктов на противоизносные свойства и вязкостно-температурные характеристики термостатированных масел, что позволит выявить доминирующее влияние одного из процессов.

## **1.2 Методы контроля термоокислительной стабильности моторных масел**

Термоокислительная стабильность и температурная стойкость смазочных масел являются основными показателями, которые используются при классификации их по группам эксплуатационных свойств. Повышение этих показателей достигается путем выбора базовой основы и введением термостойких присадок. Для определения термоокислительной стабильности и температурной стойкости разработаны стандарты [33; 44–49]. Весьма разнообразны инструментальные методы определения этих показателей, предусматривающие в основном термостатирование масел в объеме либо в тонкой пленке в среде атмосферного воздуха или кислорода. Так, с помощью *метода*, описанного в авторском свидетельстве №113465 [50] термическая стабильность оценивается по лакообразующим свойствам масел и действию на них присадок. Метод реализуется с помощью стандартного лакообразователя.

*Способ определения стабильности растворов присадок к маслам*, представленный в авторском свидетельстве №135692 [51], заключается в измерении их электропроводности, изменяющийся в зависимости от состояния присадок (высаживание присадки, превращение раствора в коллоидный, изменение химического состояния присадки).

*Способ определения свойств моторного масла*, предложенный в авторском свидетельстве №527660 [52], заключается в отборе пробы масла из двигателя, выдерживании ее в присутствии 1–5 мас. % воды или водном растворе электролита при 70–150 °С. Количество выпавшего сухого осадка является показателем стойкости масла к шлакообразованию, а прирост вязкости отобранной пробы масла из двигателя характеризует его термоокислительную стабильность.

*Прибор для оценки термоокислительной стабильности масел* [53] имеет узел предварительного окисления масла в объеме и узел окисления в

тонком слое. Стабильность масла оценивается по изменению его физико-химических и эксплуатационных свойств, испаряемости, а также количеству отложений.

*Устройство для определения термической стабильности смазочных масел*, описанное в авторском свидетельстве №1525576 [32], предусматривает испытание в тонкой пленке путем прокачивания через жиклер. Термическая стабильность определяется по времени закоксовывания жиклера за счет снижения прокачки. Для ускорения процесса окисления в приборе для оценки эксплуатационных свойств моторных масел [54] предусматривается превращения масла в аэрозоль.

Стабильность масел по приросту вязкости и индукционному периоду осадкообразования и испаряемости можно определить на *приборе*, описанном в авторском свидетельстве №1270701 [55].

Для оценки эксплуатационных свойств масел по таким показателям, как температурная область работоспособности, скорость окисления, коррозионная активность, лако- и нагарообразование, разработан *прибор*, на который получен патент №2199114 [56].

Согласно *способу* [57], пробу масла нагревают при атмосферном давлении с перемешиванием, затем определяют термоокислительную стабильность по температуре начала окислительных процессов и скоростям образования растворимых и нерастворимых продуктов окисления, рассчитанных по оптической плотности термостатированного масла.

*Способ определения термоокислительной стабильности товарных смазочных материалов* [58] заключается в том, что пробу масла постоянного объема нагревают до температуры в зависимости от базовой основы и перемешивают с воздухом с помощью механического устройства. Температура масла в процессе испытания поддерживается постоянной ( $\pm 1$  °C). Через равные промежутки времени отбирают пробу термостатированного масла для фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  и вязкости  $\mu$ . Испытание прекращают по достижении коэффициентом  $K_{\Pi}$  значений, приблизительно равных 0,75–0,80 ед. По полученным результатам анализа определяют коэффициент термоокислительной стабильности

$$K_{\text{тоc}} = K_{\Pi} \mu_0 / \mu_{\text{исx}}, \quad (1.10)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока окисленного масла за время испытания;

$\mu_0$  и  $\mu_{\text{исx}}$  – соответственно, вязкость окислительного и исходного смазочного масла, мм<sup>2</sup>/с.

По полученным значениям строят графическую зависимость коэффициента термоокислительной стабильности от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$ , которая имеет два линейных участка с точкой перегиба.

На первом участке при небольших значениях коэффициентов  $K_{\text{тоc}}$  и  $K_{\text{п}}$  происходят процессы окисления с образованием промежуточных продуктов (перекиси углеводов). Второй участок зависимости  $K_{\text{тоc}} = f(K_{\text{п}})$  после точки перегиба характеризуется более интенсивным увеличением коэффициента  $K_{\text{тоc}}$  за счет образования конечных продуктов (гидроперекиси) и более интенсивного увеличения вязкости. В этой связи для оценки термоокислительной стабильности смазочных масел предложено три показателя.

Тангенс угла наклона зависимости  $K_{\text{тоc}} = f(K_{\text{п}})$  к оси абсцисс до точки перегиба определяет скорость образования промежуточных продуктов окисления, а тангенс угла наклона зависимости  $K_{\text{тоc}} = f(K_{\text{п}})$  после точки перегиба – скорость образования конечных продуктов окисления и влияние их на увеличение вязкости испытуемого масла. Значение коэффициента  $K_{\text{п}}$  при продлении зависимости  $K_{\text{тоc}} = f(K_{\text{п}})$  после точки перегиба определяет начало образования конечных продуктов окисления.

Данный метод [58] позволяет усовершенствовать систему классификации смазочных масел по группам эксплуатационных свойств и определить их потенциальный ресурс.

*Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов* [59] заключается в следующем. Пробу исследуемого масла массой 100 г термостатируют в стеклянном стакане, установленном в печи, нагревают до температуры, превышающей температуру начала окисления, затем перемешивают стеклянной мешалкой с помощью электропривода. Температуру испытуемой пробы поддерживают автоматически с точностью  $\pm 1$  °C. Причем применение стеклянного стакана и мешалки исключает влияние металлов на окислительные процессы. Испытания проводят в течение 12 ч, минимум при трех температурах. После 2, 5, 8 и 12 ч отбирают пробы окисленного масла для фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока и испаряемости взвешиванием их до и после испытания за принятые промежутки времени.

По полученным результатам анализа строят графические зависимости коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$  и испаряемости  $G$  от температуры испытания для времени испытания, например, 5 ч. Если для масел с высокой термоокислительной стабильностью при времени испытания 2 или 5 ч коэффициент  $K_{\text{п}}$  равен нулю, то выбирают время 8 или 12 ч.

Зависимости коэффициента  $K_{\text{п}} = f(T)$  имеют линейный характер в области температур, при которых не происходит разложение антиокислительных присадок. Однако при определенной температуре идет разложение и образование новых соединений, каталитически воздействующих на процесс окисления. В этом случае наблюдается изгиб зависимости, и эту температуру принимают за критическую.

Температуру начала окисления смазочного масла устанавливают продолжением зависимостей до пересечения с осью абсцисс, испаряемость смазоч-

ных масел  $G$  – взвешиванием пробы масла до и после испытания. Зависимость испаряемости  $G$  от температуры испытания имеет линейный характер в некотором диапазоне температур, поэтому продление этого участка зависимости до пересечения с осью абсцисс определяет температуру начала испарения.

Данный метод [59] позволяет получить дополнительную информацию о термоокислительной стабильности смазочных масел по таким параметрам, как критическая температура работоспособности, температура начала окисления, температура начала испарения. Он применим при идентификации или установлении группы эксплуатационных свойств.

*Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов* [60] предусматривает испытание пробы масла массой 100 г в термостойком стакане, который помещают в печь и нагревают до температуры, превышающей температуру начала окисления (180 °С), перемешивают стеклянной мешалкой с помощью электропривода. Температура пробы поддерживается автоматически с точностью  $\pm 1$  °С. Испытание проводят в течение постоянного времени, например, 6 ч при температуре 180 °С с дальнейшим ее понижением на 10 °С. После каждого испытания стакан с термостатированным маслом взвешивают с точностью 0,1 г, определяют массу испарившегося продукта, отбирают пробу для фотометрирования и вычисляют коэффициент поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ . Понижение температуры проводят до наступления стабилизации коэффициента  $K_{\text{п}}$ . После наступления стабилизации температуру испытания повышают ступенчато на 10 °С до значения 180 °С и затем ее также повторно понижают. Испытания проводят до получения значения коэффициента поглощения светового потока, равного приблизительно 0,7–0,8 ед.

По результатам испытания определяют:

- скорость окислительных процессов при каждой температуре:

$$V_o = K_{\text{п}}/t; \quad (1.11)$$

- увеличение скорости окисления в зависимости от температуры испытания

$$\Delta V_o = V_{o2} - V_{o1}, \quad (1.12)$$

где  $V_{o2}$  и  $V_{o1}$  – скорость окисления масла при соответствующих температурах,  $\text{ч}^{-1}$ .

Аналогично вычисляют рост испаряемости  $\Delta G$  масла в зависимости от температуры испытания

$$\Delta G = G_2 - G_1, \quad (1.13)$$

где  $G_2$  и  $G_1$  – масса пробы масла после испытания при соответствующих температурах, г.

По результатам испытания строят графические зависимости увеличения скорости окисления от температуры испытания и коэффициента поглощения светового потока  $K_{\Pi}$ , испаряемости от температуры испытания, по которым определяют температурную область работоспособности исследуемого масла. По количеству циклов понижения и повышения температуры испытания судят о потенциальном ресурсе испытываемого масла. Чем он выше, тем больше должна быть группа эксплуатационных свойств моторных масел при их классификации.

*Способ, описанный в патенте №2334976 [61], предусматривает определение однородности состава продуктов окисления и температурной области работоспособности. При этом термостатирование проводят минимум при трех температурах. Для этого пробу масла постоянной массы нагревают до температур, соответствующих базовой основе, назначению и группе эксплуатационных свойств и перемешивают с помощью механической мешалки с кислородом воздуха. Температура и частота вращения мешалки поддерживаются постоянными.*

Через равные промежутки времени отбирают пробу термостатированного масла, фотометрируют, определяют коэффициент поглощения светового потока  $K_{\Pi}$ , вязкость до и после испытания, затем по достижении значений коэффициента  $K_{\Pi}$ , равных 0,75–0,80 ед., испытания прекращают. По значениям вязкости окисленного масла определяют коэффициент относительной вязкости

$$K_{\mu} = \mu_0 / \mu_{исх} , \quad (1.14)$$

где  $\mu_0$  – вязкость окисленного масла, мм<sup>2</sup>/с;

$\mu_{исх}$  – вязкость товарного масла, мм<sup>2</sup>/с.

Определяют показатель термоокислительной стабильности по формуле

$$K_{\text{тоc}} = K_{\Pi} / \Delta\mu . \quad (1.15)$$

Строят графические зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от коэффициента поглощения светового потока по результатам, полученным при трех температурах. Если экспериментальные данные сводятся в одну кривую, то продукты окисления имеют одинаковый состав и оказывают одинаковое влияние на оптические свойства исследуемого масла. В том случае, когда экспериментальные данные не сводятся в одну кривую при одной из температур, данная температура является критической и состав продуктов окисления отличен от состава, образованного при более низких температурах испытания. При этом температурная область работоспособности будет определяться наивысшей температурой, при которой экспе-

риментальные данные будут ложиться на одну кривую зависимости  $K_{\text{тоc}} = f(K_{\text{п}}, T)$ . Этот метод позволяет обосновать предельную температуру испытания исследуемого масла.

*Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов* [62] предусматривает испытание пробы масла постоянной массы при температуре, соответствующей базовой основе и назначению, с перемешиванием механическим устройством. Температура испытания и частота вращения мешалки поддерживаются постоянными. Через равные промежутки времени пробу окисленного масла взвешивают, определяют массу испарившегося масла, отбирают часть пробы для фотометрирования и установливания коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ . Испытания прекращают по достижении коэффициентом  $K_{\text{п}}$  значений, приблизительно равных 0,5–0,6 ед. По полученным данным регистрируют коэффициент испарения  $K_G$  по формуле

$$K_G = m/M, \quad (1.16)$$

где  $m$  – масса испарившегося масла, г;  
 $M$  – масса пробы до испарения, г.

Затем по полученным данным регистрируют энергии превращения  $E_{\text{п}}$  по формуле

$$E_{\text{п}} = K_{\text{п}} + K_G. \quad (1.17)$$

Затем строят графическую зависимость коэффициента энергии превращения  $E_{\text{п}}$  от коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ , продлевают линию зависимости до пересечения с осью координат и по ординате точки определяют величину энергии превращения  $E_{\text{п}}$  (начало окислительного процесса), далее вычисляют коэффициент сопротивления окислению  $K_{\infty}$  из соотношения

$$K_{\infty} = (E_{\text{п}} - A)/K_{\text{п}}, \quad (1.18)$$

где  $A$  – коэффициент начала окислительного процесса.

Коэффициент  $K_{\infty}$  характеризует скорость увеличения энергии превращения  $E_{\text{п}}$ .

*Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов* [63] предусматривает испытание масел в два этапа. На первом этапе масло подвергают термостатированию при температуре 180 °С с перемешиванием. После каждых 8 ч испытания отбирают пробу окисленного масла для фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ . На втором этапе при достижении значений коэффициента

$K_{\text{п}}$ , приблизительно равных 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8 ед., отбирают дополнительно пробу масла для трибологических испытаний на машине трения со схемой трения шар – цилиндр с режимами: время испытания – 2 ч; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; нагрузка – 13 Н. Измеряют средний диаметр пятна износа на шаре. По результатам испытания строят графическую зависимость диаметра пятна износа от коэффициента поглощения светового потока, по которой определяют влияние концентрации продуктов окисления на противоизносные свойства исследуемого масла.

Данный способ [63] позволяет получить дополнительную информацию о термоокислительной стабильности смазочных масел и изменении их противоизносных свойств.

### 1.3 Методы контроля температурной стойкости моторных масел

Одной из основных характеристик сопряжений деталей машин, работающих в условиях граничной смазки, является температурная стойкость масел, характеризующая способность смазочных слоев разделять поверхности при интенсивном тепловом воздействии [31]. Сведения о температурных пределах работоспособности граничных смазочных слоев необходимо иметь как при выборе известных, так и при разработке новых смазочных материалов для использования в различных условиях эксплуатации. *Методика оценки температурной стойкости при граничном трении*, разработанная Р.М. Матвеевским и его учениками [29], широко применяется при оценке смазочных материалов. Для обеспечения работоспособности граничных смазочных слоев во всем диапазоне температур, возможных при трении, важно знать критическую температуру базового масла, а также температуру химической реакции присадок с металлом поверхности. Опишем методику испытаний: смазочный материал испытывался на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) при фиксируемых температурах, которые при каждом последующем испытании повышались на 10 °С, при этом при каждой температуре испытывалась новая проба смазочного материала. В результате исследований был получен ряд данных о величине диаметра пятна износа нижних шаров ЧШМ, силы трения и ее изменения в процессе трения, и по зависимости «коэффициент трения – температура» и «диаметр пятна износа – температура» были установлены критические температуры, при которых происходило разрушение слоя масла, возникал металлический контакт и схватывание стальных поверхностей.

Многие исследования направлены на поиск критериев термоокислительной стабильности и температурной стойкости, которые устанавливают связь между продуктами, образующимися в процессе термостатирования масел. Так, в работе [34] предложен *метод определения температурной стойкости работающих моторных масел с применением фотометрии*. Испыта-

ния проводят при температуре от 140 до 300 °С, увеличивая ее на 20 °С. При каждой температуре испытания работающего масла в течение 3 ч измеряют коэффициент поглощения светового потока  $K_{\Pi}$  и вязкость  $\eta$ , затем термостатированную пробу центрифугируют и повторно фотометрируют для определения концентрации растворимых продуктов старения масла  $K_{\Pi\Pi}$ , вычисляют коэффициент энергетического состояния

$$K_{\varepsilon} = 1 - K_{\Pi} \eta_{\text{T}} / \eta_{\text{исх}} \quad (1.19)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент поглощения светового потока термостатированного масла;

$\eta_{\text{T}}$  – вязкость работавшего масла после термостатирования, мм<sup>2</sup>/с;

$\eta_{\text{исх}}$  – вязкость исходного товарного масла, мм<sup>2</sup>/с.

Данный показатель характеризует процесс деструкции присадок в зависимости от температуры испытания. Далее определяют разность значений коэффициентов поглощения светового потока до и после термостатирования работавшего масла, дающий представление о концентрации нерастворимых продуктов старения масла. Термическую стабильность определяют по зависимостям изменения вязкости, коэффициента энергетического состояния, коэффициента поглощения светового потока, температуры начала нагарообразования, разности коэффициентов поглощения светового потока до и после термостатирования от температуры испытания.

Вязкость изменяется в результате увеличения концентрации продуктов деструкции, а коэффициент энергетического состояния работавшего масла уменьшается с увеличением температуры испытания из-за снижения концентрации присадок. Температура начала нагарообразования зависит от наработки (отработанного ресурса), с увеличением которой она уменьшается.

Разность между значениями коэффициентов поглощения светового потока до и после центрифугирования характеризует изменение концентрации нерастворимых продуктов деструкции после термостатирования.

Предложенный метод позволяет получить дополнительную информацию о состоянии работавшего моторного масла. Так, характер изменения вязкости дает возможность установить температуру начала резкого ее увеличения, что свидетельствует об отсутствии в масле моющих присадок.

Изменение коэффициента энергетического состояния позволяет определить температуру, при которой наступает резкое его уменьшение в результате деструкции присадок.

Температура нагарообразования определяет ресурс, который отработало масло: чем больший ресурс отработало масло, тем при меньшей температуре наступает нагар.

*Способ определения температурной стойкости смазочных масел* [35] предусматривает испытания проб моторных масел массой 50 г в температурном интервале от 140 до 300 °С с увеличением температуры каждой пробы на

20 °С. После испытания смазочного масла при каждой температуре в течение постоянного времени, например 7 ч, пробу взвешивают, определяют массу испарившегося масла как разность массы пробы до и после испытания. Часть пробы фотометрируют и вычисляют коэффициент поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ . По полученным данным регистрируют коэффициенты испарения  $K_{\text{Г}}$  по формуле (1.16) и энергию превращения  $E_{\text{п}}$  по формуле (1.17).

По показателям температурной стойкости строят графические зависимости  $E_{\text{п}}$  от температуры испытания  $T$ , по которым определяют температуры начала и завершения процесса температурной деструкции.

*Способ определения температурной стойкости смазочных масел* [36] предусматривает испытание масел при атмосферном давлении без их перемешивания, что до минимума снижает окислительные процессы и обеспечивает деструкцию базовой основы и присадок.

Пробу масла постоянной массы термостатируют при температуре от 140 до 300 °С, увеличивая ее на 20 °С в течение постоянного времени. При каждой температуре испытывают новую пробу. Часть термостатированной пробы испытывают на трехшариковой машине трения со схемой трения шар – цилиндр. Каждый из трех шаров взаимодействует с цилиндром по индивидуальной дорожке. Причем через одну пару трения пропускают постоянный ток 100 мкА от стабилизированного источника питания 3 В, который через преобразователь подается на компьютер для записи диаграммы изменения сопротивления фрикционного контакта. Параметры трения выбраны постоянными и составляют: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; время испытания – 2 ч.

По диаграммам записи тока, протекающего через фрикционный контакт, определяют продолжительности пластической, упругопластической и упругой деформаций. Продолжительность пластической деформации зависит от механических свойств материалов пары трения и качества термостатированного масла, при этом ток, протекающий через фрикционный контакт, максимальный. С переходом пластической деформации в упругопластическую ток уменьшается до минимального значения, определяющего способность термостатированного масла формировать защитные граничные пленки на поверхностях трения. При упругих деформациях в контакте ток, протекающий через фрикционный контакт, определяется электропроводностью граничных пленок и скоростью их формирования и разрушения, поэтому величина тока колеблется около стабильного значения. Затем вычисляют среднеарифметическое значение коэффициента электропроводности  $K_{\text{э}}$  при упругой деформации

$$K_{\text{э}} = \sum I_{\text{фк}} / I_{\text{э}} n, \quad (1.20)$$

где  $\sum I_{\text{фк}}$  – суммарная величина токов, протекающих через фрикционный контакт на отдельных участках диаграммы записи тока при упругих деформациях;

$I_3$  – заданная величина тока (100 мкА) при статическом положении образцов пары трения;

$n$  – количество участков.

Далее рассматривают суммарную продолжительность пластической, упругопластической и упругой деформаций  $t_c$ , строят графическую зависимость суммарной продолжительности деформаций  $t_c$  от температуры испытания  $T$ , по которой определяют температурную стойкость испытуемого масла.

*Способ определения температурной стойкости смазочных масел* [37] предусматривает термостатирование пробы смазочных масел постоянной массы без доступа воздуха в диапазоне температур от 140 до 300 °С с увеличением на 20 °С в течение постоянного времени, например 7 ч. После каждого 7 ч испытания пробу термостатированного масла взвешивают, вычисляют массу испарившегося масла как разность массы проб до и после термостатирования и коэффициент испарения  $K_G$  как отношение массы испарившегося масла к оставшейся массе. Затем часть пробы фотометрируют и определяют коэффициент поглощения светового потока  $K_{\text{п}}$ , далее рассчитывают коэффициент температурной деструкции

$$K_{\text{т.д.}} = K_{\text{п}} / K_G, \quad (1.21)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент поглощения светового потока термостатированных масел;

$K_G$  – коэффициент испаряемости масла при термостатировании.

По результатам испытания масла при разных температурах строят графические зависимости коэффициента температурной деструкции от температуры испытания, по которым определяют изменение температурной стойкости.

Применение способа позволяет получить более полную информацию о температурной стойкости исследуемого масла, которую можно использовать для идентификации и классификации по группам эксплуатационных свойств.

Необходимо отметить, что температурная стойкость наряду с термоокислительной стабильностью как основные индивидуальные (объемные) свойства смазочного материала недостаточно изучены в области их влияния на противоизносные свойства и процессы, протекающие на фрикционном контакте, интенсивность которых определяет способность работающих масел формировать на поверхностях трения защитные граничные слои, поэтому исследования в этой области являются актуальной проблемой, направленной на установление механизма изнашивания при граничном трении скольжения.

## 1.4 Методы оценки противоизносных свойств смазочных масел различного назначения

Основным назначением смазочных масел в двигателях и механизмах является уменьшение трения и износа трущихся деталей. Существует два различных способа определения параметров смазочных материалов: химико-физический и механико-динамический. *Химико-физический анализ* сконцентрирован на некоторых свойствах смазочных материалах, а при *механико-динамическом анализе* пытаются имитировать воздействие нагрузки, скорости, среды, температуры трения и т.д. [64]. Влияние смазочных масел на трение и износ материалов определяют в лабораторных условиях при испытании на машине трения, образцы которой имеют простую геометрическую форму (шар, цилиндр, ролики и плоские бруски) [65].

В нашей стране показатель износа, характеризующий интенсивность задира и изнашивания поверхностей при нагрузках определенного диапазона, устанавливается по ГОСТ 9490–75. По диаметру пятна износа определяют противоизносные свойства смазочных материалов [66]. Для определения индекса задира испытание следует начинать с нагрузки 196 Н, затем испытания проводят с возрастанием нагрузки в ряде до нагрузки сваривания. После чего индекс задира вычисляют по формуле

$$И_3 = \frac{\sum Q_i}{n}, \quad (1.22)$$

где  $\sum Q_i$  – сумма условных нагрузок по ряду 1 от начальной до ближайшей нагрузки;

$n$  – число определений по ряду 1.

Условную нагрузку  $Q_i$  для каждой осевой нагрузки по ряду 1 рассчитывают по формуле

$$Q_i = P_i \frac{d_{\Gamma i}}{d_{\text{ш}}}, \quad (1.23)$$

где  $P_i$  – осевая нагрузка по ряду 1, Н;

$d_{\Gamma i}$  – диаметр зоны упругой деформации шариков по Герцу при нагрузке  $P_i$ , мм;

$d_{\text{ш}}$  – средний диаметр пятен износа нижних шариков при нагрузке  $P_i$ , мм.

*Четырехшариковая машина трения* (рисунок 1) получила наибольшее распространение [67]. Для испытаний составляют узлы трения из четырех стальных шариков. На горизонтальной плоскости кольцами зажимают три шарика, а четвертый шарик крепят в патроне и помещают сверху относи-

тельно центра, образованного тремя шариками. При этом с определенной силой четвертый шарик прижимают к остальным шарикам. В сосуд, заполненный испытуемым смазочным материалом, помещают данный узел трения и включают электродвигатель, который с заданной скоростью (1 250–1 500 об/мин) вращает патрон с центральным шариком [68].

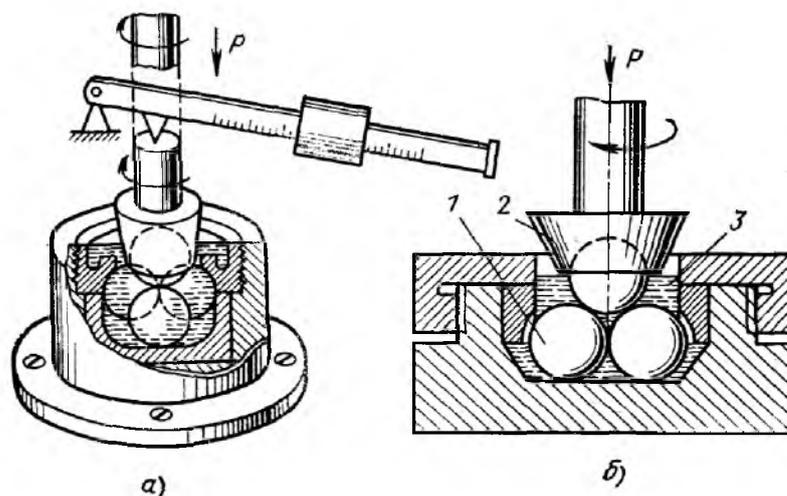


Рисунок 1.1 – Принцип действия четырехшариковой машины трения: *а* – схема нагружения шариковой пирамиды; *б* – схема четырехшариковой обоймы; 1 – неподвижные шарики; 2 – вращающийся шарик; 3 – исследуемое масло

*Способ оценки вида износа поверхностей трения* [69], заключается в следующем, смазанную пару трения эксплуатируют, берут пробу смазочного масла, замеряют площадь пятна износа, по которой устанавливают границы вида изнашивания, и определяют оптическую плотность масла. Для повышения достоверности результатов часть пробы смазочного материала подвергают центрифугированию и определяют оптическую плотность для регистрации нерастворимых примесей в смазочном масле, с учетом которой определяют вид изнашивания и влияние растворимых примесей.

*Способ определения противоизносных свойств смазочных масел* [70], заключается в следующем: смазанную пару трения эксплуатируют при наличии масляной среды, пропуская электрический ток через пару трения, определяют параметры трения, по которому можно оценивать противоизносные свойства смазочных масел. Для снижения трудоемкости процесса, пробы смазочных масел фотометрируют и определяют оптическую плотность, замеряют диаметр пятна износа, в качестве приведенной плотности принимают отношение оптической плотности смазочного масла к площади пятна износа, а отношение коэффициента электропроводимости фрикционного контакта к приведенной плотности примесей масла принимают в качестве параметра вида изнашивания.

*Способ определения смазывающей способности смазочных масел* [71], заключается в определении времени формирования вторичных продуктов. Статическое напряжение снимают с пары трения. Постоянный ток подают на неподвижную пару трения, величину которого выбирают в диапазоне 50–200

мкА. Дальше пары трения разъединяют, смазывают, приводят в относительное движение и нагружают. Измеряют постоянный ток при разной полярности во время установившегося режима трения. Отношение разности токов разной полярности к току неподвижной пары трения определяется смазывающей способностью масел.

Для оценки влияния качества смазочных материалов на износ и задиры кулачков и толкателей при работе автомобильного двигателя на режимах низких температур служит *метод Sequence I* [72]. Этот метод получил широкое распространение в США. Данный метод основан на следующем положении: при низкой температуре охлаждающей жидкости, в масле при работе двигателя без нагрузки в картере в большом количестве конденсируются влага и кислые продукты, содержащиеся в газах. В данных условиях эксплуатации двигателя происходит повышенный износ или задиры толкателей и кулачков. В таких условиях выключают систему вентиляции картера двигателя. Двигатель работает циклично по 10 мин с последующей остановкой в течение 50 мин. Рабочую поверхность кулачков и толкателей оценивают визуально на задиры, а износ определяют по уменьшению максимального диаметра кулачков и максимальной длины толкателя.

За рубежом для определения противозадирных и противоизносных свойств масел применяют *стендовые испытания с использованием транспортных единиц* [73]. Транспортное средство устанавливают на подвижные валы, вращение которых приводит колеса транспортного средства в движение, в климат-камере, создающей нужные условия для испытания. Минимальная температура внутри климат-камеры равна минус 35 °С, а величина производительности воздушного потока доходит до 80 000 м<sup>3</sup>/ч. Данный метод состоит из двух этапов: на первом этапе транспортное средство развивает скорость 50 км/ч и скорость вращения коленчатого вала 2 000 мин<sup>-1</sup>, на втором этапе – 80 км/ч и 3000 мин<sup>-1</sup> соответственно. Продолжительность первого этапа составляет 30 минут, а второго – 1 час. Данный цикл продолжается до тех пор, пока транспортное средство не проедет 312 км. Рабочую поверхность головок цилиндров визуально оценивают на задиры и определяют износ деталей по уменьшению их размеров.

*Метод фрикционного колебания износа* [74] применяют для определения смазывающей способности смазочных материалов, подверженных постоянной нагрузке или колебательным скользящим воздействиям. Данная установка оборудована специальной камерой, куда погружается исследуемый образец (рисунок 1.2). На датчик нагрузки устанавливается исследуемый образец (цилиндр, шар или обойма) и зажимается серводвигателем. Серводвигатель создает колебательную или постоянную нагрузку на образец. Испытания проводятся в течение 120 мин, а после на образце замеряют пятно износа (при постоянной нагрузке) или изменение геометрических размеров (при колебательной нагрузке).

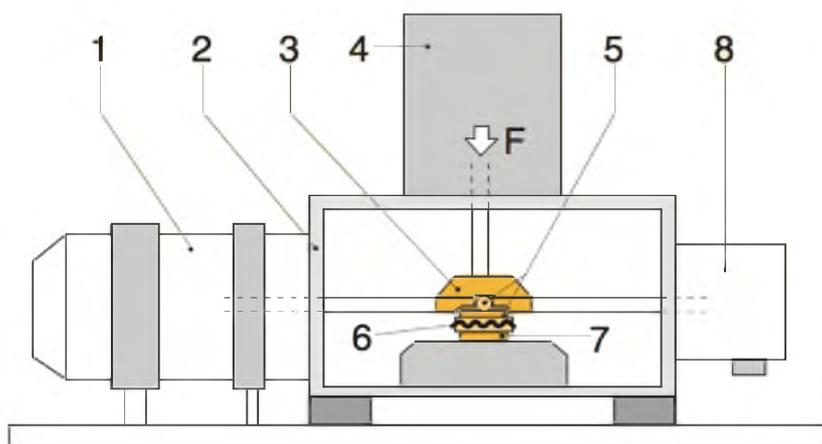


Рисунок 1.2 – Принцип действия метода фрикционного колебания износа: 1 – электрический двигатель; 2 – корпус; 3 – держатель образца; 4 – сервомотор; 5 – тестируемые образцы; 6 – нагреватель; 7 – датчик нагрузки; 8 – датчик расстояния

*Метод для определения противоизносных свойств смазочных материалов при смешанном трении [64].* Установка представляет собой взаимно перпендикулярные валы, на один из которых устанавливается исследуемая обойма подшипника (рисунок 1.3). Нагрузка на обойме постоянная и составляет 300 Н, а скорость вращения ведущего вала достигает  $980 \text{ мин}^{-1}$ . Определение степени износа идет по нескольким параметрам: ширине и глубине дорожки износа, изменению геометрических размеров.

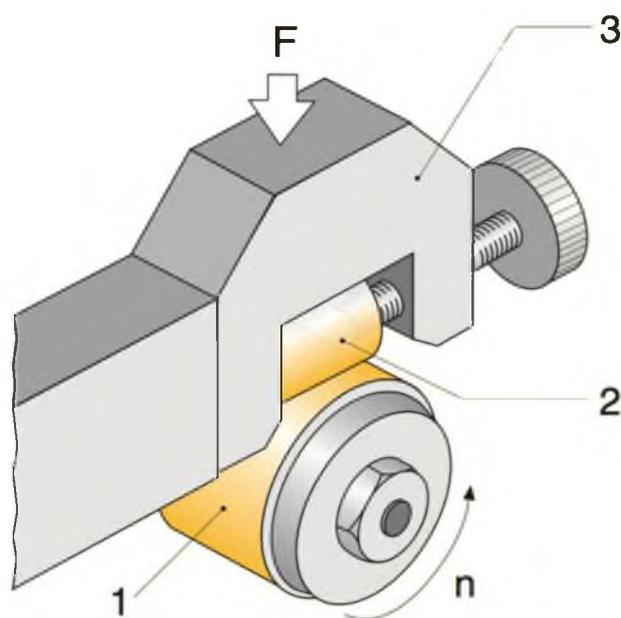


Рисунок 1.3 – Принцип действия метода для определения противоизносных свойств смазочных материалов при смешанном трении: 1 – контактное кольцо; 2 – валик; 3 – коромысло

*Метод Нимана [75]* является основным методом определения противозадирных и противоизносных свойств трансмиссионных масел. При помощи двух цилиндрических зубчатых колес (рисунок 1.4), погруженных в испытуемое масло, определяются его свойства. Зубчатые колеса работают под по-

степенно увеличивающейся нагрузкой, и постоянно измеряется потеря массы колес. Испытание заканчивается или после 12 циклов, или при достижении потери массы 10 мг. Износ определяется или изменением массы в течение 12 циклов, или временем достижения потери массы в 10 мг. Аналогом данного метода является американский тест Риддера [76].

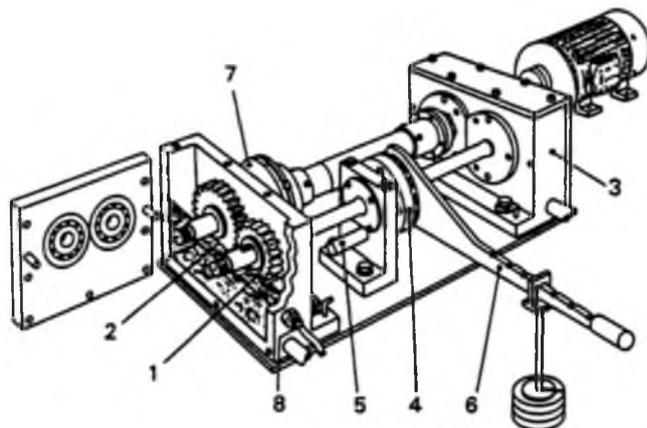


Рисунок 1.4 – Принцип действия метода Нимана: 1 – исследуемая шестерня; 2 – исследуемое колесо; 3 – привод; 4 – вращающейся муфта; 5 – стопорный палец; 6 – рычаг нагрузки; 7 – указатель крутящего момента; 8 датчик температуры

*Методом Тимкена EP* [77] определяются противозадирные свойства смазочных материалов при предельной нагрузке (критической нагрузке задира). Это приложенная нагрузка, которую масляная пленка может выдержать до появления задира на поверхности трения, характеризует нагрузочную способность масла. Схема взаимодействия представляет собой цилиндр-плоскость. Износ определяется путем взвешивания исследуемого образца.

*Метод Фалекса* [78] предназначен для определения смазывающей способности масла в подшипниках. Валик зажимается двумя зажимами для имитации шейки подшипника и прокручивается с постоянной скоростью ( $330 \text{ мин}^{-1}$ ). Данная система погружена в исследуемое масло с заданной постоянной температурой. Измеряют износ и силу трения. По полученным данным определяются противозадирные и антифрикционные характеристики масла.

*Трехшариковая машина трения* [79] предназначена для исследования противоизносных свойств материалов и масел. Преимущество данной машины заключается в том, что контакт каждого из трех шаров с цилиндром происходит по индивидуальной дорожке трения, что позволяет более точно определять интенсивность протекания на контакте механохимических процессов. Трехшариковая машина трения дает возможность получить все необходимые показатели о качестве моторных масел с большей точностью и информативностью при меньшей трудоемкости испытаний.

Ни один из приведенных методов не позволяет установить абсолютные параметры трения и износа или подобрать масло для конкретного применения в двигателях внутреннего сгорания, но дает возможность сравнивать качество используемых присадок в определенных рабочих условиях (малые

скорости скольжения и высокие нагрузки). Изучение смазывающих свойств моторных масел возможно только при проведении испытаний на реальных двигателях [80].

### 1.5 Выводы по первой главе

1. Механизм процессов окисления и температурной деструкции моторных масел описывается уравнением Аррениуса с учетом изменения кислотного числа, но на эксплуатационных предприятиях применяют фотометрический метод с использованием прямого фотометрирования моторных масел. Данный метод позволяет совместно с центрифугированием определить концентрацию общих, растворимых и нерастворимых продуктов окисления и температурной деструкции.

2. В результате проведенного анализа установлено, что продукты окисления и температурной деструкции, образующиеся при термостатировании моторных масел, а также химическое взаимодействие их с материалами пар трения влияют на оптические, вязкостные и коррозионные свойства. Поэтому температура является главным фактором, влияющим на ресурс, а термоокислительная стабильность и температурная стойкость масел могут служить основными показателями качества моторных масел.

3. Анализ современных методов определения термоокислительной стабильности и температурной стойкости смазочных масел показал, что большинство исследований проводились в поиске критериев оценки, за которые приняты вязкость, кислотное число, период осадкообразования и коррозионная стойкость. При этом температурную стойкость масел определяют в процессе трения по коэффициенту трения и параметру износа. Однако более информативный способ оценки изменения качества масел при термостатировании является раздельное исследование влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства для выявления доминирования одного из процессов, что позволит определить основные направления повышения качества смазочных материалов.

## 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ

### 2.1 Выбор моторных масел для исследования

Надежность двигателей внутреннего сгорания во многом определяется правильным выбором моторного масла как ее элемента (детали). Основным функциональным назначением смазочного материала является уменьшение износа, снижение температуры, очистка с поверхностей трения частиц износа, формирование на них граничных защитных адсорбционных, хемосорбционных и модифицированных слоев, повышение нагрузки схватывания. Необходимо отметить, что долговечность смазочного материала как элемента трибосистемы в разы уступает долговечности деталей агрегатов и машин. Кроме того, на любую трибосистему действуют механические, термоокислительные, температурные и химические воздействия, изменяющие свойства смазочного материала за счет образования продуктов окисления и деструкции. Известно [81], что повышение температуры в зоне фрикционного контакта вызывает десорбцию молекул смазочного материала на поверхности трения, температурную деструкцию, вследствие чего изменяются свойства граничных слоев и структура материалов пар трения. В этой связи очевидна необходимость исследования влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства масел различной базовой основы. Поэтому разработка методов и средств контроля за превращениями, происходящими в смазочном материале при изменении температуры, имеет важное значение в изучении процессов окисления и температурной деструкции.

В качестве объекта исследования выбраны моторные масла различной базовой основы (минеральные, частично-синтетические и синтетические), классов вязкости и групп эксплуатационных свойств, от которых зависит надежность двигателей внутреннего сгорания. Как элемент конструкции двигателя моторное масло может длительно и надежно выполнять свои функции, обеспечивая заданный ресурс двигателя, при точном соответствии его свойств термическим, механическим и химическим воздействиям, которым оно подвергается в смазочной системе двигателя на поверхностях трения [82].

Выбранные моторные масла представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Моторные масла для исследования

Базовая основа	Наименование
Минеральное	ZIC HIFLO 10W-40 SL
	M-8Г2
	Utech Navigator 15W-40 SG/CD
	ТНК Супер 10W-40 SL/CF

Окончание таблицы 2.1

Частично-синтетическое	Castrol Magnatec 10W-40 SL/CF
	Mobil Super 2000 10W-40 SJ/SL/CF
	ТНК Супер 5W-40 SL/CF
	Shell Rimula R5E 10W-40 CJ/CG/CF
Синтетическое	ALPHA'S 5W-40 SN
	Mobil Super 3000 5W-40 SJ/SL/CF
	Aqip Tecsint 5W-30 CJ/CF

Все масла рекомендуются к применению в любых климатических условиях согласно классификации SAE. Такой выбор моторных масел позволяет при испытаниях определить влияния базовой основы, класса вязкости и группы эксплуатационных свойств моторных масел на процессы старения, такие как окисления и деструкция.

## 2.2 Основные требования к средствам контроля и испытания

Проведенные ранее исследования в области оценки термоокислительной стабильности и температурной стойкости, полученные результаты и анализ протекающих процессов (см. главу 1) привели к идеи исследования взаимного влияния этих процессов на эксплуатационные свойства моторных масел, так как в системе смазывания ДВС эти процессы протекают одновременно. Постановка такой задачи исследования привела в конечном итоге к созданию метода контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел, схема которого представлена в приложении А, позволившего оценить взаимные процессы, получить результаты и знания в области контроля эксплуатационных свойств моторных масел.

Суть метода заключается в следующем, исследуемые моторные масла проходят входной контроль и определение товарных параметров оптической плотности, вязкости и противоизносных свойств. В дальнейшем они подвергаются параллельным исследованиям на термоокисление и температурную деструкцию с определением показателей эксплуатационных свойств. Более подробное описание методик исследований и контроля представлены в п.2.3–2.5.

Полученные данные подвергались сравнительному анализу с целью определения преобладающего процесса старения. На основе полученных данных производилась оценка браковочных показателей моторных масел и разработка предложений по усовершенствованию существующей системы классификации моторных масел.

При проведении исследований применялись приборы испытания, контроля и измерения, указанные в п. 2.2.1–2.2.5.

## 2.2.1 Прибор для термостатирования моторных масел при исследовании термоокислительной стабильности

Для исследования термоокислительной стабильности моторных масел разработан прибор (рисунок 2.1, таблица 2.1), включающий измерительный блок 1 с органами управления процессом окисления и механический блок 2, обеспечивающий нагрев и перемешивание пробы масла.



Рисунок 2.1 – Общий вид прибора для определения термоокислительной стабильности смазочных масел: 1 – блок измерения и управления; 2 – механический блок

Температура испытуемого масла регистрируется цифровым индикатором, задается дискретно и в процессе испытания поддерживается автоматически с точностью  $\pm 0,5$  °С с помощью терморегулятора ТР-202.

Таблица 2.2 – Техническая характеристика прибора для определения термоокислительной стабильности моторных масел

Параметры	Значения
Напряжение питания, В	$\sim 220 \pm 10$ %
Потребляемая мощность, Вт	$400 \pm 10$ %
Частота вращения мешалки (регулируемая), об/мин	От 0 до $300 \pm 2$
Температурный диапазон, °С	От 50 до 250
Масса испытуемого масла, г	$100,0 \pm 0,1$
Датчик температуры	Хромель – копель
Габариты, мм:	
- высота	$450,0 \pm 5,0$
- длина	$170,0 \pm 5,0$
- ширина	$740,0 \pm 5,0$
Масса, кг	$8,5 \pm 0,5$

Частота вращения мешалки устанавливается дискретно, регистрируется цифровым индикатором и в процессе испытания поддерживается автоматически с точностью  $\pm 2$  об/мин за счет счетчика оборотов и наличия обратной связи с электродвигателем.

### 2.2.2 Прибор для исследования температурной стойкости моторных масел

Метод определения температурной стойкости предусматривает нагрев испытуемого масла в объеме при помощи прибора (рисунок 2.2, таблица 2.3), состоящего из корпуса 1, в который впрессована втулка 2 с образованием полости для хладагента с входным 3 и выходным 4 штуцерами. В нижнем торце корпуса 1 герметично установлен ниппель 5 с накидной гайкой 6, соединяющей стакан 7 для испытуемого смазочного материала. Герметичность соединения стакана 7 и ниппеля 5 обеспечивается конусной поверхностью ниппеля. Температура испытуемого масла измеряется с помощью термопары хромель-копель. Необходимая температура задается дискретно и поддерживается автоматически.

В стакане 7 установлен съемный диффузор 8. Верхний торец корпуса 1 герметично соединен с корпусом холодильника 9, выполненного с конусной поверхностью и полостью для сбора конденсата и стока через патрубок 10. Корпус холодильника имеет входной 11 и выходной 12 штуцера. Причем штуцер 11 соединен с выходным 4 штуцером с помощью шланга 13. Корпус холодильника 9 герметично закрыт крышкой 14 с помощью уплотнений 15 и 16 с образованием полости для хладагента и закреплен болтами 17. Прибор устанавливается в цилиндрическую печь, выполненную в виде корпуса 20 с нагревательным элементом 19 и теплоизоляцией 18. Для измерения температуры испытуемого масла с помощью керамической трубки 21 в стакан введена герметично термопара. Подвод и отвод хладагента производится с помощью шлангов 22.

Таблица 2.3 – Техническая характеристика прибора для определения температурной стойкости моторных масел

Параметры	Значения
Напряжение питания, В	$\sim 220 \pm 10$ %
Потребляемая мощность, Вт	$400 \pm 5$ %
Температурный диапазон тремостатирования, °С	От 50 до 300
Датчик температуры	Хромель-копель
Масса испытуемого масла, г	До 100
Хладагент	Вода
Расход хладагента, л/мин, не менее	0,5
Габариты, мм:	
Высота	$400 \pm 5$
Ширина	$350 \pm 5$
Длина	$150 \pm 5$
Масса прибора, кг	$7,5 \pm 0,1$

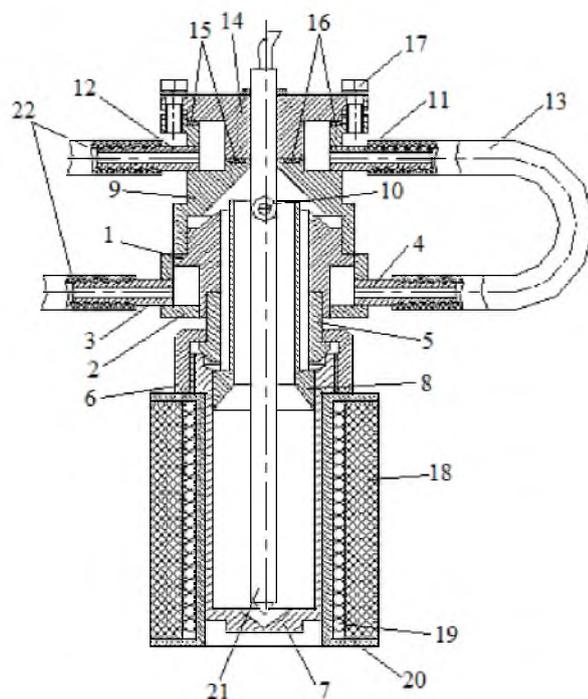


Рисунок 2.2 – Прибор для определения температурной стойкости смазочных материалов: 1, 20 – корпуса; 2 – втулка; 3, 11 – входные штуцеры; 4, 12 – выходные штуцеры; 5 – ниппель; 6 – накидная гайка; 7 – стакан; 8 – диффузор; 9 – холодильник; 10 – патрубок; 13, 22 – шланг; 14 – крышка; 15, 16 – уплотнители; 17 – болты; 18 – теплоизоляция; 19 – нагревательный элемент; 21 – керамическая трубка

Температура термостатирования масла задается дискретно с помощью программы терморегулятора ТР-202 и поддерживается автоматически во время испытания с точностью  $\pm 0,5$  °С.

### 2.2.3 Трехшариковая машина трения

Трехшариковая машина трения используется для исследования влияния продуктов окисления, температурной деструкции и старения на противоизносные свойства смазочных масел. В машине применена схема трения шар-цилиндр, причем отличительной особенностью является контакт трех шаров с поверхностью цилиндра по индивидуальным дорожкам трения [79]. В качестве образцов используются шары диаметром 9,2 мм от шарикоподшипников № 1210 и верхняя обойма роликового подшипника № 30208 диаметром 80 мм, выполненные из стали ШХ15. Все исследованные смазочные масла испытывались при постоянных параметрах: нагрузка – 13 Н; скорость скольжения – 0,68 м/с; температура масла в объеме – 80 °С; время испытания – 2 ч. Общий вид машины трения представлен на рисунке 2.3, а техническая характеристика – в таблице 2.4.

Для исключения влияния свойств материалов образцов и шероховатости поверхностей цилиндр использовался многократно, поэтому после каждого триботехнического испытания он перетачивался абразивной шкуркой различной зернистости (500 и 2 000). Общий вид установки представлен на рисунке 2.4.

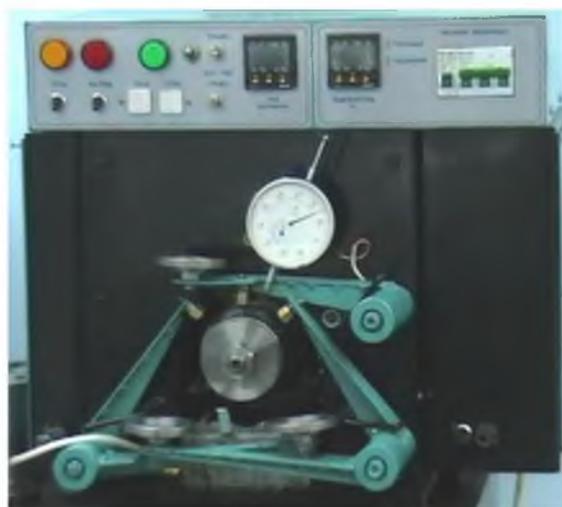


Рисунок 2.3 – Трехшариковая машина трения

Таблица 2.4 – Техническая характеристика трехшариковой машины трения

Параметр	Значение параметра
Напряжение питания, В	$\sim 380 \pm 10 \%$
Потребляемая мощность, Вт	$500 \pm 5 \%$
Тип пары трения	Шар–цилиндр
Диаметр, мм шарика	9,2
цилиндра	80,0
Скорость вращения цилиндра, м/с	0,17–1,02
Нагрузка на шарики, Н	0–40
Ток фрикционного контакта, мкА	0–100
Объем пробы масла, мл	$20 \pm 3$
Температура масла, °С	0–100
Габариты прибора, мм	$500 \times 460 \times 400$
Масса прибора, кг	72

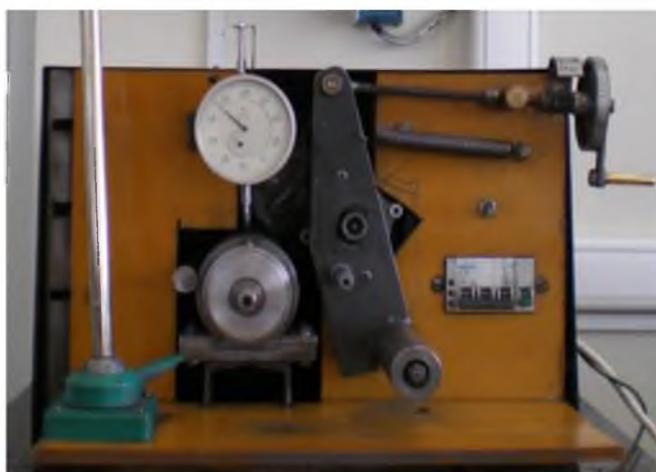


Рисунок 2.4 – Установка для переточки цилиндров

Установка содержит электропривод, редуктор, подшипниковый узел, на котором помещается цилиндр (верхняя обойма роликового подшипника) и

система установки и подвода абразивной ленты. Глубина переточки составляла 30 мкм.

#### 2.2.4 Фотометрическое устройство

Фотометрическое устройство предназначено для прямого фотометрирования смазочных масел при окислении и температурной деструкции, а также отработанных масел для определения состава продуктов старения [83; 84]. Показателем степени окисления и температурной деструкции принята оптическая плотность.

Фотометрическое устройство состоит из фотометрической кюветы 1 и измерительного блока 2 (рисунок 2.5, таблица 2.5). Оптический блок предназначен для прямого фотометрирования масел различной прозрачности, фотометрическая кювета 1 – для создания фотометрирующего слоя масла заданной толщины.



Рисунок 2.5 – Фотометрическое устройство

Таблица 2.5 – Техническая характеристика фотометра

Параметры	Значения
Диапазон измерения, мкА	0–300
Погрешность измерения, %	±2,0
Время одного измерения с учетом вспомогательного, мин	3,0±0,1
Время непосредственного измерения, с	5,0±1,0
Толщина фотометрируемого слоя, мм	0,03; 0,15; 2,0; 8,0
Напряжение питания, В	9 (батарейка «Крона»)
Потребляемая мощность, В·А	0,20±0,01
Время нагрева прибора для нормальной работы, мин	3,0±0,5
Габариты, мм:	
высота	105±1
ширина	225±1
длина	40±1
Масса, кг	1,2±0,1

Прибор пропускает стабилизированный монохроматический световой поток через слой исследуемого масла на фотоприемник. В зависимости от концентрации механических примесей и продуктов окисления масла на фотоприемник падают различные световые потоки, пропорциональные концентрации. Чем больше примесей, тем ниже показания прибора. Браковочные показатели по механическим примесям устанавливаются экспериментально для каждого сорта масла и типа двигателя.

Оптическая плотность рассчитывается по формуле

$$D = \lg \frac{300}{\Pi}, \quad (2.1)$$

где 300 – задаваемый ток фотометра при пустой кювете, мкА;

$\Pi$  – показания фотометра при фотометрировании термостатированных масел, мкА.

### 2.2.5 Малообъемный вискозиметр

Малообъемный вискозиметр (рисунок. 2.6, таблица 2.6) предназначен для измерения вязкости малых объемов нефтепродуктов при температуре от 40 до 100 °С.



Рисунок 2.6 – Малообъемный вискозиметр

Работа прибора заключается в измерении времени погружения шарика в нефтепродукт под собственным весом на определенную глубину при заданной его температуре. Измерительная схема прибора предусматривает за 1 °С до заданной температуры отключение нагревателя и включение с помощью электромагнитной системы коромысла с шариком 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 тем-

пературы электромагнитная система обесточивается и шарик под собственным весом опускается. Время его опускания зависит от вязкости жидкости.

Таблица 2.6 – Техническая характеристика вискозиметра

Параметры	Значения
Напряжение питания, В	~220±10%
Максимальная мощность нагревателя, Вт	42±1,0
Погрешность измерения, %	±2
Объем испытуемого масла, мл	8,5±0,1
Температура измерения вязкости, °С	40–140
Габариты прибора, мм	100x160x260±2
Масса прибора, кг	5,0±0,1

Кинематическая вязкость определяется по формуле

$$\mu = \frac{И-К}{C}, \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – вязкость исследуемой жидкости, мм<sup>2</sup>/с;

И – время опускания измерительного шарика, имп;

К и С – постоянные коэффициенты, зависящие от конструктивных особенностей прибора (диаметр шарика, глубина погружения шарика, диаметр стакана), которые устанавливаются экспериментально.

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

### 2.3 Методика исследования термоокислительной стабильности моторных масел

Методика исследования термоокислительной стабильности моторных масел предусматривала применение следующих средств измерения: прибора для определения термоокислительной стабильности, фотометра, малообъемного вискозиметра и электронных весов. Термоокислительная стабильность оценивалась по изменению оптических свойств, вязкости и испарению.

Пробу масла массой (100,0±0,1 г) заливали в стеклянный стакан прибора для оценки термоокислительной стабильности и термостатировали при температурах 180 и 170 °С с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. После каждых 8 ч испытания стакан с окисленным маслом взвешивался для определения массы испарившегося масла по формуле (1.13):

$$\Delta G = G_2 - G_1,$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – масса пробы моторного масла со стаканом до и после термостатирования, г.

Отбирали часть пробы (2 г) для прямого фотометрирования и определения оптической плотности  $D$  при толщине фотометрируемого слоя 2 мм.

Часть пробы окисленного масла (9 г) использовали для измерения кинематической вязкости при 40 и 100 °С. После измерения указанных показателей окисленные масла сливали в стакан, который повторно взвешивали. Испытания продолжались до достижения оптической плотности  $D$  значений 0,5–0,6.

Изменение кинематической вязкости при термостатировании оценивалось коэффициентом относительной вязкости  $K_\mu$ , определяемым по формуле

$$K_\mu = \frac{\mu_t}{\mu_{исх}},$$

где  $\mu_t$  – вязкость термостатированного масла при окислении или температурной деструкции, мм<sup>2</sup>/с;

$\mu_{исх}$  – вязкость товарного масла, мм<sup>2</sup>/с.

Использование коэффициента относительной вязкости позволяет определять изменения кинематической вязкости по отношению к вязкости товарного масла при его термостатировании.

По данным результатам кинематической вязкости окисленных масел рассчитывали индекс вязкости согласно ГОСТ 25371–97 [85], характеризующий пологость вязкостно-температурной характеристики.

Показатель термоокислительной стабильности  $\Pi_{тоc}$ , определяли по выражению [62]

$$\Pi_{тоc} = D + K_G, \tag{2.3}$$

где  $K_G$  – коэффициент испаряемости, рассчитываемый по формуле (1.16):

$$K_G = \frac{m}{M},$$

где  $m$  – масса испарившегося масла при окислении или температурной деструкции, г;

$M$  – масса пробы масла перед испытаниями за определенное время термостатирования, г.

Показатель термоокислительной стабильности  $\Pi_{тоc}$  характеризует количество тепловой энергии, поглощенной смазочным маслом при термостатировании и образовании определенной концентрации продуктов окисления.

Для сравнения интенсивности процессов окисления и температурной деструкции предложен *параметр приращения скорости этих процессов*  $\Delta V_D$ :

$$\Delta V_D = (D_n - D_{n-1})/t, \quad (2.4)$$

где  $D_n$  и  $D_{n-1}$  – значения оптической плотности масла  $n$ -го и предыдущего измерения;

$t$  – время проведения испытания, ч.

Данная методика апробирована в работах [86–99].

## 2.4 Методика исследования температурной стойкости моторных масел

Методика исследования температурной стойкости моторных масел предусматривала применение следующих средств измерения: прибора для определения температурной стойкости, фотометра, малообъемного вискозиметра и электронных весов. Температурная стойкость оценивалась по изменению оптических свойств, вязкости и испаряемости.

Пробу масла массой  $(100,0 \pm 0,1)$  г заливали в стеклянный стакан прибора для оценки температурной стойкости и термостатировали при температурах 180 и 170 °С без перемешивания при атмосферном давлении с конденсацией паров и отводом конденсата. После каждых 8 ч испытания стакан с термостатированным маслом взвешивали для расчета массы испарившегося масла согласно формуле (1.13).

Отбиралась часть пробы (2 г) для прямого фотометрирования и определения оптической плотности  $D$  по формуле (2.1) при толщине фотометрируемого слоя 2 мм.

Часть пробы термостатированного масла (9 г) использовали для измерения кинематической вязкости при 40 и 100 °С. После измерения указанных показателей термостатированное масло сливали в стакан, который повторно взвешивали. Испытания продолжались до достижения оптической плотности  $D$  значений 0,5–0,6.

Изменение кинематической вязкости при термостатировании оценивалось коэффициентом относительной вязкости  $K_\mu$ .

По результатам измерения кинематической вязкости (при 40 и 100 °С) термостатированных моторных масел рассчитывали индекс вязкости согласно ГОСТ 25371–97 [85].

Температурную стойкость  $\Pi_{TC}$ , определяли по выражению

$$\Pi_{TC} = D + K_G, \quad (2.5)$$

Для сравнения интенсивности процессов окисления и температурной деструкции предложен параметр приращения скорости этих процессов  $\Delta V_D$ , рассчитывали по выражению (2.4).

Данная методика апробирована в работах [86, 87, 89–94, 96–99].

## **2.5 Методика контроля противоизносных свойств термостатированных моторных масел**

В настоящей работе для оценки влияния продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства товарных масел применена трехшариковая машина трения, что позволило определить влияние базовой основы на противоизносные свойства моторных масел, а также сравнить их с результатами испытаний отработанных масел.

Методика контроля противоизносных свойств заключалась в следующем. Пробу термостатированного масла объемом 10 мл заливали в емкость, которую устанавливали в термостат. С помощью программы терморегулятора задавалась температура испытания 80 °С. Цилиндрический образец смачивался испытуемым маслом, а три шара до набора температуры не соприкасались с цилиндром. После набора заданной температуры шары опускались на цилиндр и регистрировалось время начала испытания, после 5 мин прикладывалась нагрузка на каждый шар индивидуально. Параметры трения приняты постоянными и составляли: нагрузка – 10 Н, скорость скольжения – 0,68 м/с, время испытания – 1,5 ч, температура масла в объеме – 80 °С (в процессе испытания поддерживалась автоматически с точностью  $\pm 2$  °С).

После испытания шары с оправкой промывали в бензине и протирали спиртом, затем на микроскопе «Альтами 1 мет» (рисунок 2.7) производили измерения пятен износа по максимальному и минимальному диаметру, определяли средний диаметр пятна износа, а затем среднеарифметическое значение диаметра пятна на трех шарах.



Рисунок 2.7 – Микроскоп электронный «Альтами 1 мет»

Испытания проводили дважды на одном и том же масле. По полученным результатам строили графические зависимости среднеарифметического значения диаметра пятна износа из двух опытов от оптической плотности, по которым сравнивали масла различной базовой основы и отработанные, а также производили поиск критерия противоизносных свойств.

После каждых испытаний ванночку для испытуемого масла промывали бензином и вытирали насухо, а шары проворачивали в оправке для подведения новой поверхности и контролировали изображение на микроскопе, а цилиндр (верхняя обойма роликового подшипника) перетачивали двумя абразивными лентами различной зернистости, затем промывали и устанавливали на машину трения. Данная методика апробирована в работах [86, 87, 89–93, 95–99].

## 2.6 Методика математической обработки результатов экспериментальных исследований

Достоверность показаний прибора для определения температурной стойкости (оптическая плотность, коэффициент относительной вязкости, испарения) оценивалось по сопоставимости результатов четырехкратного испытания одного сорта моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL и рассчитывали абсолютной и относительной погрешностей [100–102]. Использовались программы ЭВМ Advanced Grapher и Excel для вычисления среднего квадратического отклонения, коэффициента корреляции, коэффициента регрессии и средней погрешности аппроксимации (таблица 2.7).

Для оценки величины случайной ошибки результата измерения при  $n$  наблюдениях рассчитывали среднюю квадратичную ошибку по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.6)$$

где  $n$  – число наблюдений;

$\bar{x}$  – среднее арифметическое значение показателя;

$x_i$  – результаты наблюдений.

Среднее значение каждого из показателей определяли как среднее арифметическое из полученных результатов наблюдений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.7)$$

Абсолютную погрешность данного прибора определяли как разность между средним арифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при отдельном наблюдении:

$$\Delta x_i = \left| \bar{x} - x_{\text{от.набл}} \right|. \quad (2.8)$$

Относительная погрешность определяется как отношение средней квадратичной ошибки к среднему арифметическому значению показателей

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} \cdot 100 \%. \quad (2.9)$$

Для характеристики величины случайной ошибки необходимо знать доверительный интервал и величину доверительной вероятности, которая позволяет оценить степень надежности полученного результата. При измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$ , которой соответствует доверительный интервал в долях  $\omega = 2,0$ . Так, для измерений показателей каждого наблюдения при соответствующей температуре испытания доверительный интервал  $\Delta \tau_x$  определяется по формуле

$$\Delta \tau_x = S_n \cdot \omega. \quad (2.10)$$

После статической обработки результатов испытаний полученные данные занесли в таблицу 2.7.

Таким образом, в доверительные интервалы будут укладываться 95 % результатов всех измерений. Значения средней относительной погрешности измерений и средняя погрешность аппроксимации не превышают 15 %.

Статистическая обработка результатов при четырех наблюдениях с указанием доверительного интервала представлена на рисунке 2.8.

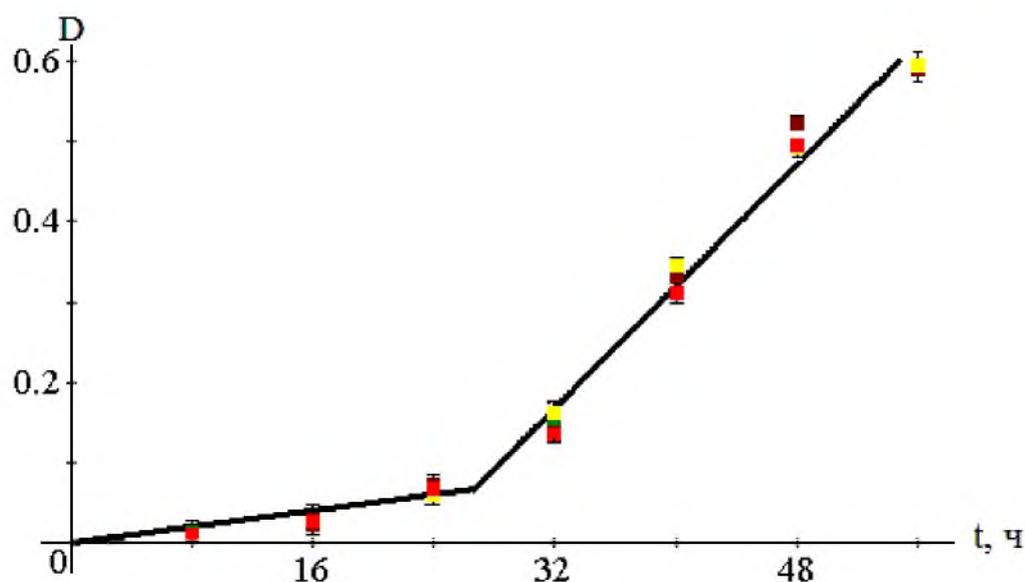


Рисунок 2.8 – Зависимость оптической плотности  $D$  от времени испытания моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Таблица 2.7 – Данные статистической обработки и регрессионного анализа результатов испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Показатель	Время испытания, ч						
	8	16	24	32	40	48	56
<b>Оптическая плотность <math>D</math></b>							
Опыт № 1	0,012	0,024	0,069	0,147	0,337	0,495	0,608
Опыт № 2	0,011	0,023	0,073	0,138	0,331	0,523	0,585
Опыт № 3	0,011	0,028	0,06	0,162	0,346	0,493	0,596
Опыт № 4	0,009	0,027	0,067	0,135	0,31	0,495	0,632
Среднее значение $D \bar{x}$	0,011	0,026	0,067	0,146	0,331	0,502	0,605
Средняя квадратичная погрешность $S_n$	0,0013	0,0024	0,0054	0,0121	0,0153	0,0144	0,0202
Средняя относительная погрешность, %	8	8	6	6	3	2	2
Доверительный интервал $\Delta \tau_x^-$	$\pm 0,003$	$\pm 0,005$	$\pm 0,011$	$\pm 0,024$	$\pm 0,031$	$\pm 0,029$	$\pm 0,040$
Уравнение регрессии	$D = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot t$ $D = 18,963 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,439$						
Коэффициент корреляции	0,998						
Среднее квадратическое отклонение	0,011						
<b>Коэффициент относительной вязкости <math>K_\mu</math></b>							
Опыт № 1	1	1,111	1,103	1,044	1,011	1,044	1,056
Опыт № 2	0,983	1,122	1,099	0,979	0,974	0,979	1
Опыт № 3	1,017	1,089	1,066	0,979	1,021	0,996	0,983
Опыт № 4	1,047	1,055	1,13	1,026	1,043	1,043	1,064
Среднее значение $K_\mu \bar{x}$	1,012	1,094	1,100	1,007	1,012	1,016	1,026
Средняя квадратичная погрешность $S_n$	0,0273	0,0295	0,0262	0,0332	0,0288	0,0331	0,0403
Средняя относительная погрешность, %	2	2	2	3	2	3	3
Доверительный интервал $\Delta \tau_x^-$	$\pm 0,055$	$\pm 0,059$	$\pm 0,052$	$\pm 0,066$	$\pm 0,058$	$\pm 0,066$	$\pm 0,081$
Уравнение регрессии	$K_\mu = 8,08 \cdot 10^{-10} \cdot t^6 - 1,621 \cdot 10^{-7} \cdot t^5 + 1,236 \cdot 10^{-5} \cdot t^4 -$ $-4,36 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 0,007 \cdot t^2 - 0,031 \cdot t + 1,001$						
Коэффициент корреляции	0,967						
Среднее квадратическое отклонение	0,011						
<b>Испаряемость <math>G</math></b>							
Время испытания, ч	8	16	24	32	40	48	56
Опыт № 1	0,8	0,5	0,9	0,5	0,3	0,4	0,4
Опыт № 2	0,6	0,5	0,7	0,6	0,3	0,5	0,4
Опыт № 3	0,8	0,4	0,6	0,4	0,4	0,6	0,5
Опыт № 4	1	0,5	0,6	0,5	0,3	0,5	0,5
Среднее значение $G \bar{x}$	0,800	0,475	0,700	0,500	0,325	0,500	0,450
Средняя квадратичная погрешность $S_n$	0,1633	0,0500	0,1414	0,0816	0,0500	0,0816	0,0577
Средняя относительная погрешность, %	13	8	14	10	12	10	11
Доверительный интервал $\Delta \tau_x^-$	$\pm 0,327$	$\pm 0,100$	$\pm 0,283$	$\pm 0,163$	$\pm 0,100$	$\pm 0,163$	$\pm 0,115$
Уравнение регрессии	$G = 0,06 \cdot t + 0,429$						
Коэффициент корреляции	0,997						
Среднее квадратическое отклонение	0,092						

Достоверность результатов измерения вязкости оценивалась при десятикратном испытании одного сорта масла. Среднее значение вязкости определяли как среднее арифметическое из полученных результатов. По формулам (2.6)–(2.9) рассчитывали среднее значение вязкости вискозиметра, сред-

ную квадратичную ошибку, среднюю относительную погрешность, а устанавливали доверительный интервал  $\Delta\tau_x$  по формуле (2.10). Полученные результаты представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Данные статистической обработки результатов кинематической вязкости испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции при 180 °С

Показатель	Время испытания, ч						
	8	16	24	32	40	48	56
<i>Кинематическая вязкость при 100°С, <math>\mu_{100}</math>, мм<sup>2</sup>/с</i>							
Опыт № 1	11,43	12,70	12,19	11,94	11,94	11,81	12,06
Опыт № 2	11,53	12,70	11,99	12,04	11,94	11,71	11,86
Опыт № 3	11,73	12,50	12,09	11,94	12,14	11,51	12,06
Опыт № 4	11,63	12,30	11,89	11,74	12,04	11,61	11,96
Опыт № 5	11,73	12,30	11,69	11,94	11,84	11,51	12,16
Опыт № 6	11,63	12,40	11,79	11,94	11,84	11,31	12,26
Опыт № 7	11,83	12,40	11,59	11,74	11,64	11,21	12,16
Опыт № 8	11,63	12,30	11,39	11,94	11,64	11,41	12,06
Опыт № 9	11,53	12,50	11,59	12,04	11,54	11,21	12,06
Опыт № 10	11,33	12,50	11,79	12,24	11,34	11,41	12,16
Среднее значение $\mu_{100} \bar{x}$	11,6	12,46	11,8	11,95	11,79	11,47	12,08
Средняя квадратичная погрешность $S_n$	0,149	0,151	0,247	0,145	0,246	0,201	0,114
Средняя относительная погрешность, %	1	1	2	1	2	1	1
Доверительный интервал $\Delta\tau_x$	±0,299	±0,301	±0,494	±0,290	±0,492	±0,402	±0,227
<i>Кинематическая вязкость при 40°С, <math>\mu_{40}</math>, мм<sup>2</sup>/с</i>							
Опыт № 1	100,57	101,71	103,24	101,21	101,21	103,11	101,59
Опыт № 2	99,67	101,71	102,64	102,31	100,81	104,41	102,99
Опыт № 3	99,37	102,11	102,94	103,21	100,71	103,61	104,09
Опыт № 4	98,27	102,11	103,14	103,31	101,11	104,11	103,79
Опыт № 5	96,97	103,61	102,54	104,01	100,21	102,91	103,09
Опыт № 6	96,17	104,91	102,14	105,41	98,91	102,21	102,19
Опыт № 7	95,97	105,41	102,94	106,41	100,01	100,81	102,09
Опыт № 8	94,57	104,61	103,24	107,81	99,31	100,51	103,29
Опыт № 9	93,77	104,11	104,74	108,71	100,01	99,61	102,99
Опыт № 10	94,07	103,01	105,74	109,61	100,11	99,21	102,39
Среднее значение $\mu_{40} \bar{x}$	96,94	103,33	103,33	105,20	100,24	102,05	102,85
Средняя квадратичная погрешность $S_n$	2,444	1,393	1,089	2,854	0,745	1,888	0,783
Средняя относительная погрешность, %	2	1	1	2	1	2	1
Доверительный интервал $\Delta\tau_x$	±4,887	±2,787	±2,178	±5,708	±1,491	±3,775	±1,567

Таким образом, в доверительные интервалы будут укладываться 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 2 %.

Достоверность результатов измерения диаметра пятна износа оценивалась при четырехкратном испытании одного сорта масла. Среднее значение диаметра пятна износа определяли как среднее арифметическое из полученных результатов. По формулам (2.6)–(2.9) рассчитывали среднее значение износа, среднюю квадратичную ошибку, среднюю относительную по-

грешность, а устанавливали доверительный интервал  $\Delta\tau_x$  по формуле (2.10).

Полученные результаты представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Данные статистической обработки результатов триботехнических испытаний минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции при 180 °С

Показатель	Износ $U$ , мм, определенный при исследовании			
	Опыт № 1	0,241	0,244	0,263
Опыт № 2	0,233	0,262	0,264	0,253
Опыт № 3	0,252	0,236	0,265	0,248
Опыт № 4	0,231	0,251	0,273	0,257
Среднее значение $\mu_{100, \bar{x}}$	0,239	0,248	0,266	0,255
Средняя квадратичная погрешность, $S_n$	0,0095	0,011	0,0046	0,0052
Средняя относительная погрешность, %	3	3	1	2
Доверительный интервал $\Delta\tau_x$	$\pm 0,019$	$\pm 0,022$	$\pm 0,009$	$\pm 0,010$

Таким образом, в доверительные интервалы будут укладываться 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 3 %.

## 2.7 Выводы по второй главе

1. Разработан метод контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел, который предусматривает применение следующих средств измерения: приборов для определения температурной стойкости и термоокислительной стабильности, фотометрирующие устройство, малообъемного вискозиметра, трехшариковой машины трения и весов. Данный метод позволяет получить информацию об изменении свойств моторных масел при термостатировании, определить преобладающее влияние продуктов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства и вязкостно-температурные характеристики моторных масел.

2. Определены погрешности средств измерения, согласно которым принято решение о проведении двукратных испытаний одного и того же моторного масла, что даст возможность обеспечить достаточную точность полученных результатов.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ

#### 3.1 Результаты испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO Gasoline 10W-40 SL

Процессы самоорганизации в трибосистеме определяются сопротивлением ее элементов температурным, механическим и химическим воздействиям [20, 103–106]. Влияние смазочного материала на создание на поверхностях трения защитных слоев является основным для снижения изнашивания. Это связано с тем, что смазочный материал не может неограниченно поглощать тепловую энергию, выделяемую при трении, поэтому избыток ее поглощается образующимися продуктами окисления, испарения, деструкции и химическими соединениями с металлическими поверхностями. Следовательно, параметры процессов самоорганизации могут применяться для определения качества смазочных материалов, их идентификации и классификации по группам эксплуатационных свойств. В этой связи разработка методов и средств контроля состояния смазочного материала в период эксплуатации техники является актуальной задачей, а определение влияния температурных условий имеет научное и практическое значение.

Целью настоящих исследований является оценка влияния продуктов термоокисления и температурной деструкции моторных масел различных базовых основ, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств на их вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства. Методика и параметры испытания описаны в п. 2.3–2.5.

На рисунке 3.1 представлены зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания 180 (а) и 170 °С (б). Согласно данным рисунка 3.1, а, в начальный период испытания в течение 10 ч интенсивность процессов окисления и температурной деструкции одинакова, увеличение времени испытания от 10 до 48 ч вызывает незначительное понижение интенсивности процессов температурной деструкции (кривая 1) по сравнению с процессами окисления, что объясняется отсутствием перемешивания масла при термостатировании. Однако после 48 ч испытания интенсивность процессов температурной деструкции превышает процессы окисления.

Согласно данным (рисунок 3.1 б) в начальный период испытания в течение 18 ч интенсивность процессов окисления и температурной деструкции одинакова, увеличение времени испытания от 18 до 65 ч вызывает незначительное понижение интенсивности процессов температурной деструкции (кривая 1) по сравнению с процессами окисления, что объясняется отсутствием перемешивания масла при термостатировании. Однако после 65 ч испытания интенсивность процессов температурной деструкции превышает интенсивность процессов окисления.

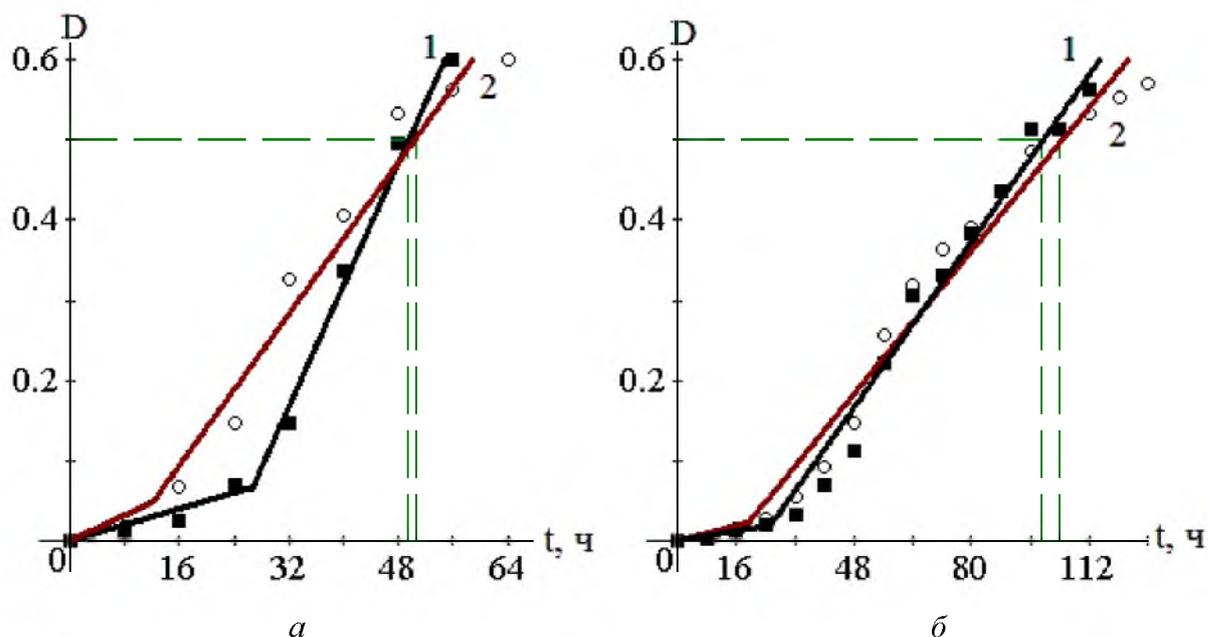


Рисунок 3.1 – Зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Зависимости оптической плотности от времени испытания для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL (рисунок 3.1) имеют изгиб, что свидетельствует об образовании двух видов продуктов старения различной энергоёмкости.

Принято, что первый участок зависимости  $D = f(t)$  характеризует процесс образования начальных (растворимых) продуктов старения, а второй – гелеобразных продуктов, которые были установлены при центрифугировании термостатированных масел. Поэтому образование гелеобразных продуктов старения вызывает изгиб зависимостей  $D = f(t)$ . При этом чем выше сопротивляемость масла термостатированию, тем при больших значениях времени и оптической плотности  $D$  происходит изгиб зависимостей  $D = f(t)$ .

В целом масло ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 180 °С выдержало 56 ч и достигло значения оптической плотности  $D_{\text{д}} = 0,6$  ед., а при окисления 180 °С выдержало 60 ч и достигло значения оптической плотности  $D_{\text{ок}} = 0,6$  ед. При температурной деструкции 170 °С выдержало 112 ч и достигло значения оптической плотности  $D_{\text{д}} = 0,563$  ед., а при температуре окисления 170 °С выдержало 128 ч и достигло значение оптической плотности  $D_{\text{ок}} = 0,569$  ед.

Регрессионные уравнения зависимости  $D = f(t)$  для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL представлены в таблице 3.1.

Одним из параметров, характеризующих качество минеральных масел, является потенциальный ресурс  $P_{\text{п}}$ , который определяется временем их термостатирования до значения  $D = 0,5$  ед. (рисунок 3.2). Показано, что незави-

симо от температуры испытания масло ZIC HIFLO 10W-40 SL обладает большим потенциальным ресурсом при процессах окисления.

Таблица 3.1 – Регрессионные уравнения зависимости оптической плотности и времени испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Процесс термостатирования	Участок	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление при 180 °С	Первый (t < 13 ч)	$D_{\text{ОК}} = 0,40 \cdot 10^{-2} \cdot t$	0,996
	Второй (t > 13 ч)	$D_{\text{ОК}} = 11,79 \cdot 10^{-3} \cdot t + 94,78 \cdot 10^{-3}$	0,989
Температурная деструкция при 180 °С	Первый (t < 26 ч)	$D_{\text{Д}} = 2,50 \cdot 10^{-3} \cdot t$	0,988
	Второй (t > 26 ч)	$D_{\text{Д}} = 18,96 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,44$	0,997
Окисление при 170 °С	Первый (t < 19 ч)	$D_{\text{ОК}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot t$	0,995
	Второй (t > 19 ч)	$D_{\text{ОК}} = 5,59 \cdot 10^{-3} \cdot t - 86,07 \cdot 10^{-3}$	0,997
Температурная деструкция при 170 °С	Первый (t < 25 ч)	$D_{\text{Д}} = 7,50 \cdot 10^{-4} \cdot t$	0,976
	Второй (t > 25 ч)	$D_{\text{Д}} = 6,49 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,14$	0,997

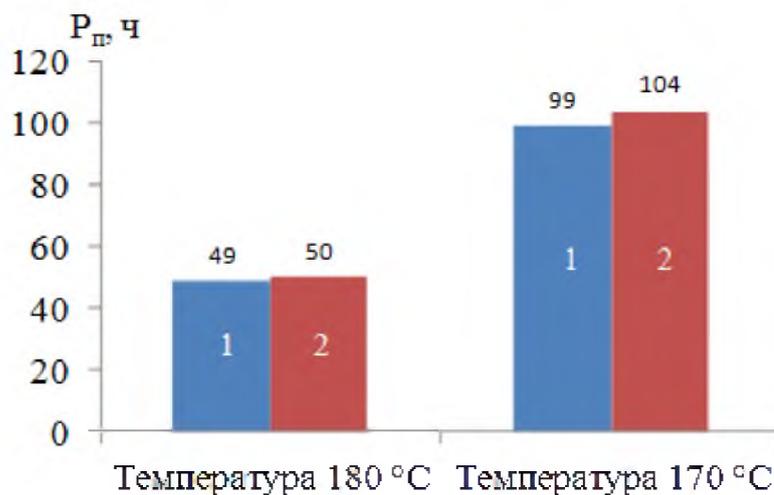


Рисунок 3.2 – Гистограмма потенциального ресурса минерального моторного масла при температурной деструкции 1 и при окислении 2, определенного при значении  $D = 0,5$  ед.

Вязкость минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL оценивалась коэффициентом относительной вязкости  $K_{\mu}$ , определяемым отношением вязкости термостатированного масла к вязкости товарного, зависимость которого от времени испытания представлена на рисунке 3.3.

Установлено (рисунок 3.3, а), что вязкость моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL за 16 ч испытания при температурной деструкции 180 °С (кривая 1) увеличилась на 10 %, а при окислении 180 °С – на 16 % (кривая 2). После 16 ч при окислении вязкость значительно не изменилась, а при температурной деструкции снизилась на 4 %. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.3, б) наблюдалось следующее: при температурной деструкции (кривая

1) к 40 ч испытаний вязкость выросла на 10 %, а после снизилась на 2 %; при окислении (кривая 2) за 16 ч вязкость увеличилась на 16 %, но затем уменьшилась на 4 %.

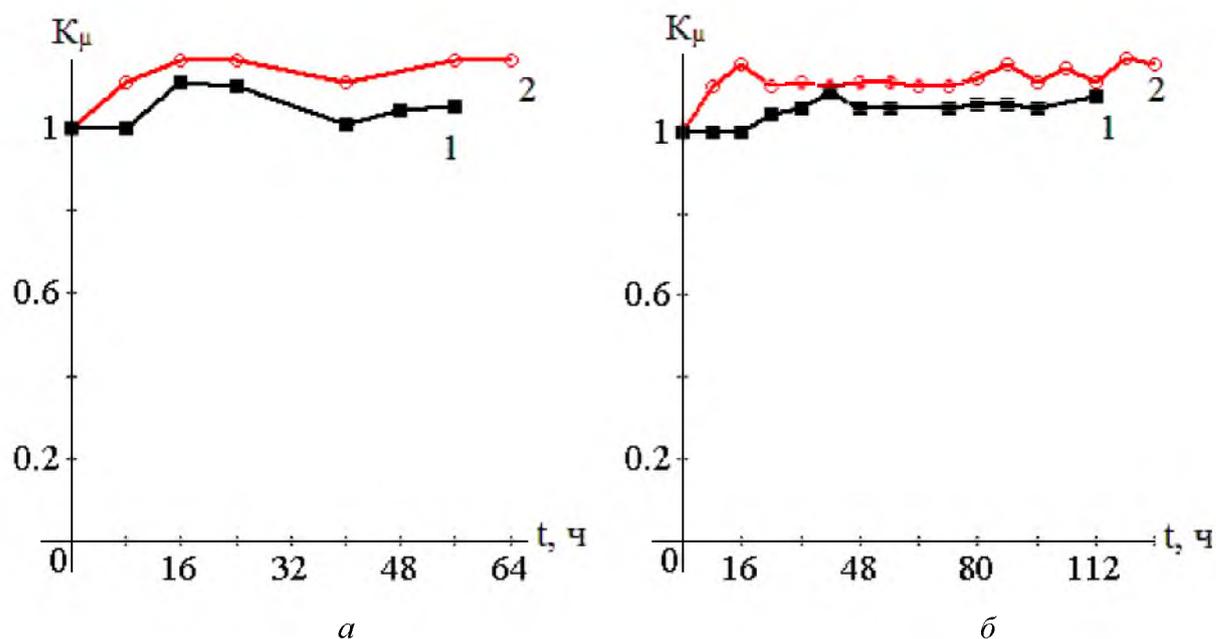


Рисунок 3.3 – Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Отличительной особенностью изменения кинематической вязкости при окислении и температурной деструкции является то, что в начальный период термостатирования минерального масла она повышается независимо от температуры при окислении, а при деструкции она стабильна, что подтверждает тот факт, что в период окисления образуются продукты, увеличивающие вязкость масла, а продукты температурной деструкции в начальный период термостатирования не образуются.

На рисунке 3.4 представлены зависимости испаряемости от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL.

Испаряемость масла значительно уменьшается при процессах температурной деструкции независимо от температуры испытания. Так, за 56 ч испытания при температуре 180 °С (рисунок 3.4, а) испаряемость составила при окислении 12,1 г (кривая 2), а при температурной деструкции 3,8 г (кривая 1). Это объясняется тем, что при температурной деструкции масло не перемешивалось и контакт с кислородом воздуха практически отсутствовал. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.4, б) за 112 ч испаряемость составила при окислении 10,8 г (кривая 2), а при температурной деструкции 4,3 г (кривая 1).

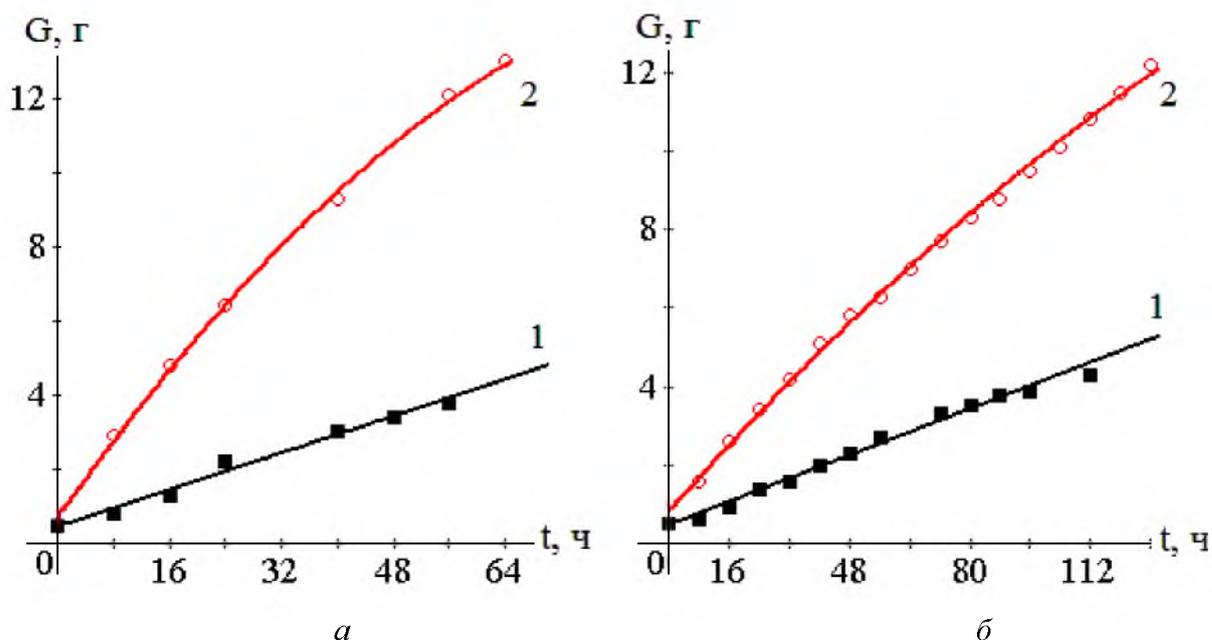


Рисунок 3.4 – Зависимости испаряемости от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: *a* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Регрессионные уравнения зависимостей  $G = f(t)$  для минерального моторного масла описываются полиномом второго порядка для процессов окисления и уравнением первого – при температуре испытания 180 °С для процессов температурной деструкции:

$$G_{\text{ок}} = -0,0012 \cdot t^2 + 0,268 \cdot t + 0,665 \quad (\text{кривая } 2), \quad (3.1)$$

$$G_{\text{д}} = 0,062 \cdot t + 0,452 \quad (\text{кривая } 1) \quad (3.2)$$

Коэффициент корреляции  $\approx 0,987$ .

При температуре испытания 170 °С:

$$G_{\text{ок}} = -1,619 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,108 \cdot t + 0,799 \quad (\text{кривая } 2), \quad (3.3)$$

$$G_{\text{д}} = 0,037 \cdot t + 0,474 \quad (\text{кривая } 1) \quad (3.4)$$

Коэффициент корреляции  $\approx 0,988$ .

По данным рисунков 3.1–3.4 видно, что при термостатировании минерального моторного масла изменяются оптические свойства, вязкость и испаряемость, поэтому в качестве показателя термоокислительной стабильности и температурной стойкости выбрана сумма оптической плотности и коэффициента испаряемости. Вязкость не является показателем термоокислительной стабильности и температурной стойкости, поскольку она зависит от оптических свойств продуктов старения, их концентрации и массы испарив-

шегося масла при термостатировании. Показатели термоокислительной стабильности  $\Pi_{\text{ТОС}}$  и температурной стойкости  $\Pi_{\text{ТС}}$  определяются по формуле

$$\Pi_{\text{ТС(ТОС)}} = D + K_G \quad (3.5)$$

где  $K_G$  – коэффициент испаряемости.

Показатели термоокислительной стабильности и температурной стойкости являются безразмерными и характеризуют количество тепловой энергии, поглощенной продуктами термостатирования и испарения. Зависимости показателей термоокислительной стабильности и температурной стойкости от времени и температуры испытания представлены на рисунке 3.5.

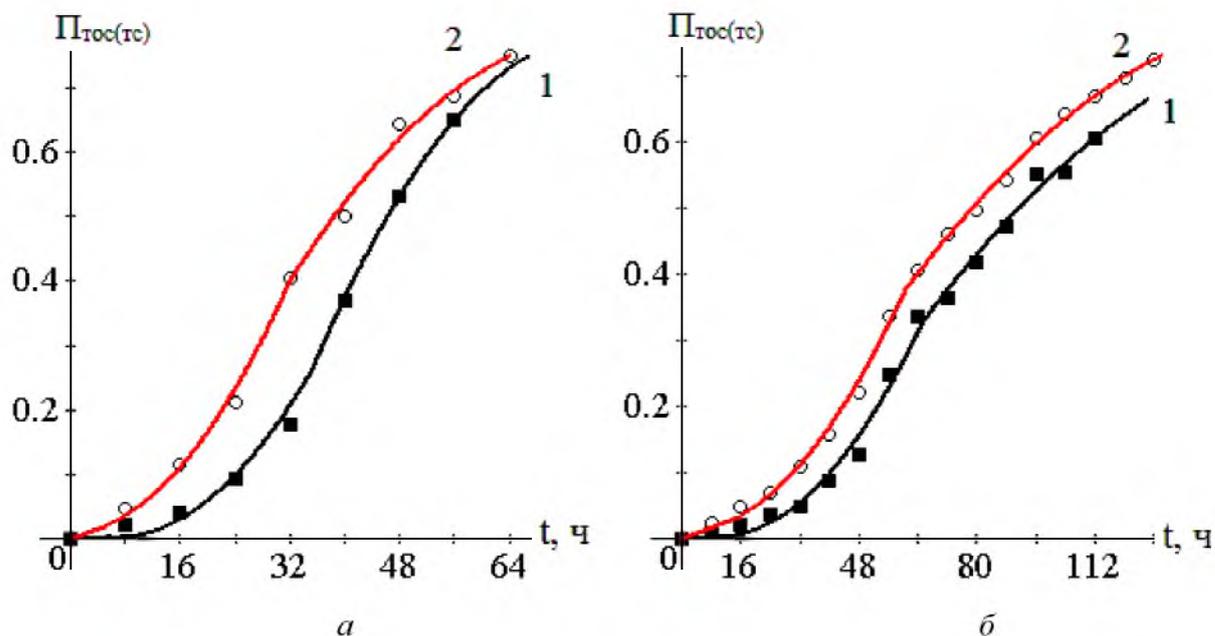


Рисунок 3.5 – Зависимости показателей температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Данные зависимости также имеют изгиб, подтверждающий образование в процессе окисления двух видов продуктов различной оптической плотности [1; 107].

Регрессионные уравнения зависимости  $\Pi_{\text{ТС(ТОС)}} = f(t)$  для масла ZIC HIFLO 10W-40 SL представлены в таблице 3.2.

Показатели термоокислительной стабильности и температурной стойкости характеризуют процесс термостатирования как сброс избыточной тепловой энергии по двум каналам: изменению оптических свойств и испаряемости испытуемого масла, что вызывает перераспределение тепловой энергии между продуктами термостатирования и испарения.

Таблица 3.2 – Регрессионные уравнения зависимостей показателей температурной стойкости и термоокислительной стабильности от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL

Показатель	Участок	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Термоокислительная стабильность при 180 °С	Первый (t < 32ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = 3,594 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,007$	0,997
	Второй (t > 32ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = -1,819 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,028 \cdot t - 0,323$	0,998
Температурная стойкость при 180 °С	Первый (t < 36ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 3,125 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,004 \cdot t + 0,014$	0,989
	Второй (t > 36ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = -3,008 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,046 \cdot t - 0,993$	0,999
Термоокислительная стабильность при 170 °С	Первый (t < 62ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = 1,013 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 1,466 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,011$	0,994
	Второй (t > 62ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = -3,356 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,012 \cdot t - 0,2$	0,998
Температурная стойкость при 170 °С	Первый (t < 66ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,002 \cdot t + 0,013$	0,979
	Второй (t > 66ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = -3,144 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,012 \cdot t - 0,293$	0,992

Для подтверждения наличия явления перераспределения избыточной тепловой энергии рассмотрим зависимости приращений скоростей изменения оптической плотности  $\Delta V_D$  (рисунок 3.6) и испаряемости  $\Delta V_G$  (рисунок 3.7) от времени и температуры испытания минерального моторного масла. Данные зависимости представляют ломаные линии, т. е. скорости изменения оптической плотности и испаряемости не постоянны из-за процессов перераспределения тепловой энергии между продуктами термостатирования и испарения [104; 106]. При увеличении скорости термостатирования  $\Delta V_D$  происходит уменьшение скорости испаряемости  $\Delta V_G$ .

Согласно данным (рисунка 3.6) установлена общая тенденция увеличения приращений скоростей процессов окисления и температурной деструкции в начальный период термостатирования (первый участок), однако интенсивность процессов окисления (кривая 2) выше, чем процессов температурной деструкции. Такое увеличение приращения скоростей вызвано ростом концентрации продуктов окисления и деструкции в масле.

Вторые участки зависимостей  $\Delta V_D$  от времени испытания характеризуются значительными колебаниями приращения скоростей как процессов окисления, так и деструкции, что объясняется образованием продуктов этих процессов с большей энергоемкостью. В этот период времени испытания исследуемого масла первичные продукты, образующиеся в начальный период, концентрация которых непрерывно росла, переходят в более энергоемкие, требующие больше тепловой энергии для их образования, а так как выделяемая тепловая энергия постоянна, то время образования энергоемких продуктов увеличивается, вызывая уменьшение приращения скорости процессов окисления и температурной деструкции. Переход первичных продуктов окисления в энергоемкие при температуре 180 °С наступает после 32 ч испытания, а первичных продуктов деструкции в энергоемкие после 40 ч. Переход

первичных продуктов окисления и деструкции в энергоемкие при температуре испытания 170 °С наступает после 56 ч испытания. Установлено, что с увеличением температуры испытания возрастает скорость как процессов окисления, так и температурной деструкции.

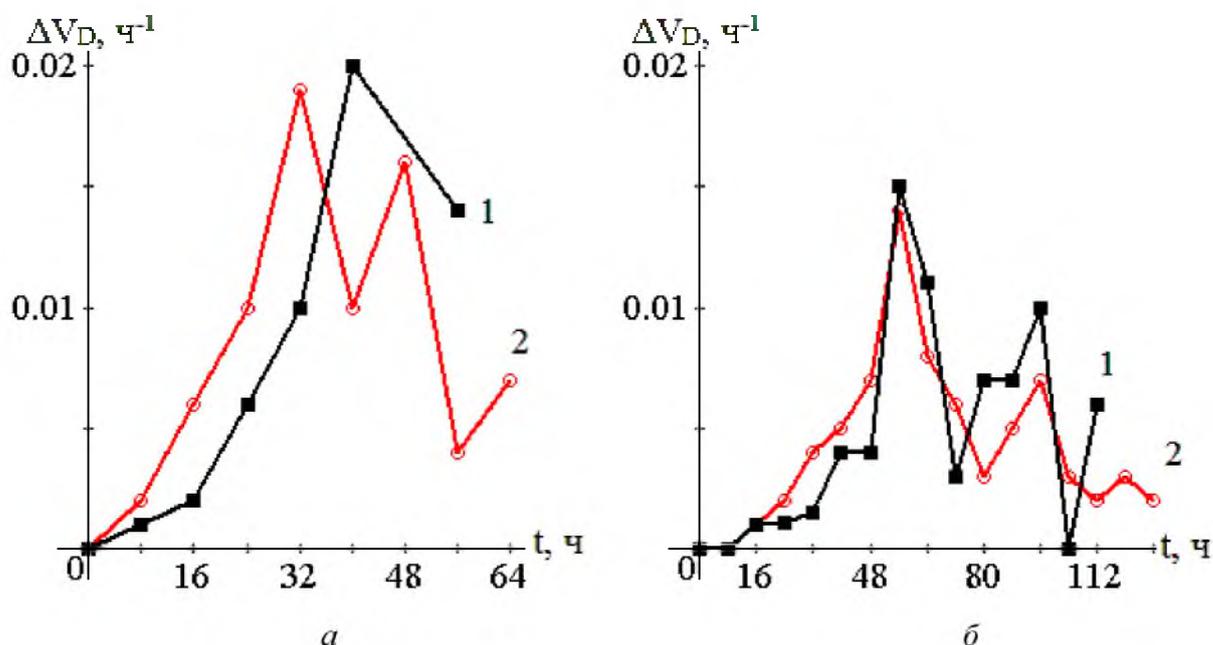


Рисунок 3.6 – Зависимости приращения скоростей температурной деструкции 1 и окисления 2 от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Согласно данным рисунка 3.7 установлена общая тенденция уменьшения приращений скоростей испаряемости при окислении и температурной деструкции, однако интенсивность процессов окисления (кривая 2) выше, чем процессов температурной деструкции. Такое уменьшение приращения скоростей испаряемости вызвано ростом концентрации продуктов окисления и деструкции в масле. Скорость испаряемости масла значительно ниже при процессах температурной деструкции (кривая 1) независимо от температуры испытания, но при окислении (кривая 2) скорость испаряемости уменьшается более интенсивно, чем при температурной деструкции. Так, за 56 ч испытания при температуре 180 °С (рисунок 3.7, а) скорость испаряемости снизилась при окислении (кривая 2) на 0,21 (59 %), а при температурной деструкции (кривая 1) на 0,05 (50 %). При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.7, б) за 112 ч скорость испаряемости снизилась при окислении (кривая 2) на 0,11 (56 %), а при температурной деструкции (кривая 1) на 0,05 (66 %). Установлено, что с повышением температуры испытания увеличивается скорость испаряемости, как процессов окисления, так и температурной деструкции.

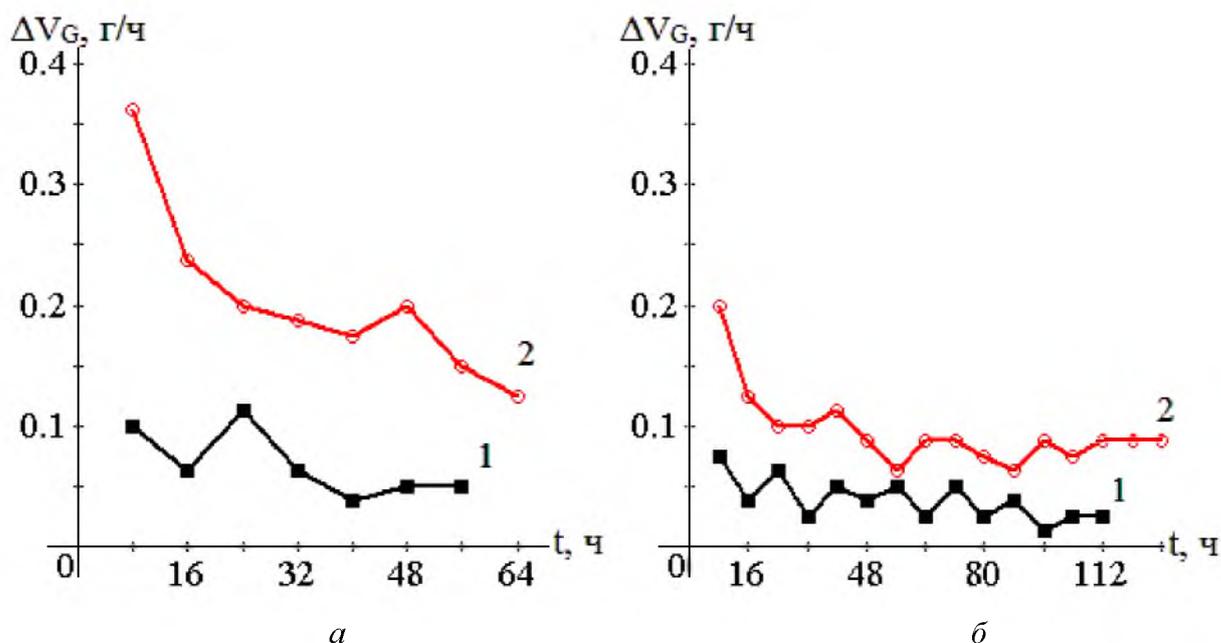


Рисунок 3.7 – Зависимости приращения скоростей испаряемости при температурной деструкции 1 и окисления 2 от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Перераспределение избыточной тепловой энергии при переходе начальных продуктов термостатирования в более энергоемкие наблюдается при уменьшении скорости термостатирования. Данный процесс является периодическим: вначале образуются менее энергоемкие продукты, а при достижении определенной концентрации часть переходит в более энергоемкие. Этот процесс характеризуется колебаниями концентраций продуктов термостатирования и периодическими увеличениями концентраций энергоемких продуктов термостатирования. Для оценки интенсивности процессов самоорганизации предложен коэффициент самоорганизации  $K_C$ , определяемый выражением [103]

$$K_C = \Delta V_D / \Delta V_G, \Gamma^{-1}, \quad (3.6)$$

где  $\Delta V_D$  и  $\Delta V_G$  – приращения скорости изменения оптической плотности и испаряемости соответственно.

Зависимости коэффициента самоорганизации (риунок 3.8) представляют ломаные кривые, подтверждающие наличие перераспределения тепловой энергии. Установлено, что интенсивность коэффициента самоорганизации при температурной деструкции выше, чем при процессах окисления, независимо от температуры испытания.

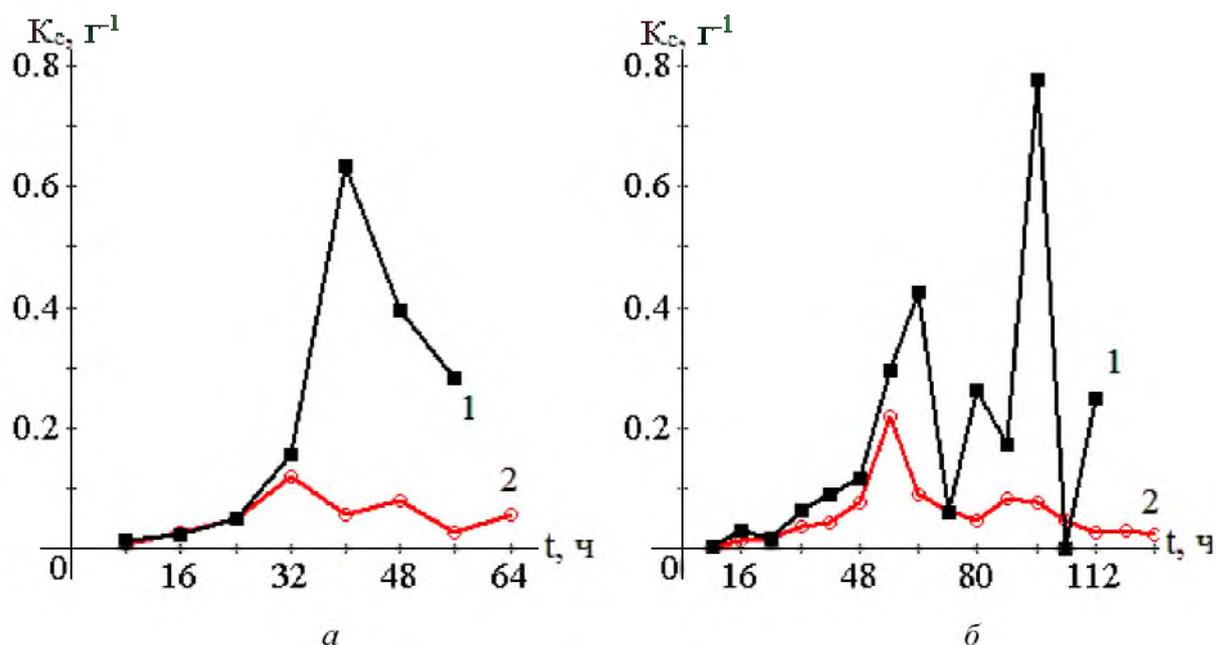


Рисунок 3.8 – Зависимости коэффициента самоорганизации от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Одним из важных эксплуатационных свойств масла – кинематическая вязкость, которая не является величиной постоянной, она изменяется с изменением температуры и концентрации продуктов окисления, температурной деструкции и других механических примесей, а также индекс вязкости – безразмерный показатель пологости вязкостно-температурной характеристики, рассчитываемый по значениям кинематической вязкости масла, измеренной при температурах 40 и 100 °С (ГОСТ 25371–82). Чем выше индекс вязкости, тем более пологая вязкостно-температурная характеристика [108]. Данные по изменению индекса вязкости ИВ от времени и температуры испытания представлены на рисунке 3.9.

Установлено (рисунок 3.9, а), что индекс вязкости минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL за 16 ч испытания ( $T=180$  °С) увеличился на 7 % при окислении (кривая 2), а при температурной деструкции (кривая 1) снизился на 3 % за 48 ч. После 16 ч испытания при окислении индекс вязкости значительно не изменился, а при температурной деструкции увеличился на 5 % после 48 ч испытания. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.9, б) индекс вязкости при температурной деструкции колеблется в пределах  $\pm 3$  %. При окислении (кривая 2) за 48 ч индекс вязкости практически не изменился, а затем увеличился на 8 %.

В работе предложены альтернативные критерии термоокислительной стабильности и температурной стойкости, учитывающие индекс вязкости и определяемые по выражениям:

- для термоокислительной стабильности

$$K_{\text{ТОС}} = \text{ИВ}_{\text{ОК}} \cdot D_{\text{ОК}}, \quad (3.7)$$

температурной стойкости

$$K_{\text{ТС}} = \text{ИВ}_{\text{Д}} \cdot D_{\text{Д}}, \quad (3.8)$$

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

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

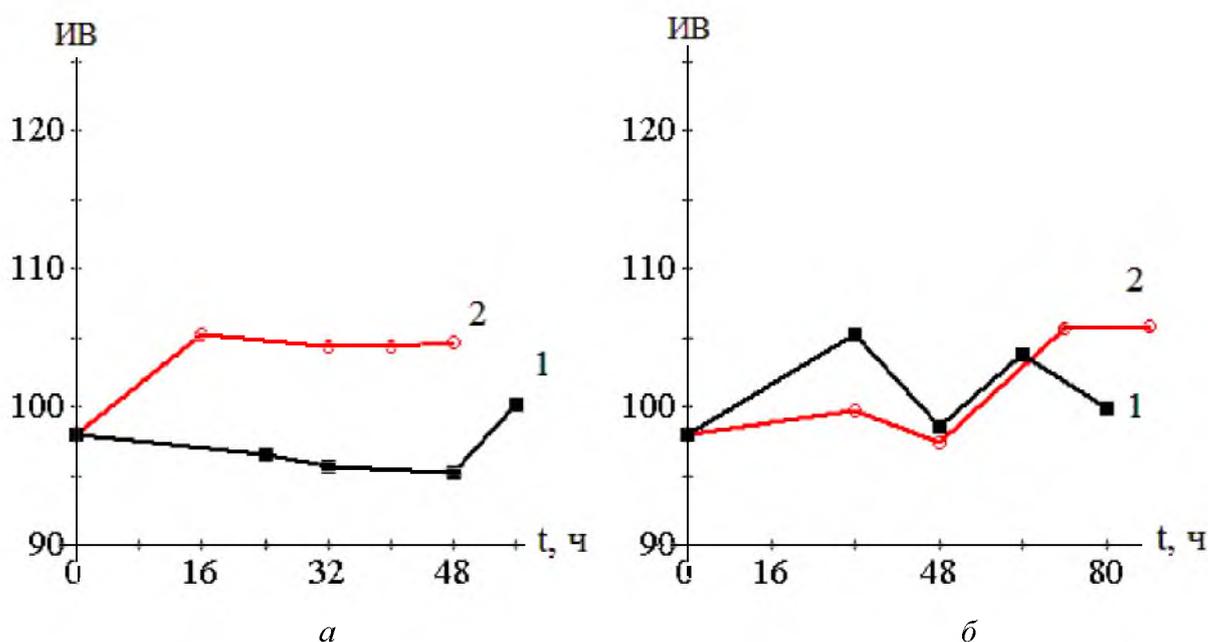


Рисунок 3.9 – Зависимости индекса вязкости от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Зависимости критериев термоокислительной стабильности и температурной стойкости от оптической плотности представлены на рисунке 3.10. Данные зависимости  $K_{\text{ТС(ТОС)}} = f(D)$  описываются линейными уравнениями и представлены в таблице 3.3:

$$K_{\text{ТС(ТОС)}} = \alpha_{\text{ТС(ТОС)}} D, \quad (3.9)$$

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

Согласно данным (рисунок 3.10) критерии термоокислительной стабильности выше, чем критерии температурной стойкости, на 5 % независимо от температуры испытания.

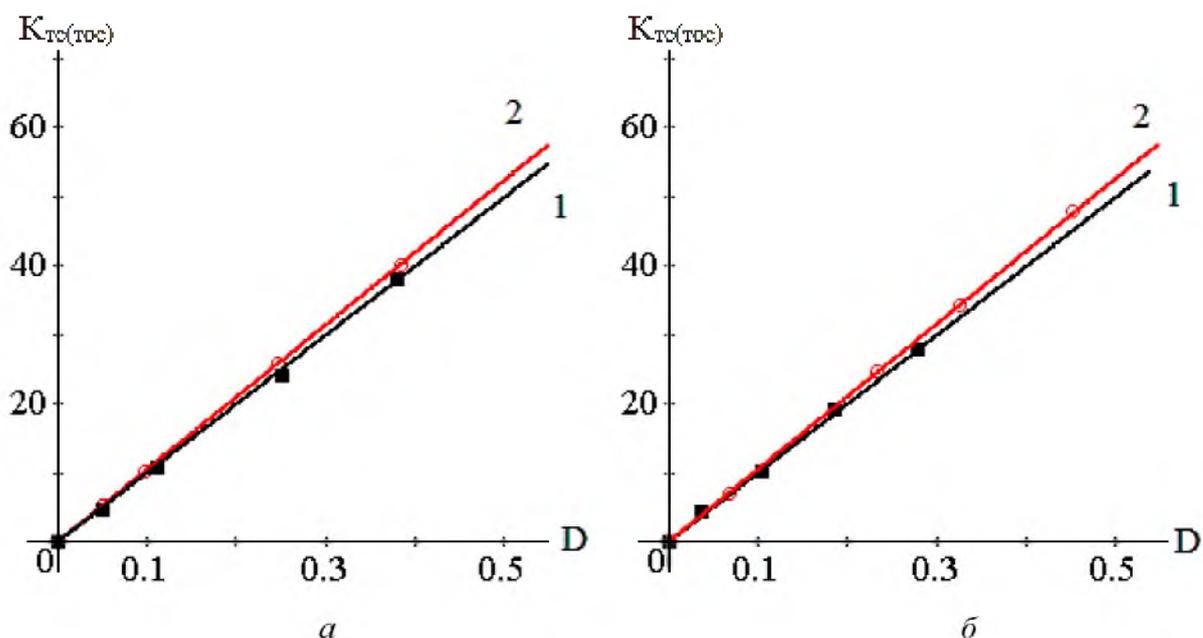


Рисунок 3.10 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от времени и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL: *a* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Таблица 3.3 – Результаты регрессионного анализа зависимостей альтернативных критериев от оптической плотности минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Температура испытания, °С	Процесс термостатирования	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
170	Окисление	$K_{\text{ТОС}} = 105,017 \cdot D$	0,999
	Температурная деструкция	$K_{\text{ТС}} = 99,55 \cdot D$	0,999
180	Окисление	$K_{\text{ТОС}} = 104,568 \cdot D$	0,999
	Температурная деструкция	$K_{\text{ТС}} = 99,589 \cdot D$	0,999

Для выявления преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции на свойства минерального моторного масла предложен коэффициент доминирующего влияния  $K_{\text{ДВ}}$ , определяемый отношением скоростей изменения критерия температурной стойкости к критерию термоокислительной стабильности

$$K_{\text{ДВ}} = \frac{\alpha_{\text{ТС}}}{\alpha_{\text{ТОС}}}, \quad (3.10)$$

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

Результаты вычисления доминирующего влияния одного из процессов представлены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты вычисления коэффициента доминирующего влияния минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Температура испытания, °С	Значение $K_{дв}$
170	0,948
180	0,952

Если значение коэффициента  $K_{дв}$  ниже 1, то преобладают процессы термоокислительной стабильности, а если больше 1, то процессы температурной стойкости. Согласно данным таблицы 3.4, с повышением температуры испытания коэффициент  $K_{дв}$  увеличивается для минерального моторного масла. Кроме того, установлено, что продукты температурной деструкции уменьшают вязкостно-температурные характеристики минеральных масел.

Важным показателем эксплуатационных свойств моторных масел являются противоизносные свойства, определяющие надежность трибосистем. Влияние продуктов термостатирования на противоизносные свойства оценивалось по методике, описанной в п. 2.5 [109; 110]. Зависимости диаметра пятна износа от оптической плотности и температуры испытания представлены на рисунке 3.11.

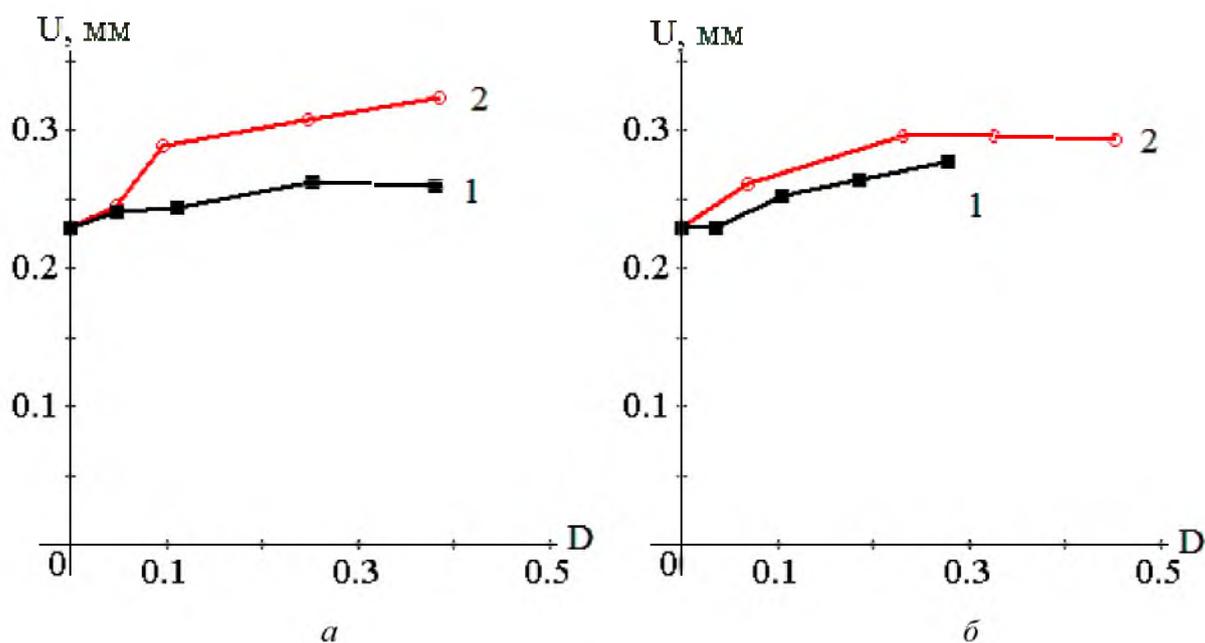


Рисунок 3.11 – Зависимости диаметра пятна износа от оптической плотности и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Установлена общая закономерность изменения противоизносных свойств исследуемого моторного масла от увеличения концентрации продуктов термостатирования, выраженная оптической плотностью  $D$ . Она заключается в том, что независимо от температуры или процесса термостатирования противоизносные свойства понижаются. При температурной деструкции

(кривая 1) противоизносные свойства снижаются на 12 % при температуре испытания 180 °С и на 15 % при 170 °С. При окислении (кривая 2) идет резкое понижение противоизносных свойств в начальный период времени независимо от температуры испытания, а затем незначительное понижение или стабилизация ( $T=170$  °С). Период времени понижения и повышения противоизносных свойств зависит от соотношения состава растворимых и гелеобразных продуктов старения. Улучшение противоизносных свойств в течение испытания объясняется тем, что продукты старения адсорбируются на поверхностях трения во впадинах, создавая гидравлические «подушки» и тем самым уменьшая износ. Поэтому концентрация продуктов старения на номинальной площади фрикционного контакта может служить критерием противоизносных свойств.

В работе для упрощения расчета в качестве критерия противоизносных свойств предложено выражение

$$P_{\text{ПС}} = \frac{D}{U}, \text{ мм}^{-1}, \quad (3.11)$$

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

Данный критерий характеризует концентрацию продуктов окисления или температурной деструкции на номинальной площади фрикционного контакта. На рисунке 3.12 представлены зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности.

Установлено, что данные зависимости описываются линейными уравнениями

$$P_{\text{ПС}} = \alpha_{\text{ПТС(ПТОС)}} D, \quad (3.12)$$

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

Регрессионные уравнения зависимостей критерия противоизносных свойств от оптической плотности представлены в таблице 3.5.

Согласно данным (таблица 3.5) противоизносные свойства при температурной деструкции превышают противоизносные свойства окисленных масел в 1,07 раза при температуре 170 °С и в 1,2 раза при 180 °С.

Для определения доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства был предложен *обобщенный показатель противоизносных свойств* термостатированных масел, вычисляемый по формуле

$$\text{ОППС} = \frac{\alpha_{\text{ПТС}}}{\alpha_{\text{ПТОС}}}, \quad (3.13)$$

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

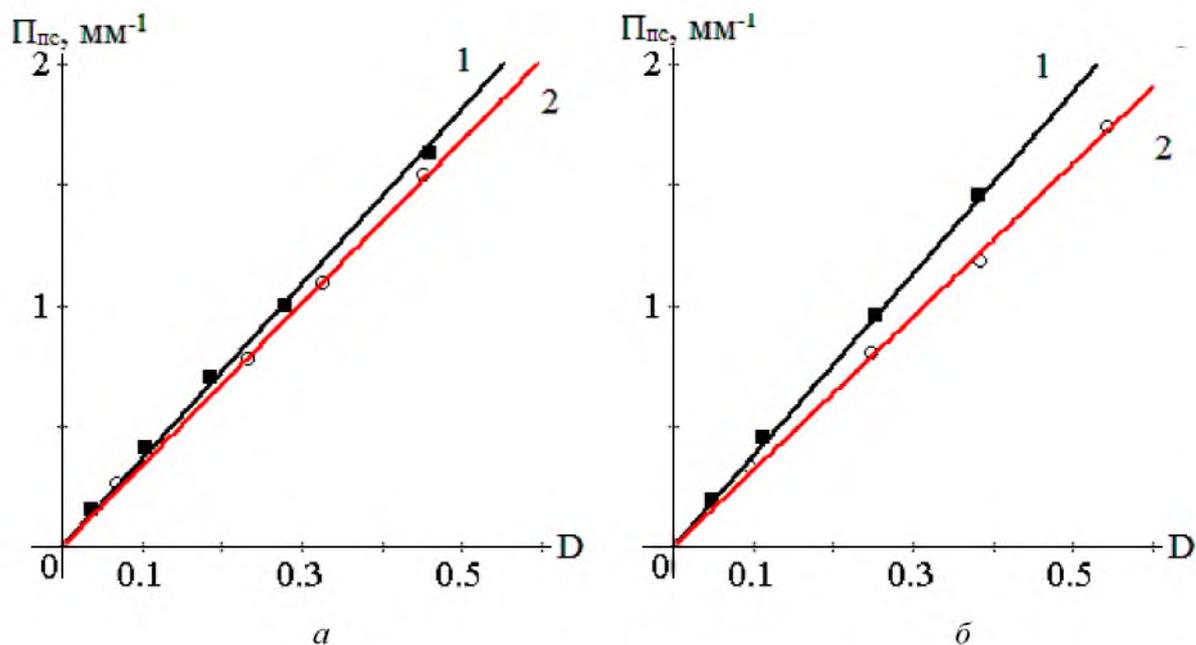


Рисунок 3.12 – Зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: *a* – температура испытания 180 °C; *б* – температура испытания 170 °C

Таблица 3.5 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критерия противоизносных свойств от оптической плотности минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Процесс термостатирования	Температура испытания, °C	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$\Pi_{ПТС} = 3,368 \cdot D$	0,998
Температурная деструкция		$\Pi_{ПТС} = 3,628 \cdot D$	0,989
Окисление	180	$\Pi_{ПТС} = 3,177 \cdot D$	0,993
Температурная деструкция		$\Pi_{ПТС} = 3,77 \cdot D$	0,999

Результаты вычисления обобщенного показателя противоизносных свойств минерального масла сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты вычисления обобщенного показателя противоизносных свойств минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Температура испытания, °C	Значение ОПИС
170	1,076
180	1,187

Если значение обобщенного показателя противоизносных свойств меньше 1, то преобладающее влияние на противоизносные свойства оказывают процессы окисления, а если больше 1, то – процессы температурной деструкции. Согласно данным (таблица. 3.6) с повышением температуры испытания обобщенный показатель противоизносных свойств увеличивается для минерального моторного масла. Кроме того, установлено, что продукты температурной деструкции повышают противоизносные свойства минерального моторного масла.

Для исследования связи между критерием температурной стойкости или термоокислительной стабильности  $K_{TC(TOC)}$  и критерием противоизносных свойств  $\Pi_{ПС}$  и температуры испытания моторного масла построена зависимость между ними (рисунок 3.13).

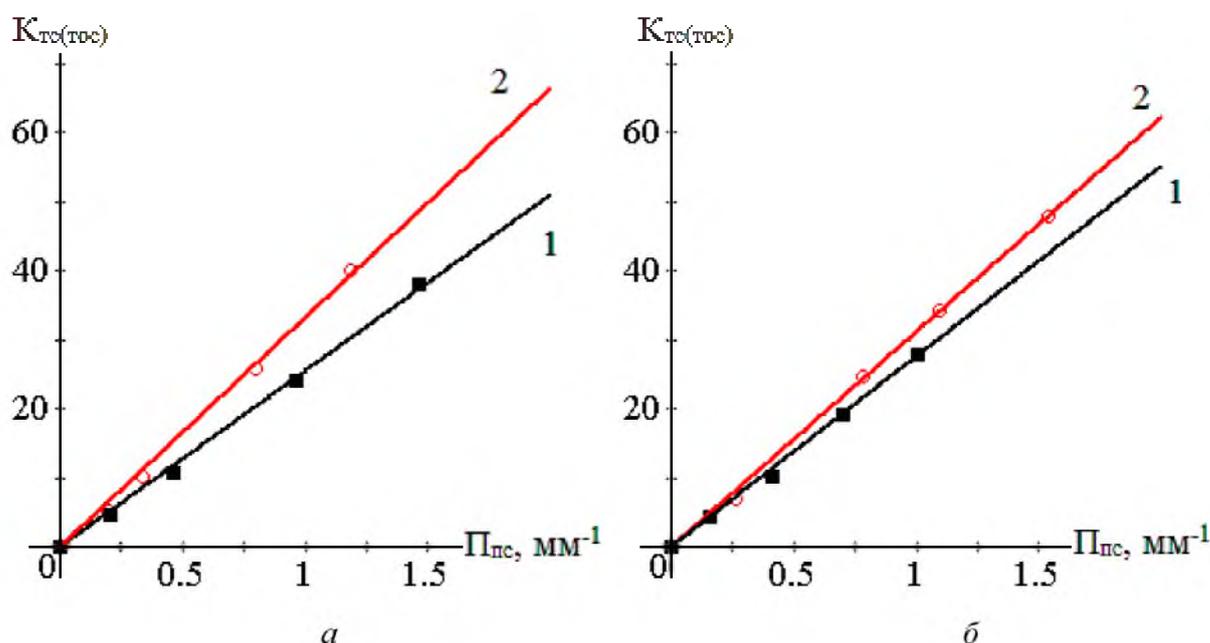


Рисунок 3.13 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от критерия противоизносных свойств и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL: *a* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Установлено, что данные зависимости описываются линейными уравнениями

$$K_{TC(TOC)} = \alpha_{TC(TOC)} \Pi_{ПС}, \quad (3.14)$$

где  $\alpha_{TC(TOC)}$  – скорость изменения критериев температурной стойкости или термоокислительной стабильности  $K_{TC(TOC)}$ .

Регрессионные уравнения зависимостей критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$K_{\text{ТОС}} = 31,145 \cdot \Pi_{\text{ПС}}$	0,998
Температурная деструкция		$K_{\text{ТС}} = 27,614 \cdot \Pi_{\text{ПС}}$	0,999
Окисление	180	$K_{\text{ТОС}} = 33,221 \cdot \Pi_{\text{ПС}}$	0,999
Температурная деструкция		$K_{\text{ТС}} = 25,506 \cdot \Pi_{\text{ПС}}$	0,999

Зависимости критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств моторных масел позволяют оценивать преобладающее влияние процессов окисления или температурной деструкции на их эксплуатационные свойства, а именно вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства. Установлено, что с повышением температуры испытания увеличивается различие между процессами окисления и температурной деструкции. Вязкостно-температурные характеристики процессов окисления преобладают над характеристиками процессов температурной деструкции, так как скорость изменения показателя индекса вязкости процессов окисления в 1,3 раза выше при температуре испытания 180 °С, а при 170 °С – в 1,13 раза выше. Противоизносные свойства выше при температурной деструкции, так как зависимость  $K_{\text{ТС(ТОС)}} = f(\Pi_{\text{ПС}})$  температурной деструкции расположена ближе к оси абсцисс.

В работе предложен эмпирический критерий эксплуатационных свойств моторных масел  $K_{\text{ЭС}}$ , который учитывает концентрацию продуктов термостирования, вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства

$$K_{\text{ЭС}} = \frac{D \cdot \lg \text{ИБ}}{U}, \text{ мм}^{-1} \quad (3.15)$$

где ИБ – индекс вязкости термостатированного моторного масла;  
 $D$  – оптическая плотность;  
 $U$  – среднеарифметическое значение диаметра пятна износа на трех шарах, мм.

Зависимости критерия эксплуатационных свойств представлены на рисунке 3.14 описываются линейными уравнениями

$$K_{\text{ЭС}} = \alpha_{\text{ЭСТС(ЭСТОС)}} D, \quad (3.16)$$

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

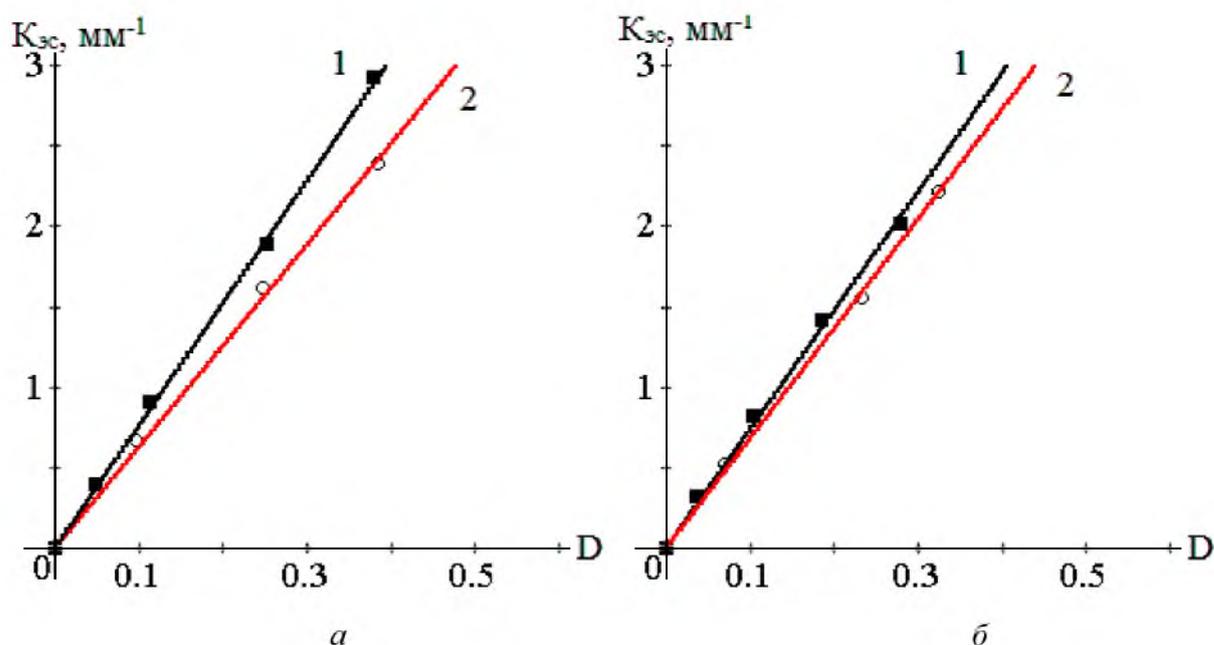


Рисунок 3.14 – Зависимости критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности и температуры испытания минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурной деструкции 1 и при окислении 2: *а* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Регрессионные уравнения зависимостей критерия эксплуатационных свойств от критерия противоизносных свойств представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$K_{\text{эс}} = 6,82 \cdot D$	0,998
Температурная деструкция		$K_{\text{эс}} = 7,384 \cdot D$	0,999
Окисление	180	$K_{\text{эс}} = 6,284 \cdot D$	0,999
Температурная деструкция		$K_{\text{эс}} = 7,606 \cdot D$	0,999

Согласно полученным данным при повышении температуры испытания критерий эксплуатационных свойств при температурной деструкции увеличивается на 3 %, а при процессах окисления снижается на 8 %. Установлено, что лучшими эксплуатационными свойствами обладают минеральные моторные масла при температурной деструкции. Критерий эксплуатационных свойств при температуре испытания 170 °С при процессе температурной деструкции превышает критерий эксплуатационных свойств процессах

окисления в 1,08 раза, а при 180 °С – в 1,21 раза. Данный показатель следует учитывать при выборе минеральных моторных масел для двигателей.

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

$$K_{ВП} = \frac{\alpha_{ЭСТС}}{\alpha_{ЭСТОС}}, \quad (3.17)$$

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

Результаты вычисления обобщенного показателя противозносных свойств минерального масла сведены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты вычисления коэффициента влияния процессов минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL

Температура испытания, °С	Значение $K_{ВП}$
170	1,083
180	1,21

Если значение коэффициента влияния процессов меньше 1, то доминирующе влияние на основные эксплуатационные свойства оказывают процессы окисления, а если больше 1, то – процессы температурной деструкции. Согласно данным (таблица 3.9), с повышением температуры испытания коэффициент влияния процессов увеличивается для минерального моторного масла.

### 3.2 Результаты испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Частично-синтетическое моторное масло Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF относится к всесезонным и предназначено для всех типов двигателей. Испытания масла проводились аналогично испытанию минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL. Методика и параметры испытания описаны в п. 2.3–2.5.

На рисунке 3.15 представлены зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания 180 (а) и 170 °С (б). Согласно данным (рисунок 3.15, а) в начальный период испытания в течение 33 ч интенсивность процессов окисления и температурной деструкции одинакова, увеличение времени испытания от 33 до 37 ч вызывает незначительное понижение интенсивности процессов температурной деструкции (кривая 1) по сравне-

нию с процессами окисления, что объясняется отсутствием перемешивания масла при термостатировании. Однако после 37 ч испытания интенсивность процессов температурной деструкции превышает интенсивность процессов окисления.

Согласно данным рисунка 3.15, б в начальный период испытания в течение 32 ч интенсивность процессов окисления и температурной деструкции одинакова, дальнейшее увеличение времени испытания от 32 до 78 ч вызывает незначительное понижение интенсивности процессов температурной деструкции (кривая 1) по сравнению с процессами окисления, что объясняется отсутствием перемешивания масла при термостатировании. Однако после 78 ч испытания интенсивность процессов температурной деструкции превышает процессы окисления.

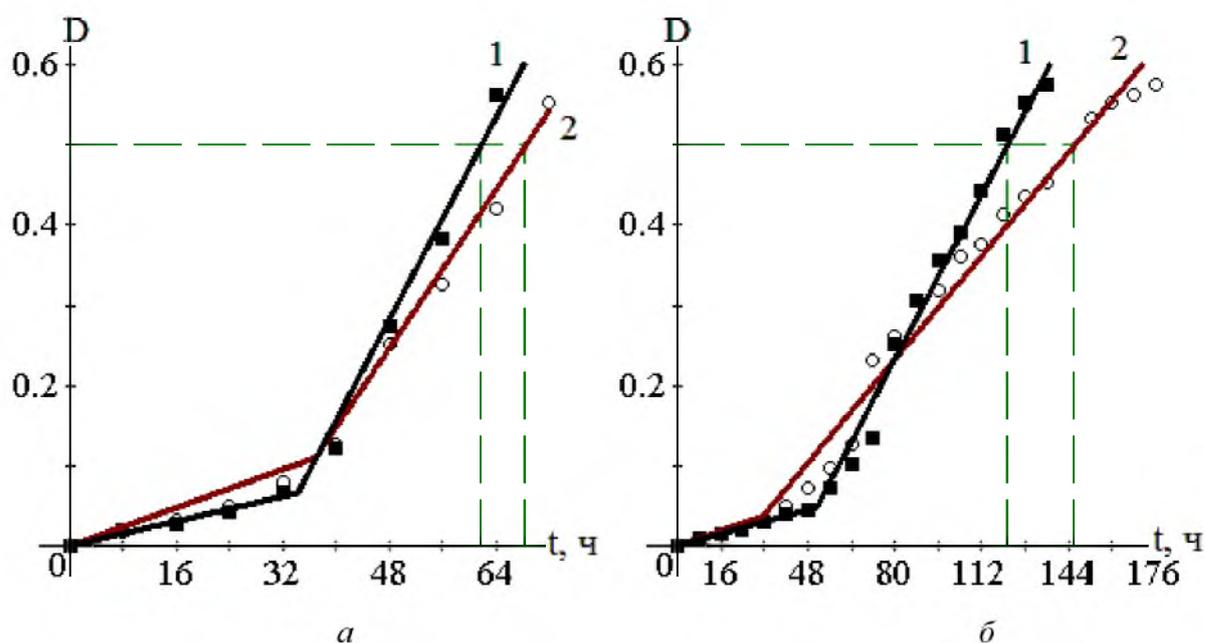


Рисунок 3.15 – Зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Зависимости оптической плотности от времени испытания для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF (рисунок 3.15) имеют изгиб, что свидетельствует об образовании двух видов продуктов старения различной энергоёмкости.

Принято, что первый участок зависимости  $D = f(t)$  характеризует процесс образования начальных (растворимых) продуктов старения, а второй – образование гелеобразных продуктов, которые были установлены при центрифугировании термостатированных масел. Поэтому образование гелеобразных продуктов старения вызывает изгиб зависимостей  $D = f(t)$ . При этом установлено, что чем выше сопротивляемость масла термостатированию, тем

при больших значениях времени и оптической плотности  $D$  происходит изгиб зависимостей  $D = f(t)$ .

В целом, масло Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 180 °С выдержало 68 ч и достигло значения оптической плотности  $D_{\text{д}} = 0,6$  ед., а при температуре окисления 180 °С выдержало 76 ч и достигло значение оптической плотности  $D_{\text{ок}} = 0,6$  ед. При температурной деструкции 170 °С выдержало 138 ч и достигло значение оптической плотности  $D_{\text{д}} = 0,6$  ед., а при температуре окисления 170 °С выдержало 180 ч и достигло значение оптической плотности  $D_{\text{ок}} = 0,6$  ед.

Регрессионные уравнения зависимости  $D = f(t)$  для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Регрессионные уравнения зависимости оптической плотности и времени испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Процесс термостатирования	Участок	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление при 180 °С	Первый ( $t < 37$ ч)	$D_{\text{ок}} = 2,98 \cdot 10^{-3} \cdot t$	0,996
	Второй ( $t > 37$ ч)	$D_{\text{ок}} = 12,31 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,34$	0,989
Температурная деструкция при 180 °С	Первый ( $t < 34$ ч)	$D_{\text{д}} = 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot t$	0,988
	Второй ( $t > 34$ ч)	$D_{\text{д}} = 15,68 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,47$	0,997
Окисление при 170 °С	Первый ( $t < 31$ ч)	$D_{\text{ок}} = 1,17 \cdot 10^{-3} \cdot t$	0,995
	Второй ( $t > 31$ ч)	$D_{\text{ок}} = 4,03 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,28$	0,997
Температурная деструкция при 170 °С	Первый ( $t < 51$ ч)	$D_{\text{д}} = 9,42 \cdot 10^{-4} \cdot t$	0,976
	Второй ( $t > 51$ ч)	$D_{\text{д}} = 6,43 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,28$	0,997

Одним из параметров, характеризующих качество частично-синтетических масел, является потенциальный ресурс  $P_{\text{п}}$ , который определен временем их термостатирования до значения  $D = 0,5$  ед. (рисунок 3.16). Показано, что независимо от температуры испытания масло Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF обладает большим потенциальным ресурсом при процессах окисления.

Вязкость частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF оценивалась коэффициентом относительной вязкости  $K_{\mu}$ , определяемым отношением вязкости термостатированного масла к вязкости товарного, зависимость которого от времени испытания представлена на рисунке 3.17.

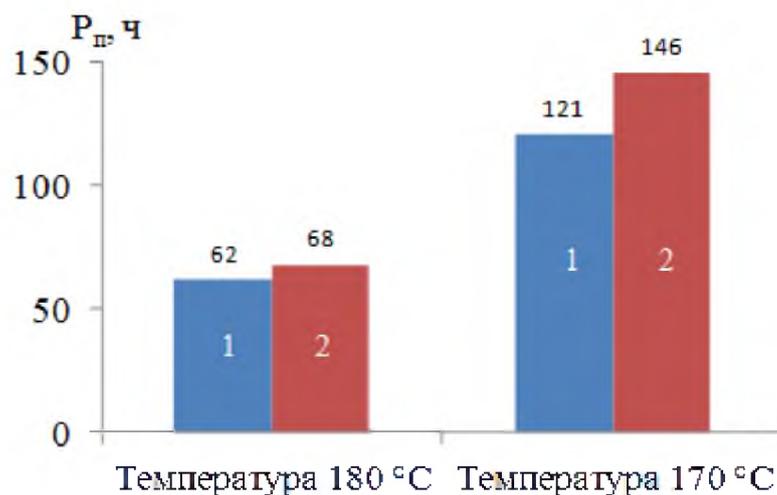


Рисунок 3.16 – Гистограмма потенциального ресурса частично-синтетического моторного масла при температурной деструкции 1 и при окислении 2, определенного при значении  $D = 0,5$  ед.

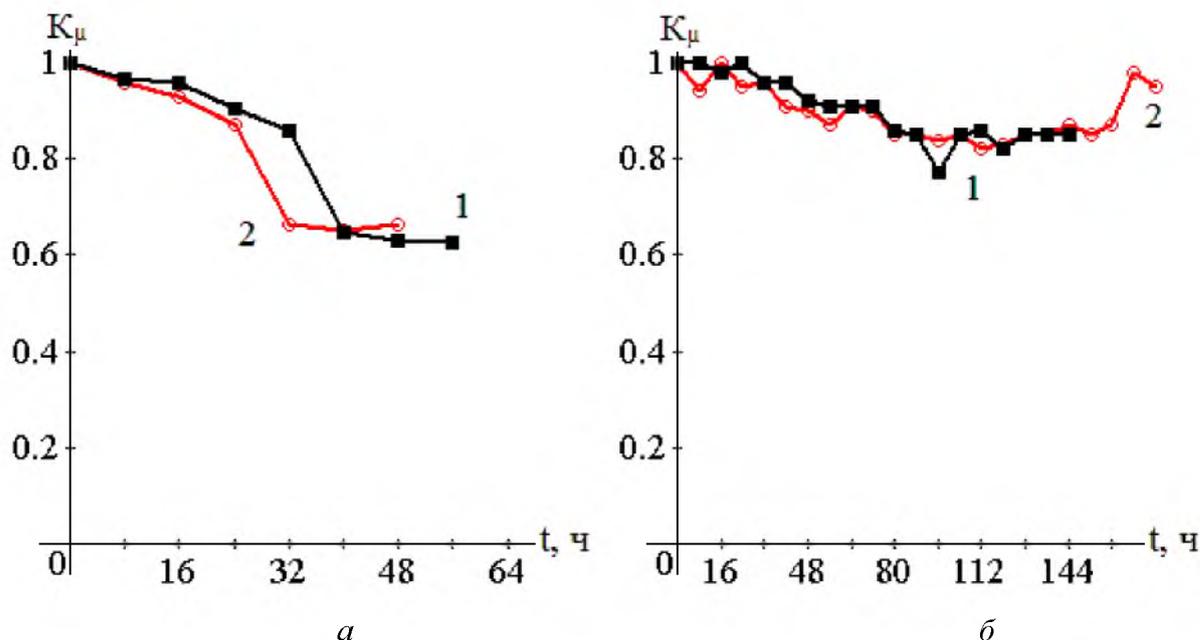


Рисунок 3.17 – Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °C; б – температура испытания 170 °C

Установлено (рисунок 3.17, а), что вязкость моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF за 40 ч испытания при температурной деструкции 180 °C (кривая 1) снизилась на 39 %, а при окислении 180 °C за 32 ч – на 32 % (кривая 2). После 32 ч при окислении и после 40 ч при температурной деструкции вязкость значительно не изменилась. При температуре испытания 170 °C (рисунок 3.17, б) наблюдалось следующие: при температурной деструкции (кривая 1) к 96 ч испытаний вязкость снизилась на 24 %, а после увеличилась

на 12 %. При окислении (кривая 2) вязкость уменьшилась на 19 %, но затем увеличилась на 8 %.

Отличительной особенностью изменения кинематической вязкости при окислении и температурной деструкции является то, что в начальный период термостатирования частично-синтетического масла она уменьшается независимо от температуры испытания, но при деструкции скорость изменения вязкости ниже, чем при окислении, это подтверждает тот факт, что в период окисления образуются продукты, изменяющие вязкость масла, а продукты температурной деструкции в начальный период термостатирования не образуются.

На рисунке 3.18 представлены зависимости испаряемости от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF.

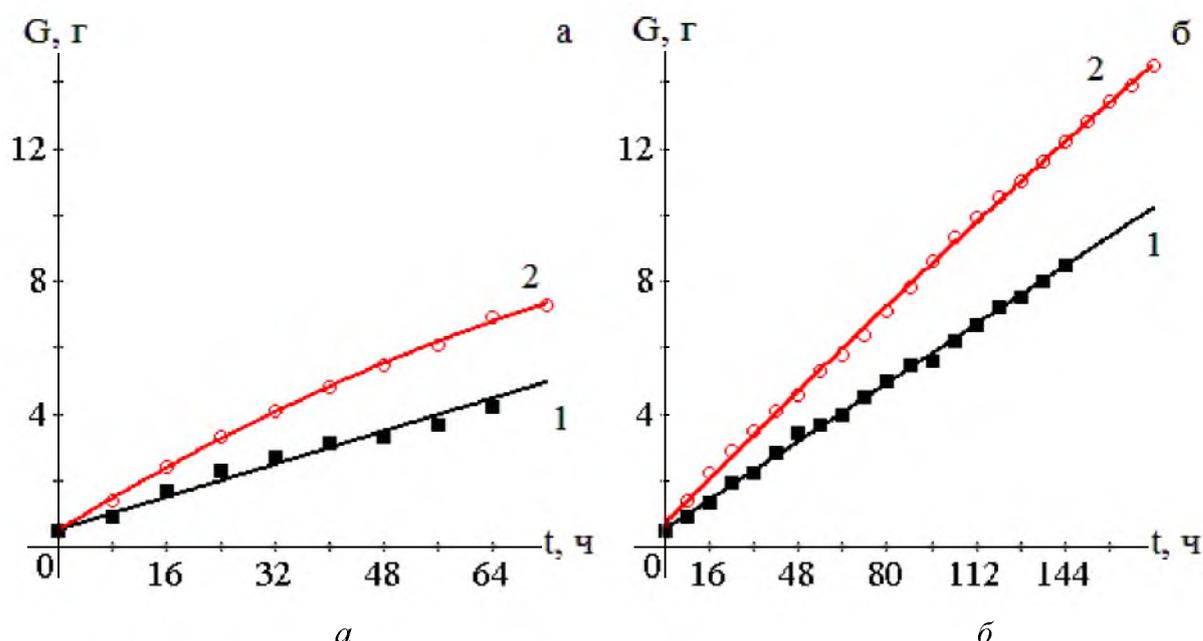


Рисунок 3.18 – Зависимости испаряемости от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Испаряемость масла значительно уменьшается при процессах температурной деструкции независимо от температуры испытания. Так, за 64 ч испытания при температуре 180 °С (рисунок 3.18, а) испаряемость составила при окислении 6,9 г (кривая 2), а при температурной деструкции 4,4 г (кривая 1). Это объясняется тем, что при температурной деструкции масло не перемешивалось и контакт с кислородом воздуха практически отсутствовал. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.18, б) за 144 ч испаряемость составила при окислении 12,2 г (кривая 2), а при температурной деструкции 8,4 г (кривая 1).

Регрессионные уравнения зависимостей  $G = f(t)$  для частично-синтетического моторного масла описываются полиномом второго порядка

для процессов окисления и уравнением первого – при температуре испытания 180 °С для процессов температурной деструкции:

$$G_{\text{ок}} = -4,202 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,1125 \cdot t + 0,485 \text{ (кривая 2)}, \quad (3.17)$$

$$G_{\text{д}} = 0,062 \cdot t + 0,5 \text{ (кривая 1)}. \quad (3.18)$$

Коэффициент корреляции  $\approx 0,987$ .

При температуре испытания 170 °С:

$$G_{\text{ок}} = -3,471 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,085 \cdot t + 0,697 \text{ (кривая 2)}, \quad (3.19)$$

$$G_{\text{д}} = 0,055 \cdot t + 0,526 \text{ (кривая 1)}. \quad (3.20)$$

Коэффициент корреляции  $\approx 0,997$ .

По данным рисунков 3.15– 3.18 видно, что при термостатировании частично-синтетического моторного масла изменяются оптические свойства, вязкость и испаряемость, поэтому в качестве показателя термоокислительной стабильности и температурной стойкости выбрана сумма оптической плотности и коэффициента испаряемости. Как упоминалась выше, вязкость не является показателем термоокислительной стабильности и температурной стойкости, поскольку она зависит от оптических свойств продуктов старения, их концентрации и массы испарившегося масла при термостатировании. Показатели термоокислительной стабильности  $\Pi_{\text{ТСОС}}$  и температурной стойкости  $\Pi_{\text{ТС}}$  определяли по формуле (3.5):

$$\Pi_{\text{ТС(ТСОС)}} = D + K_G$$

Зависимости показателей термоокислительной стабильности и температурной стойкости от времени и температуры испытания представлены на рисунке 3.19.

Данные зависимости также имеют изгиб, подтверждающий образование в процессе окисления двух видов продуктов различной оптической плотности [1; 105].

Регрессионные уравнения зависимости  $\Pi_{\text{ТС(ТСОС)}} = f(t)$  для масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF представлены в таблице 3.11.

Показатели термоокислительной стабильности и температурной стойкости характеризуют процесс термостатирования как сброс избыточной тепловой энергии по двум каналам: изменению оптических свойств и испаряемости испытуемого масла, что вызывает перераспределение тепловой энергии между продуктами термостатирования и испарения.

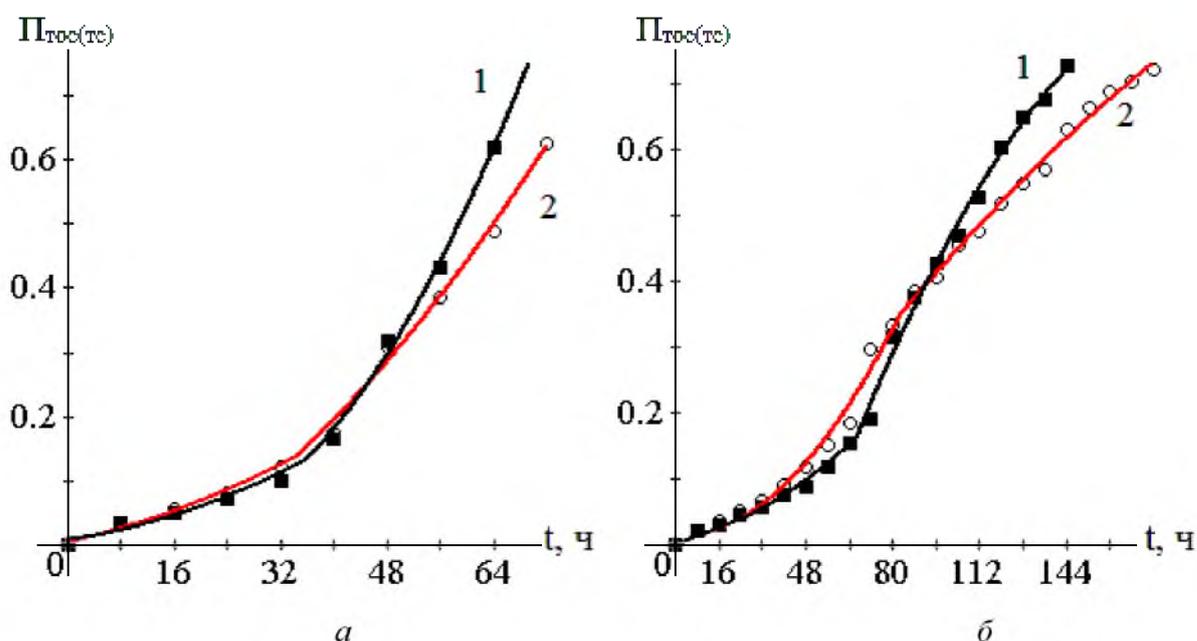


Рисунок 3.19 – Зависимости показателей температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Таблица 3.11 – Регрессионные уравнения зависимостей показателей температурной стойкости и термоокислительной стабильности от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Показатель	Участок	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Термоокислительная стабильность при 180 °С	Первый (t < 35ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = 4,631 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,002 \cdot t + 0,004$	0,999
	Второй (t > 35ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = 8,454 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,003 \cdot t - 0,096$	0,999
Температурная стойкость при 180 °С	Первый (t < 35ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 5,385 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,002 \cdot t + 0,007$	0,989
	Второй (t > 35ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 2,343 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,006 \cdot t + 0,055$	0,999
Термоокислительная стабильность при 170 °С	Первый (t < 82ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = 5,101 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 1,839 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,015$	0,984
	Второй (t > 82ч)	$\Pi_{\text{ТОС}} = -8,402 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,006 \cdot t - 0,113$	0,999
Температурная стойкость при 170 °С	Первый (t < 67ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 2,4505 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 6,714 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,009$	0,995
	Второй (t > 67ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = -3,645 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,014 \cdot t - 0,67$	0,997

Для подтверждения наличия явления перераспределения избыточной тепловой энергии рассмотрим зависимости приращений скоростей изменения оптической плотности  $\Delta V_D$  (рисунок 3.20) и испаряемости  $\Delta V_G$  (рисунок 3.21) от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла. Данные зависимости представляют ломаные линии, т. е. скорости изменения оптической плотности и испаряемости не постоянны из-за процес-

сов перераспределения тепловой энергии между продуктами термостатирования и испарения [102; 104]. При увеличении скорости термостатирования  $\Delta V_D$  происходит уменьшение скорости испаряемости  $\Delta V_G$ .

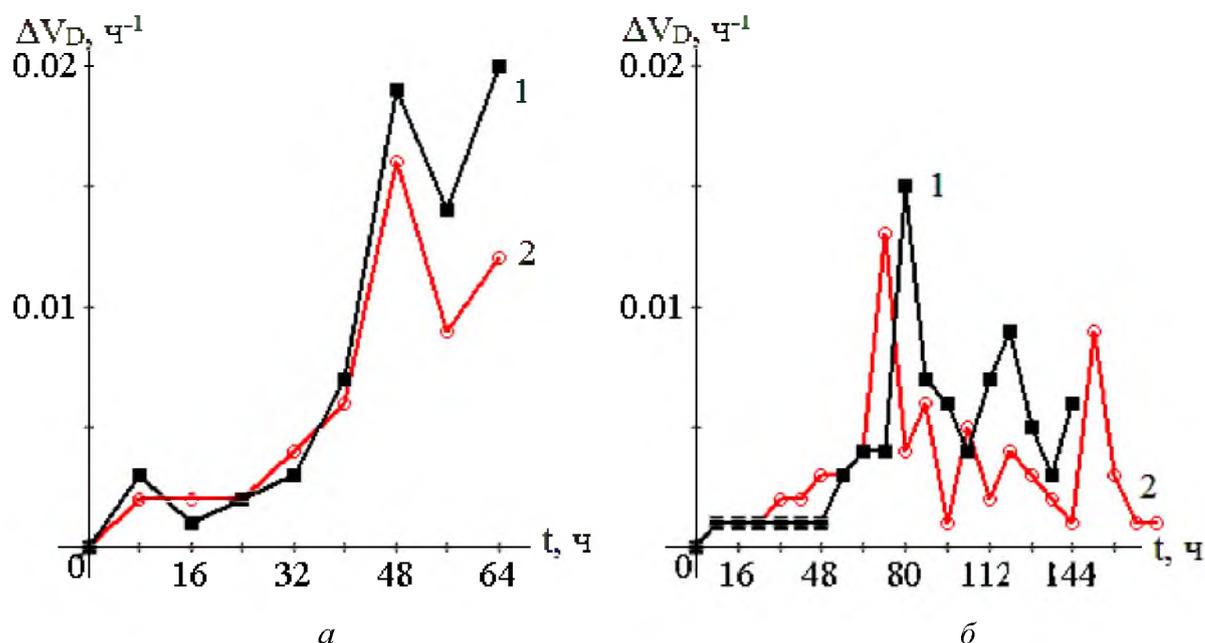


Рисунок 3.20 – Зависимости приращения скоростей температурной деструкции 1 и окисления 2 от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF: *а* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Согласно данным (рисунок 3.20) установлена общая тенденция увеличения приращений скоростей процессов окисления и температурной деструкции в начальный период термостатирования (первый участок), однако интенсивность процессов окисления (кривая 2) ниже, чем процессов температурной деструкции. Такое увеличение приращения скоростей вызвано ростом концентрации продуктов окисления и деструкции в масле.

Вторые участки зависимостей  $\Delta V_D$  от времени испытания характеризуются значительными колебаниями приращения скоростей как процессов окисления, так и деструкции, что объясняется образованием продуктов этих процессов с большей энергоемкостью. В этот период времени испытания исследуемого масла первичные продукты, образующиеся в начальный период, концентрация которых непрерывно росла, переходят в более энергоемкие, требующие больше тепловой энергии для их образования, а так как выделяемая тепловая энергия постоянна, то время образования энергоемких продуктов увеличивается, вызывая уменьшение приращения скорости процессов окисления и температурной деструкции. Переход первичных продуктов окисления и температурной деструкции в энергоемкие при температуре 180 °С наступает после 48 ч испытания. Переход первичных продуктов окисления в энергоемкие при температуре 170 °С наступает после 72 ч испытания, а первичных продуктов температурной деструкции – после 80 ч. Установлено,

что с повышением температуры испытания увеличивается скорость как процессов окисления, так и температурной деструкции.

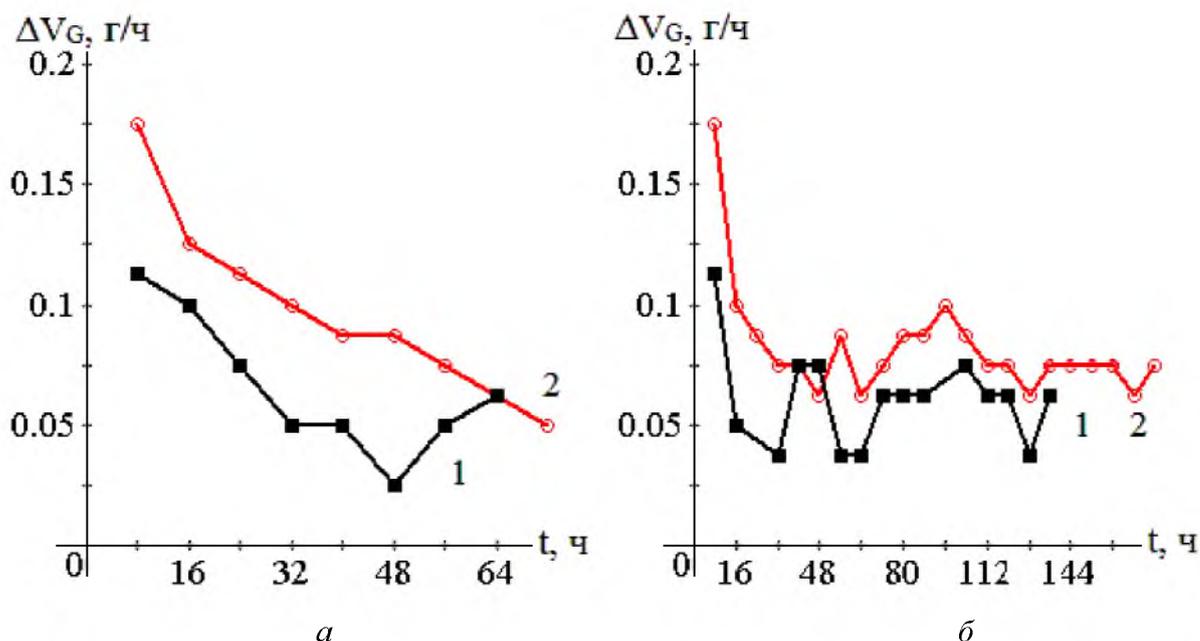


Рисунок 3.21 – Зависимости приращения скоростей испаряемости температурной деструкции 1 и окисления 2 от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF: *а* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Согласно данным (рисунок 3.21) установлена общая тенденция уменьшения приращений скоростей испаряемости при окислении и температурной деструкции, однако интенсивность процессов окисления (кривая 2) выше, чем процессов температурной деструкции. Такое уменьшение приращения скоростей испаряемости вызвано ростом концентрации продуктов окисления и деструкции в масле. Скорость испаряемости масла значительно ниже при процессах температурной деструкции (кривая 1) независимо от температуры испытания, но при окислении (кривая 2) скорость испаряемости уменьшается более интенсивно, чем при температурной деструкции. Так, за 72 ч испытания при температуре 180 °С (рисунок 3.21, *а*) скорость испаряемости снизилась при окислении (кривая 2) на 0,12 (70 %), а при температурной деструкции (кривая 1) на 0,09 (82 %) за 48 ч, а затем при температурной деструкции наблюдается повышение скорости испаряемости на 0,04. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.21, *б*) за 48 ч скорость испаряемости снизилась при окислении (кривая 2) на 0,115 (66 %), а при температурной деструкции (кривая 1) за 32 ч на 0,073 (66 %), а затем скорость испаряемости изменяется незначительно с колебаниями. Установлено, что с повышением температуры испытания увеличивается скорость испаряемости как процессов окисления, так и температурной деструкции.

Как уже отмечалось выше, перераспределение избыточной тепловой энергии при переходе начальных продуктов термостатирования в более энергоемкие наблюдается при уменьшении скорости термостатирования. Данный

процесс является периодическим: вначале образуются менее энергоемкие продукты, а при достижении определенной концентрации часть переходит в более энергоемкие. Этот процесс характеризуется колебаниями концентраций продуктов термостатирования и периодическими увеличениями концентраций энергоемких продуктов термостатирования. Для оценки интенсивности процессов самоорганизации предложен коэффициент самоорганизации  $K_C$ , который определяется по формуле (3.6) [101]:

$$K_C = \Delta V_D / \Delta V_G, \Gamma^{-1}$$

Зависимости коэффициента самоорганизации (рисунок 3.22) представляют ломаные кривые, подтверждающие наличие перераспределения тепловой энергии. Установлено, что интенсивность коэффициента самоорганизации при температурной деструкции выше, чем при процессах окисления, независимо от температуры испытания.

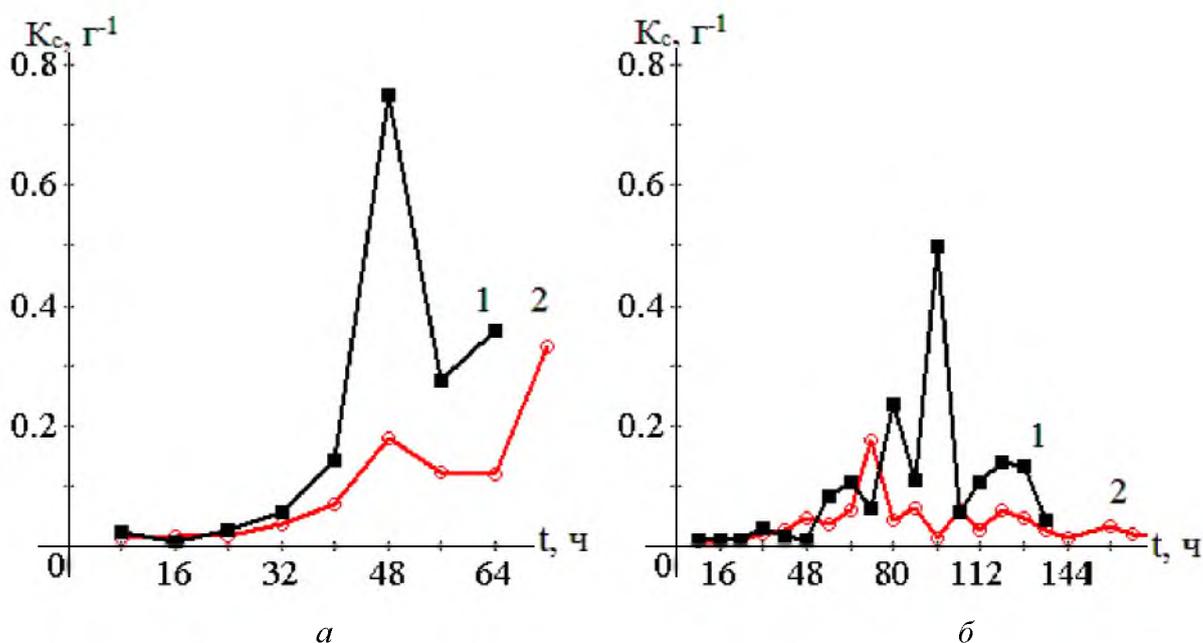


Рисунок 3.22 – Зависимости коэффициента самоорганизации от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Важные эксплуатационных свойства масла – кинематическая вязкость, которая не является величиной постоянной, а изменяется с изменением температуры и концентрации продуктов окисления, температурной деструкции и другими механическими примесей, а также индекс вязкости – безразмерный показатель пологости вязкостно-температурной характеристики, рассчитываемый по значениям кинематической вязкости масла, измеренной при температурах 40 и 100 °С (ГОСТ 25371–82). Чем выше индекс вязкости, тем более пологая вязкостно-температурная характеристика [106]. Данные по изме-

нению индекса вязкости ИВ от времени и температуры испытания представлены на рисунке 3.23.

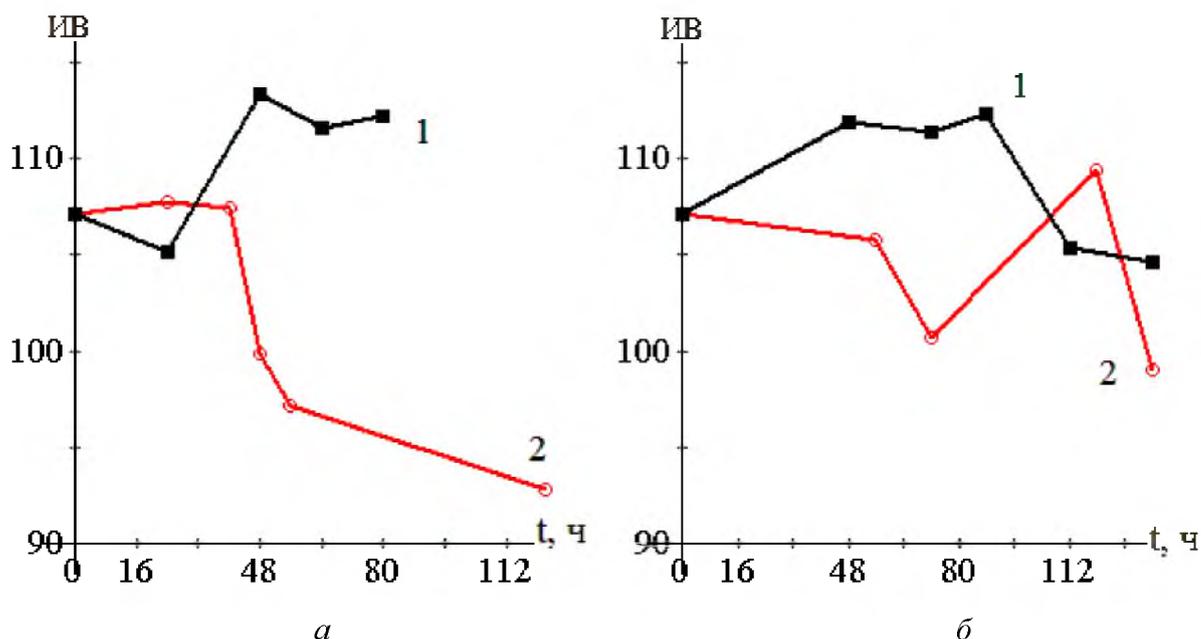


Рисунок 3.23 – Зависимости индекса вязкости от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Установлено (рисунок 3.23, а), что индекс вязкости частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF за 40 ч испытания ( $T=180\text{ °C}$ ) не изменился при окислении (кривая 2), а при температурной деструкции (кривая 1) снизился на 2 % за 24 ч. После 40 ч испытания при окислении индекс вязкости уменьшился на 13 %, а при температурной деструкции увеличился на 7 % за 16 ч испытания. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.23, б) индекс вязкости при температурной деструкции колеблется в пределах  $\pm 5\%$ . При окислении (кривая 2) за 56 ч он практически не изменился, а затем уменьшился на 7 %.

Как уже отмечалось выше, в работе предложены альтернативные критерии термоокислительной стабильности и температурной стойкости, учитывающие индекс вязкости и определяемые по выражениям (3.7-3.8) для:

термоокислительной стабильности

$$K_{\text{ТОС}} = \text{ИВ}_{\text{ОК}} \cdot D_{\text{ОК}},$$

температурной стойкости

$$K_{\text{ТС}} = \text{ИВ}_{\text{Д}} \cdot D_{\text{Д}},$$

Зависимости критериев термоокислительной стабильности и температурной стойкости от оптической плотности  $K_{TC(TOC)} = f(D)$  представлены на рисунке 3.24. Данные зависимости описываются линейными уравнениями (см. формулу (3.9)) и представлены в таблице 3.12:

$$K_{TC(TOC)} = \alpha_{TC(TOC)} D,$$

Таблица 3.12 – Результаты регрессионного анализа зависимостей альтернативных критериев от оптической плотности частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Температура испытания, °С	Процесс термостатирования	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
170	Окисление	$K_{TOC} = 102,646 \cdot D$	0,999
	Температурная деструкция	$K_{TC} = 107,396 \cdot D$	0,999
180	Окисление	$K_{TOC} = 93,136 \cdot D$	0,999
	Температурная деструкция	$K_{TC} = 112,157 \cdot D$	0,999

Согласно данным (рисунок 3.24) критерии термоокислительной стабильности ниже, чем критерии температурной стойкости, на 4 % при температуре испытания 170 °С и на 16 % при 180 °С.

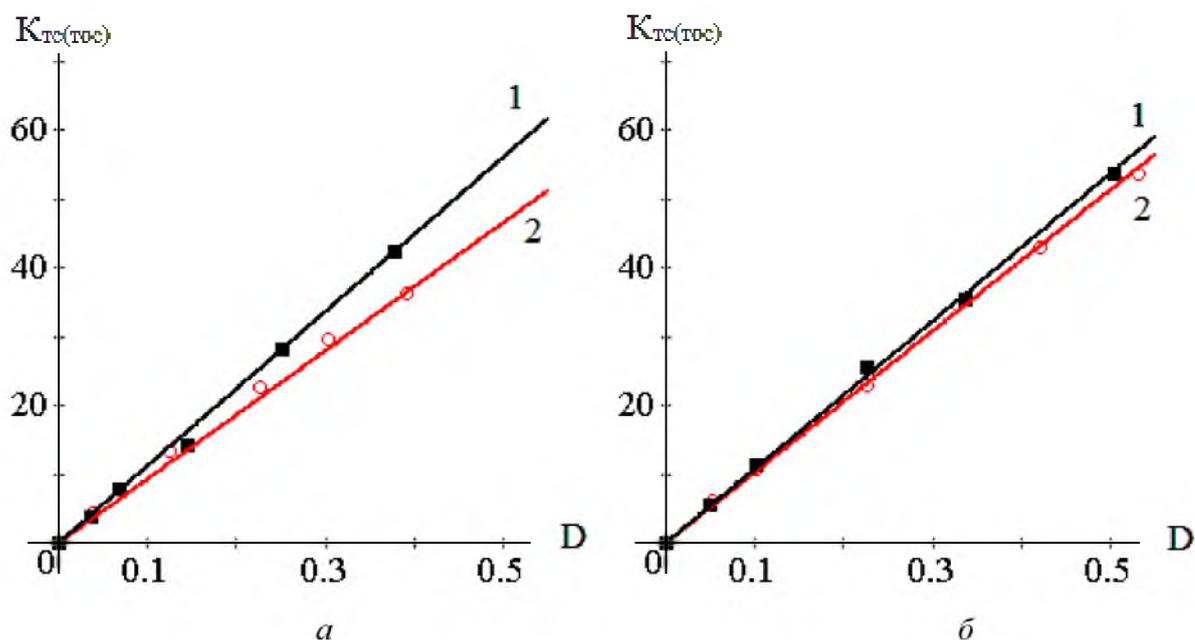


Рисунок 3.24 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от времени и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Для выявления преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции на свойства частично-синтетического моторного масла предложен коэффициент доминирующего влияния  $K_{ДВ}$ , определяемый

по формуле (3.10) как отношение скоростей изменения критерия температурной стойкости к критерию термоокислительной стабильности:

$$K_{\text{ДВ}} = \frac{\alpha_{\text{ТС}}}{\alpha_{\text{ТОС}}}.$$

Результаты вычисления доминирующего влияния одного из процессов сведены в таблицу 3.13.

Таблица 3.13 – Результаты вычисления коэффициента доминирующего влияния частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Температура испытания, °С	Значение $K_{\text{ДВ}}$
170	1,046
180	1,204

Если значение коэффициента  $K_{\text{ДВ}}$  ниже 1, то преобладают процессы термоокислительной стабильности, а если больше 1, то – процессы температурной стойкости. Согласно данным (таблица 3.13) с повышением температуры испытания коэффициент  $K_{\text{ДВ}}$  увеличивается для частично-синтетического моторного масла. Кроме того, установлено, что продукты окисления уменьшают вязкостно-температурные характеристики частично-синтетических масел.

Влияние продуктов термостатирования на противоизносные свойства оценивалось по методике, описанной в п. 2.5 [107; 108]. Зависимости диаметра пятна износа от оптической плотности и температуры испытания представлены на рисунок 3.25.

Общая закономерность изменения противоизносных свойств исследуемого моторного масла от увеличения концентрации продуктов термостатирования, выраженная оптической плотностью  $D$ , заключается в том, что независимо от температуры или процесса термостатирования противоизносные свойства понижаются. При температурной деструкции (кривая 1) противоизносные свойства снижаются на 16 % при температуре испытания 180 °С и на 4 % при 170 °С. При окислении (кривая 2) идет резкое понижение противоизносных свойств в начальный период времени независимо от температуры испытания, а затем незначительное понижение или стабилизация ( $T=170$  °С). Период времени понижения и повышения противоизносных свойств зависит от соотношения состава растворимых и гелеобразных продуктов старения. Улучшение противоизносных свойств в течение испытания объясняется тем, что продукты старения адсорбируются на поверхностях трения во впадинах, создавая гидравлические «подушки» и тем самым уменьшая износ. Поэтому концентрация продуктов старения на номинальной площади фрикционного контакта может служить критерием противоизносных свойств.

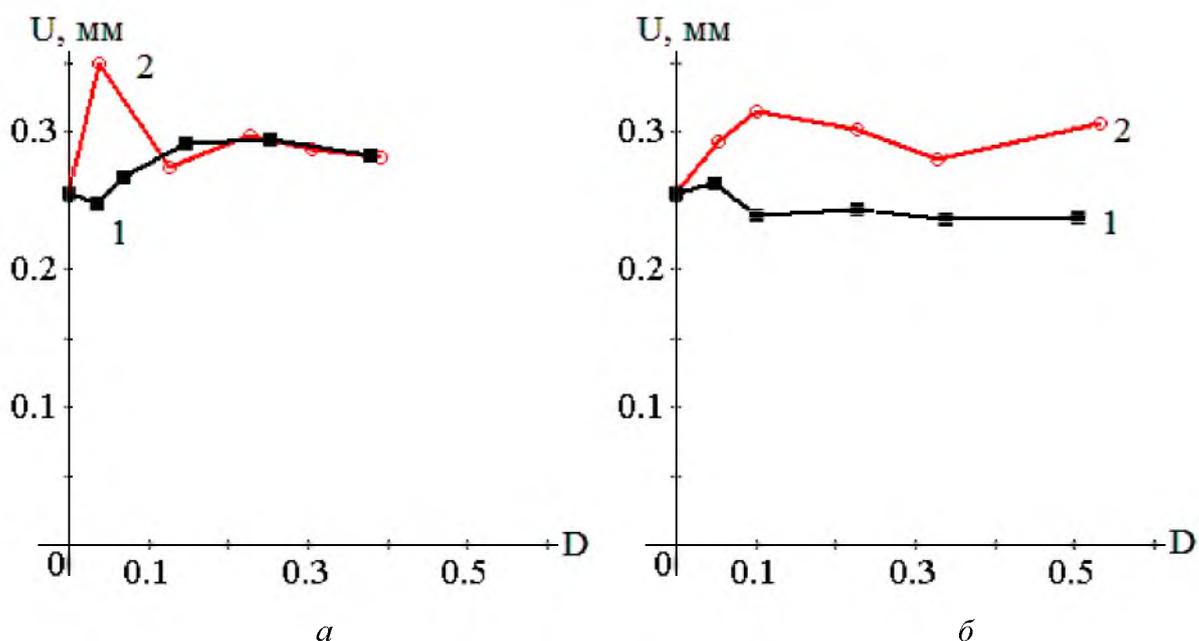


Рисунок 3.25 – Зависимости диаметра пятна износа от оптической плотности и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: *a* – температура испытания 180 °C; *б* – температура испытания 170 °C

В работе для упрощения расчета в качестве критерия противоизносных свойств предложено выражение (3.11):

$$П_{\text{ПС}} = \frac{D}{U}, \text{ мм}^{-1}$$

Данный критерий характеризует концентрацию продуктов окисления или температурной деструкции на номинальной площади фрикционного контакта. На рисунке 3.26 представлены зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности.

Установлено, что данные зависимости описываются линейными уравнениями согласно формуле (3.12)

$$П_{\text{ПС}} = \alpha_{\text{ПТС(ПТОС)}} D.$$

Регрессионные уравнения зависимостей критерия противоизносных свойств от оптической плотности представлены в таблице 3.14.

Согласно данным (таблицы 3.14) противоизносные свойства при температурной деструкции превышают противоизносные свойства окисленных масел в 1,28 раза при температуре 170 °C, а при 180 °C противоизносные свойства окисленных масел превышают противоизносные свойства при температурной деструкции в 1,02 раза.

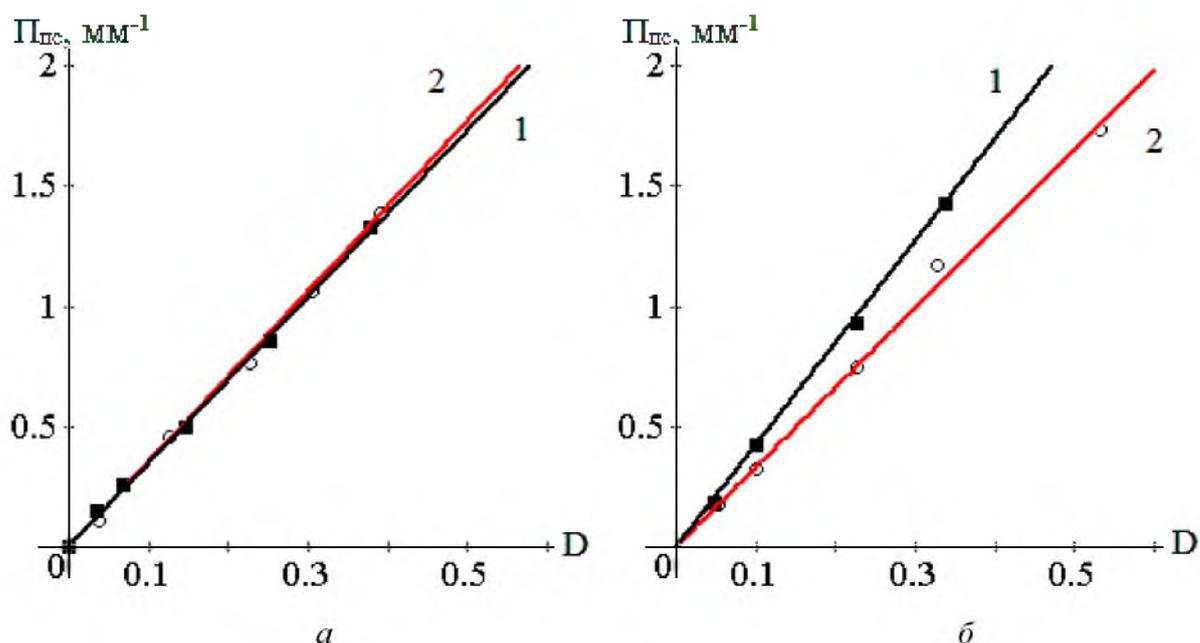


Рисунок 3.26 – Зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Таблица 3.14 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критерия противоизносных свойств от оптической плотности частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$\Pi_{ПТС} = 3,305 \cdot D$	0,987
Температурная деструкция		$\Pi_{ПТС} = 4,241 \cdot D$	0,999
Окисление	180	$\Pi_{ПТС} = 3,541 \cdot D$	0,999
Температурная деструкция		$\Pi_{ПТС} = 3,461 \cdot D$	0,999

Для определения доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства был предложен обобщенный показатель противоизносных свойств термостатированных масел (таблица 3.15), вычисляемый по формуле (3.13):

$$\text{ОППС} = \frac{\alpha_{ПТС}}{\alpha_{ПТОС}}$$

Таблица 3.15 – Результаты вычисления обобщенного показателя противоизносных свойств частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Температура испытания, °С	Значение ОППС
170	1,28
180	0,977

Согласно данным (таблица 3.15) с повышением температуры испытания обобщенный показатель противоизносных свойств уменьшается для частично-синтетического моторного масла. Кроме того, с понижением температуры испытания продукты температурной деструкции повышают противоизносные свойства частично-синтетического моторного масла.

Для исследования связи между критерием температурной стойкости или термоокислительной стабильности  $K_{TC(TOC)}$  и критерием противоизносных свойств  $\Pi_{ПС}$  и температурой испытания моторного масла построена зависимость между ними (рисунок 3.27)

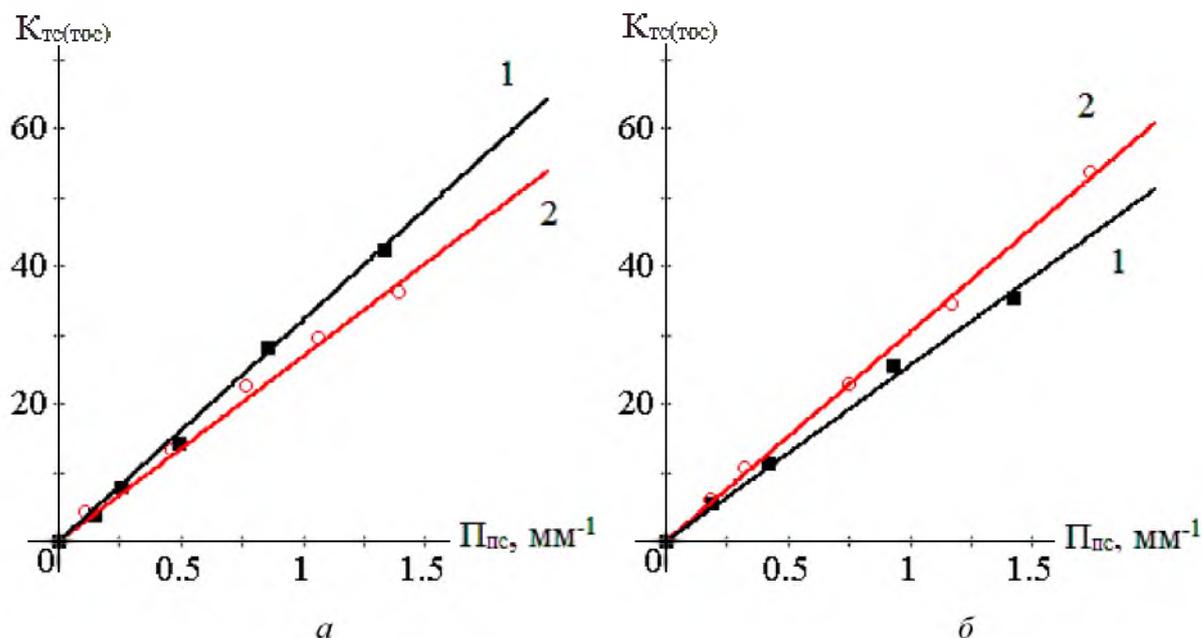


Рисунок 3.27 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от критерия противоизносных свойств и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Установлено, что данные зависимости описываются линейными уравнениями (3.14)

$$K_{TC(TOC)} = \alpha_{TC(TOC)} \Pi_{ПС},$$

Регрессионные уравнения зависимостей критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств представлены в таблице 3.16.

Установлено, что с повышением температуры испытания увеличивается различие между процессами окисления и температурной деструкции. Вязкостно-температурные характеристики процессов окисления преобладают над характеристиками процессов температурной деструкции при температуре 170 °С, а при 180 °С наблюдается обратная зависимость. Противоизносные свойства выше при температурной деструкции 170 °С, так как зависимость

$K_{TC(ТОС)} = f(\Pi_{ПС})$  температурной деструкции расположена ближе к оси абсцисс, при 180 °С противоизносные свойства выше при окислении.

Таблица 3.16 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$K_{ТОС} = 30,405 \cdot \Pi_{ПС}$	0,998
Температурная деструкция		$K_{ТС} = 25,603 \cdot \Pi_{ПС}$	0,999
Окисление	180	$K_{ТОС} = 26,925 \cdot \Pi_{ПС}$	0,999
Температурная деструкция		$K_{ТС} = 32,191 \cdot \Pi_{ПС}$	0,999

Эмпирический критерий эксплуатационных свойств моторных масел  $K_{ЭС}$ , который учитывает концентрацию продуктов термостатирования, вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства и определяется по формуле (3.15):

$$K_{ЭС} = \frac{D \cdot \lg IB}{U}, \text{ мм}^{-1}.$$

Зависимости критерия эксплуатационных свойств представлены на рисунке 3.28.

Данные зависимости описываются линейными уравнениями согласно формуле (3.16):

$$K_{ЭС} = \alpha_{ЭСТС(ЭСТОС)} D.$$

Регрессионные уравнения зависимостей критерия эксплуатационных свойств от критерия противоизносных свойств представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$K_{ЭС} = 6,656 \cdot D$	0,992
Температурная деструкция		$K_{ЭС} = 8,519 \cdot D$	0,999
Окисление	180	$K_{ЭС} = 6,981 \cdot D$	0,999
Температурная деструкция		$K_{ЭС} = 7,094 \cdot D$	0,999

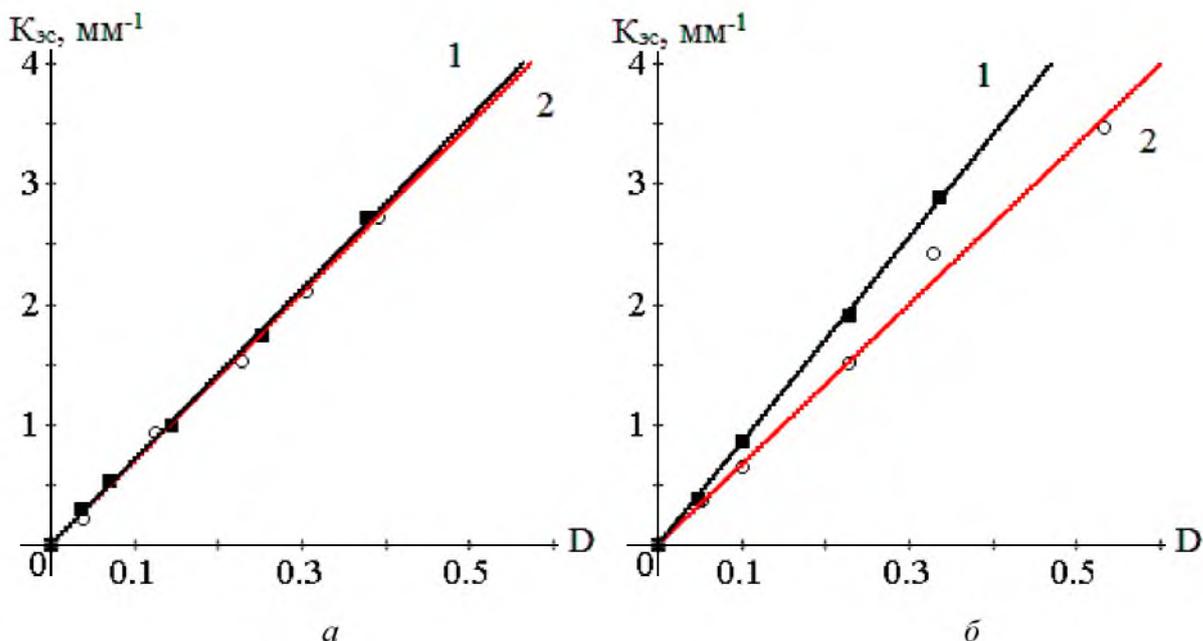


Рисунок 3.28 – Зависимости критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности и температуры испытания частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при температурной деструкции 1 и при окислении 2: *а* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Согласно данным при повышении температуры испытания критерий эксплуатационных свойств при температурной деструкции снижается на 16 %, а при процессах окисления увеличивается на 5 %. Установлено, что лучшими эксплуатационными свойствами обладают частично-синтетические моторные масла при температурной деструкции. Критерий эксплуатационных свойств при температуре испытания 170 °С при температурной деструкции превышает  $K_{эс}$  при процессах окисления в 1,28 раза, а при 180 °С – в 1,02 раза. Данный показатель следует учитывать при выборе частично-синтетических моторных масел для двигателей.

Для определения доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции на основные эксплуатационные свойства моторных масел был предложен коэффициент влияния процессов  $K_{вп}$  термостатированных масел (таблица 3.18), вычисляемый по формуле (3.17)

$$K_{вп} = \frac{\alpha_{эстс}}{\alpha_{эстос}}$$

Таблица 3.18 – Результаты вычисления коэффициента влияния процессов частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF

Температура испытания, °С	Значение $K_{вп}$
170	1,279
180	1,016

Согласно данным таблицы 3.18, с повышением температуры испытания коэффициент влияния процессов уменьшается для частично-синтетического моторного масла.

### 3.3 Результаты испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Синтетическое моторное масло ALPHA'S 5W-40 SN относится к всесезонным и предназначено для бензиновых типов двигателей. Испытания масла проводились аналогично испытанию минерального ZIC HIFLO 10W-40 SL и частично-синтетического Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF моторных масел. Методика и параметры испытания описаны в п. 2.3–2.5.

На рисунке 3.29 представлены зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания 180 (а) и 170 °С (б). Согласно данным (рисунок 3.29, а) в начальный период испытания в течение 10 ч интенсивность процессов окисления и температурной деструкции одинакова, увеличение времени испытания от 10 до 45 ч вызывает незначительное понижение интенсивности процессов температурной деструкции (кривая 1) по сравнению с процессами окисления, что объясняется отсутствием перемешивания масла при термостатировании. Однако после 45 ч испытания интенсивность процессов температурной деструкции превышает интенсивность процессы окисления.

В соответствии с данными (рисунок 3.29, б) в начальный период испытания в течение 14 ч интенсивность процессов окисления и температурной деструкции одинакова, увеличение времени испытания от 14 до 56 ч вызывает незначительное понижение интенсивности процессов температурной деструкции (кривая 1) по сравнению с процессами окисления, что объясняется отсутствием перемешивания масла при термостатировании. Однако после 56 ч испытания интенсивность процессов температурной деструкции превышает интенсивность процессы окисления.

Зависимости оптической плотности от времени испытания для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN (рисунок 3.29) имеют изгиб, что свидетельствует об образовании двух видов продуктов старения различной энергоемкости.

Принято, что первый участок зависимости  $D = f(t)$  характеризует процесс образования начальных (растворимых) продуктов старения, а второй – образование гелеобразных продуктов, которые были установлены при центрифугировании термостатированных масел. Поэтому образование гелеобразных продуктов старения вызывает изгиб зависимостей  $D = f(t)$ . При этом установлено, что чем больше сопротивляемость масла термостатированию, тем при больших значениях времени и оптической плотности  $D$  происходит изгиб зависимостей  $D = f(t)$ .

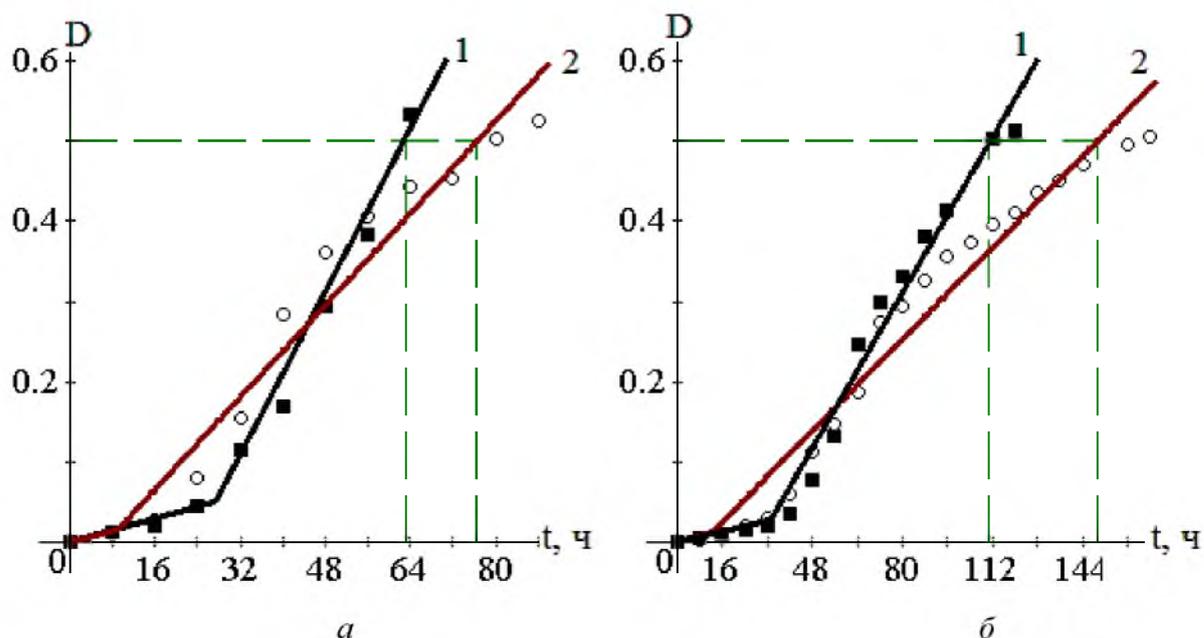


Рисунок 3.29 – Зависимости оптической плотности от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

В целом масло ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 180 °С выдержало 63 ч и достигло значение оптической плотности  $D_D = 0,5$  ед., а при температуре окисления 180 °С выдержало 76 ч и достигло значение оптической плотности  $D_{OK} = 0,5$  ед.. При температурной деструкции 170 °С выдержало 110 ч и достигло значения оптической плотности  $D_D = 0,5$  ед., а при температуре окисления 170 °С выдержало 149 ч и достигло значение оптической плотности  $D_{OK} = 0,5$  ед.

Регрессионные уравнения зависимости  $D = f(t)$  для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN представлены в таблице 3.19:

Таблица 3.19 – Регрессионные уравнения зависимости оптической плотности и времени испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Процесс термостагирования	Участок	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление при 180 °С	Первый ( $t < 9$ ч)	$D_{OK} = 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot t$	0,996
	Второй ( $t > 9$ ч)	$D_{OK} = 7,17 \cdot 10^{-3} \cdot t - 49,22 \cdot 10^{-3}$	0,989
Температурная деструкция при 180 °С	Первый ( $t < 27$ ч)	$D_D = 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot t$	0,988
	Второй ( $t > 27$ ч)	$D_D = 12,71 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,29$	0,997
Окисление при 170 °С	Первый ( $t < 13$ ч)	$D_{OK} = 9,75 \cdot 10^{-4} \cdot t$	0,995
	Второй ( $t > 13$ ч)	$D_{OK} = 3,56 \cdot 10^{-3} \cdot t - 32,67 \cdot 10^{-3}$	0,997
Температурная деструкция при 170 °С	Первый ( $t < 33$ ч)	$D_D = 8,21 \cdot 10^{-4} \cdot t$	0,976
	Второй ( $t > 33$ ч)	$D_D = 6,04 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,17$	0,997

Одним из параметров, характеризующих качество синтетических масел, является потенциальный ресурс  $P_{п, ч}$ , который определен временем их термостатирования до значения  $D = 0,5$  ед. (рисунок 3.30). Показано, что независимо от температуры испытания масло ALPHA'S 5W-40 SN обладает большим потенциальным ресурсом при процессах окисления.

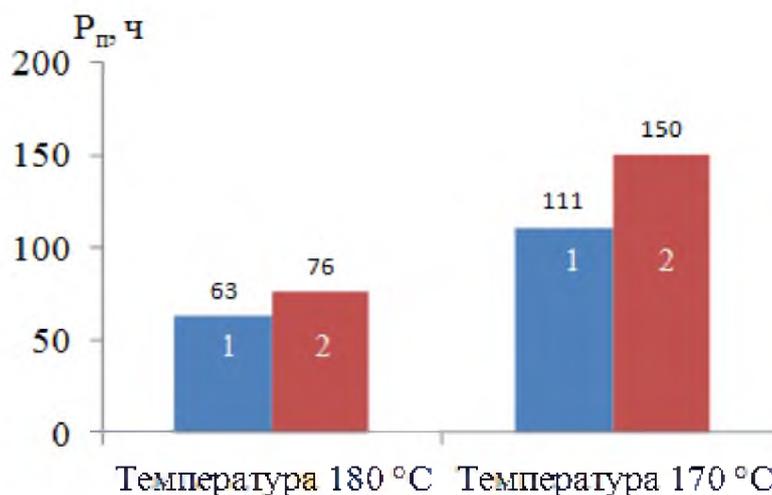


Рисунок 3.30 – Гистограмма потенциального ресурса синтетического моторного масла при температурной деструкции 1 и при окислении 2, определенного при значении  $D = 0,5$  ед.

Вязкость синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN оценивалась коэффициентом относительной вязкости  $K_{\mu}$ , определяемым отношением вязкости термостатированного масла к вязкости товарного, зависимость которого от времени испытания представлена на рисунке 3.31.

Установлено (рисунок 3.31, а), что вязкость моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN за 16 ч испытания при температурной деструкции 180 °C (кривая 1) снизилась на 20 %, а при окислении 180 °C – на 16 % (кривая 2). После 16 ч при окислении и при температурной деструкции вязкость значительно не изменилась, но после 40 ч при температурной деструкции вязкость увеличилась на 12 %. При температуре испытания 170 °C (рисунок 3.31, б) наблюдалось следующие, при температурной деструкции (кривая 1) к 16 ч испытаний вязкость снизилась на 14 %, а потом увеличилась на 12 % с дальнейшими колебаниями, но после 80 ч вязкость снизилась на 15 %. При окислении (кривая 2) вязкость уменьшилась на 15 % в течении всего периода испытаний.

Отличительной особенностью изменения кинематической вязкости при окислении и температурной деструкции является то, что в начальный период термостатирования синтетического масла она уменьшается независимо от температуры испытания, но при деструкции скорость изменения вязкости выше, чем при окислении, это означает, что у синтетических моторных масел в период окисления образуются продукты, не изменяющие вязкость масла, а продукты температурной деструкции в начальный период термостатирования образуются.

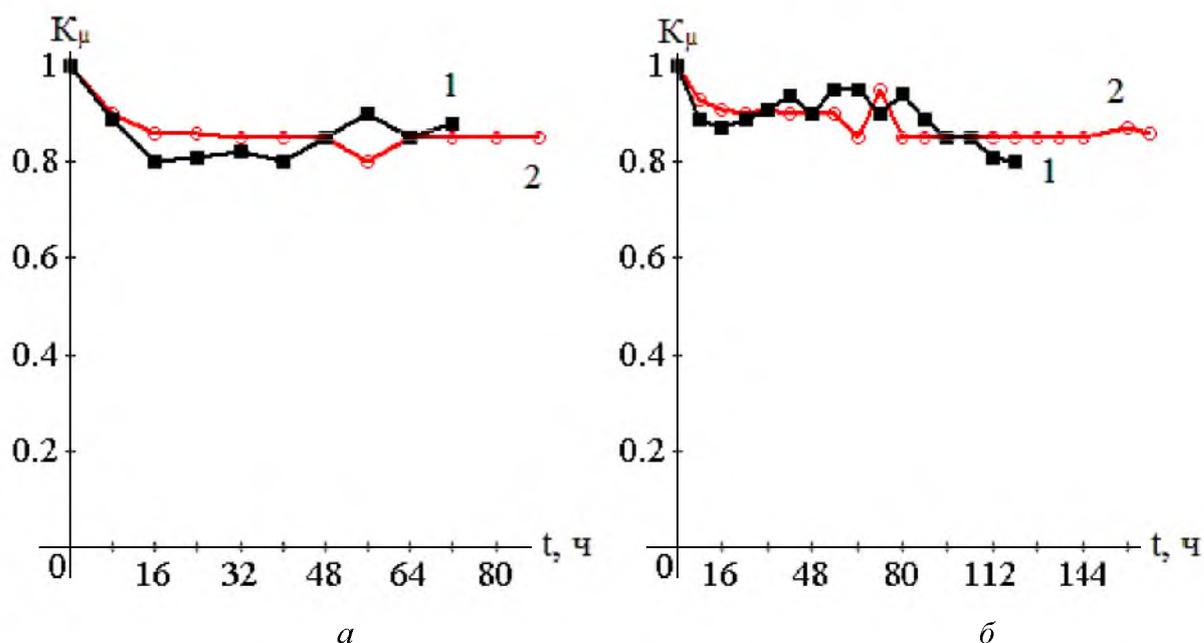


Рисунок 3.31 – Зависимости коэффициента относительной вязкости от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

На рисунке 3.32 представлены зависимости испаряемости от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.

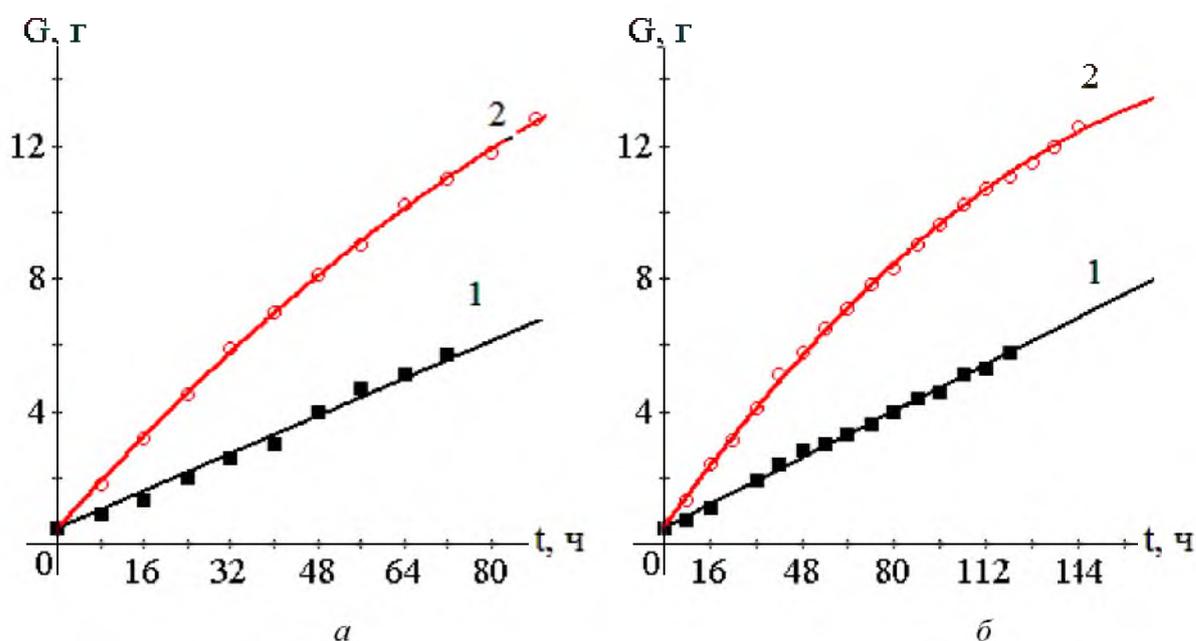


Рисунок 3.32 – Зависимости испаряемости от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Испаряемость масла (рисунок 3.32) значительно уменьшается при процессах температурной деструкции независимо от температуры испытания.

Так, за 72 ч испытания при температуре 180 °С (рисунок 3.18, а) испаряемость составила при окислении 11,0 г (кривая 2), а при температурной деструкции 5,7 г (кривая 1). Это объясняется тем, что при температурной деструкции масло не перемешивалось и контакт с кислородом воздуха практически отсутствовал. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.18, б) за 120 ч испаряемость составила при окислении 11,2 г (кривая 2), а при температурной деструкции 5,7 г (кривая 1).

Регрессионные уравнения зависимостей  $G = f(t)$  для синтетического моторного масла описываются полиномом второго порядка для процессов окисления и уравнением первого – при температуре испытания 180 °С для процессов температурной деструкции:

$$G_{\text{ок}} = -4,87 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,1822 \cdot t + 0,448 \quad (\text{кривая } 2), \quad (3.21)$$

$$G_{\text{д}} = 0,071 \cdot t + 0,467 \quad (\text{кривая } 1). \quad (3.22)$$

Коэффициент корреляции  $\approx 0,987$ .

При температуре испытания 170 °С:

$$G_{\text{ок}} = -2,598 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,12 \cdot t + 0,496 \quad (\text{кривая } 2), \quad (3.23)$$

$$G_{\text{д}} = 0,044 \cdot t + 0,492 \quad (\text{кривая } 1). \quad (3.24)$$

Коэффициент корреляции  $\approx 0,998$ .

По данным (рисунок 3.29–3.32) видно, что при термостатировании синтетического моторного масла изменяются оптические свойства, вязкость и испаряемость, поэтому в качестве показателя термоокислительной стабильности и температурной стойкости выбрана сумма оптической плотности и коэффициента испаряемости. Вязкость не является показателем термоокислительной стабильности и температурной стойкости, поскольку она зависит от оптических свойств продуктов старения, их концентрации и массы испарившегося масла при термостатировании. Показатели термоокислительной стабильности  $\Pi_{\text{ТОС}}$  и температурной стойкости  $\Pi_{\text{ТС}}$  определяются по формуле (3.5):

$$\Pi_{\text{ТС(ТОС)}} = D + K_G$$

Зависимости показателей термоокислительной стабильности и температурной стойкости от времени и температуры испытания представлены на рисунке 3.33.

Данные зависимости также имеют изгиб, подтверждающий образование в процессе окисления двух видов продуктов различной оптической плотности [1, 105].

Регрессионные уравнения зависимости  $\Pi_{\text{ТГОС}} = f(t)$  для масла ALPHA'S 5W-40 SN представлены в таблице 3.20.

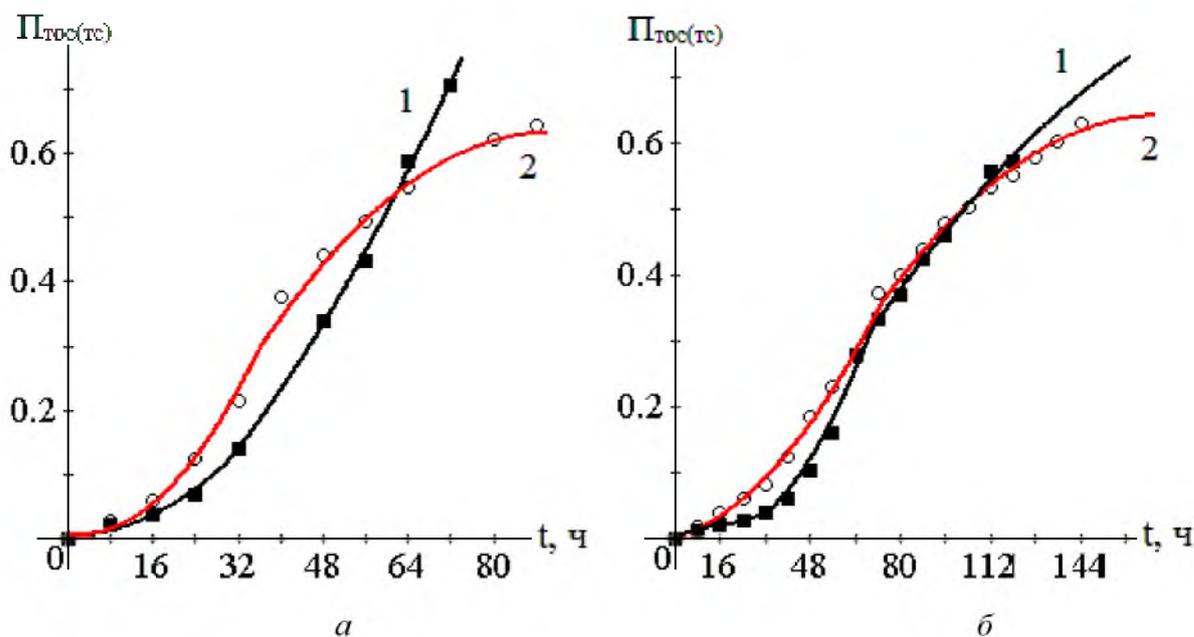


Рисунок 3.33 – Зависимости показателей температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN: *а* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Таблица 3.20 – Регрессионные уравнения зависимостей показателей температурной стойкости и термоокислительной стабильности от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Показатель	Участок	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Термоокислительная стабильность при 180 °С	Первый (t < 36ч)	$\Pi_{\text{ТГОС}} = 2,544 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,001 \cdot t + 0,008$	0,999
	Второй (t > 36ч)	$\Pi_{\text{ТГОС}} = -1,124 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,02 \cdot t - 0,293$	0,995
Температурная стойкость при 180 °С	Первый (t < 30ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 1,295 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 9,286 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,005$	0,999
	Второй (t > 30ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 8,776 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,005 \cdot t - 0,113$	0,999
Термоокислительная стабильность при 170 °С	Первый (t < 74ч)	$\Pi_{\text{ТГОС}} = 4,986 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,001 \cdot t + 0,003$	0,995
	Второй (t > 74ч)	$\Pi_{\text{ТГОС}} = -2,913 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,01 \cdot t - 0,222$	0,999
Температурная стойкость при 170 °С	Первый (t < 70ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = 9,801 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,002 \cdot t + 0,019$	0,995
	Второй (t > 70ч)	$\Pi_{\text{ТС}} = -1,76 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,008 \cdot t - 0,198$	0,996

Для подтверждения наличия явления перераспределения избыточной тепловой энергии рассмотрим зависимости приращений скоростей изменения оптической плотности  $\Delta V_D$  (рисунок 3.34) и испаряемости  $\Delta V_G$  (рисунок 3.35) от времени и температуры испытания синтетического моторного масла. Данные зависимости представляют ломаные линии, т. е. скорости изменения оптической плотности и испаряемости не постоянны из-за процессов перераспределения тепловой энергии между продуктами термостатирования и испарения [102; 104]. При увеличении скорости термостатирования  $\Delta V_D$  происходит уменьшение скорости испаряемости  $\Delta V_G$ .

Согласно данным (рисунок 3.34) установлена общая тенденция увеличения приращений скоростей процессов окисления и температурной деструкции в начальный период термостатирования (первый участок), однако интенсивность процессов окисления (кривая 2) ниже, чем процессов температурной деструкции. Такое увеличение приращения скоростей вызвано ростом концентрации продуктов окисления и деструкции в масле.

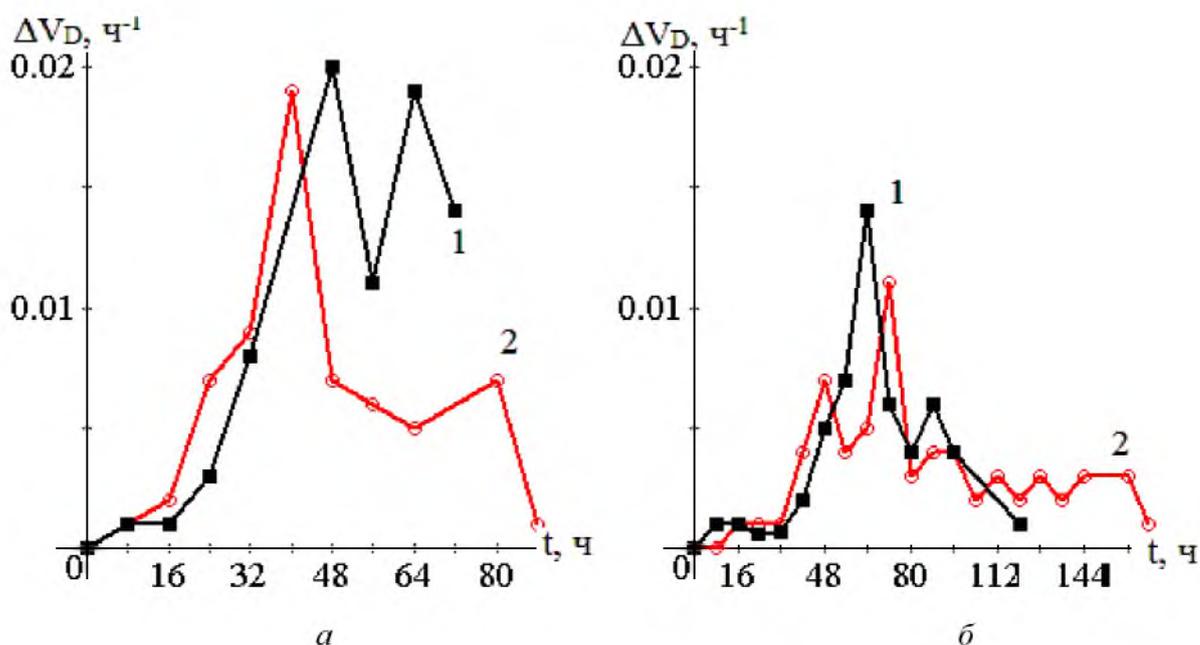


Рисунок 3.34 – Зависимости приращения скоростей температурной деструкции 1 и окисления 2 от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Вторые участки зависимостей  $\Delta V_D$  от времени испытания характеризуются значительными колебаниями приращения скоростей как процессов окисления, так и деструкции, что объясняется образованием продуктов этих процессов с большей энергоемкостью. В этот период времени испытания исследуемого масла первичные продукты, образующиеся в начальный период, концентрация которых непрерывно росла, переходят в более энергоемкие, требующие больше тепловой энергии для их образования, а так как выделяемая тепловая энергия постоянна, то время образования энергоемких продуктов увеличивается, вызывая уменьшение приращения скорости процессов

окисления и температурной деструкции. Переход первичных продуктов окисления и температурной деструкции в энергоемкие при температуре 180 °С наступают после 40 ч испытания. Переход первичных продуктов окисления в энергоемкие при температуре 170 °С наступает после 72 ч испытания, а первичных продуктов температурной деструкции – после 64 ч. Установлено, что с повышением температуры испытания увеличивается скорость, как процессов окисления, так и температурной деструкции.

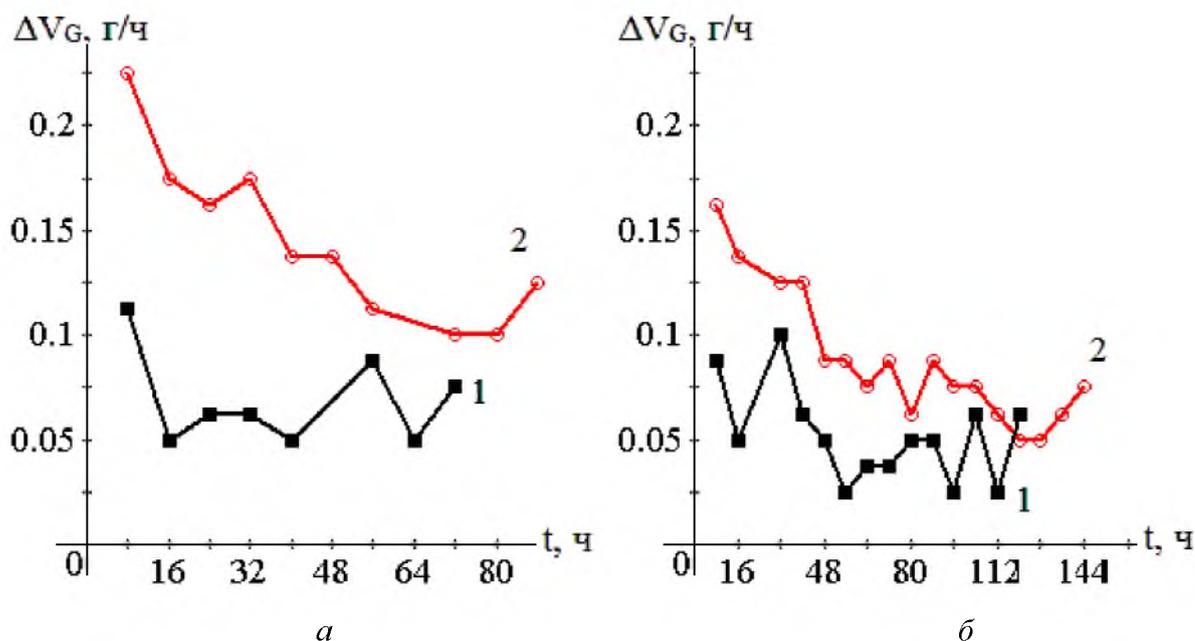


Рисунок 3.35 – Зависимости приращения скоростей испаряемости температурной деструкции 1 и окисления 2 от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN: *a* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Согласно данным (рисунок 3.35) установлена общая тенденция уменьшения приращений скоростей испаряемости при окислении и температурной деструкции, однако интенсивность процессов окисления (кривая 2) выше, чем процессов температурной деструкции. Такое уменьшение приращения скоростей испаряемости вызвано ростом концентрации продуктов окисления и деструкции в масле. Скорость испаряемости масла значительно ниже при процессах температурной деструкции (кривая 1) независимо от температуры испытания, но при окислении (кривая 2) скорость испаряемости снижается более интенсивно, чем при температурной деструкции. Так, за 80 ч испытания при температуре 180 °С (рисунок 3.35, *a*) скорость испаряемости снизилась при окислении (кривая 2) на 0,12 (55 %), а при температурной деструкции (кривая 1) – за 64 ч на 0,07 (60 %), а затем при температурной деструкции наблюдается повышение скорости испаряемости на 0,03. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.35, *б*) за 128 ч скорость испаряемости снизилась при окислении (кривая 2) на 0,112 (69 %), а при температурной деструкции (кривая 1) за 56 ч на 0,066 (76 %), а затем скорость испаряемости изменяется с колебаниями. Установлено, что с повышением температуры испытания

увеличивается скорость испаряемости, как процессов окисления, так и температурной деструкции.

Перераспределение избыточной тепловой энергии при переходе начальных продуктов термостатирования в более энергоемкие наблюдается при уменьшении скорости термостатирования. Данный процесс термостатирования является периодическим: в начале образуются менее энергоемкие продукты, а при достижении определенной концентрации часть переходит в более энергоемкие. Этот процесс характеризуется колебаниями концентраций продуктов термостатирования и периодическими увеличениями концентраций энергоемких продуктов термостатирования. Для оценки интенсивности процессов самоорганизации предложен коэффициент самоорганизации  $K_C$ , определяемый выражением (3.6) [101]:

$$K_C = \Delta V_D / \Delta V_G, \Gamma^{-1}.$$

Зависимости коэффициента самоорганизации (рисунок 3.36) представляют ломаные кривые, подтверждающие наличие перераспределения тепловой энергии. Установлено, что интенсивность коэффициента самоорганизации при температурной деструкции выше, чем при процессах окисления, независимо от температуры испытания.

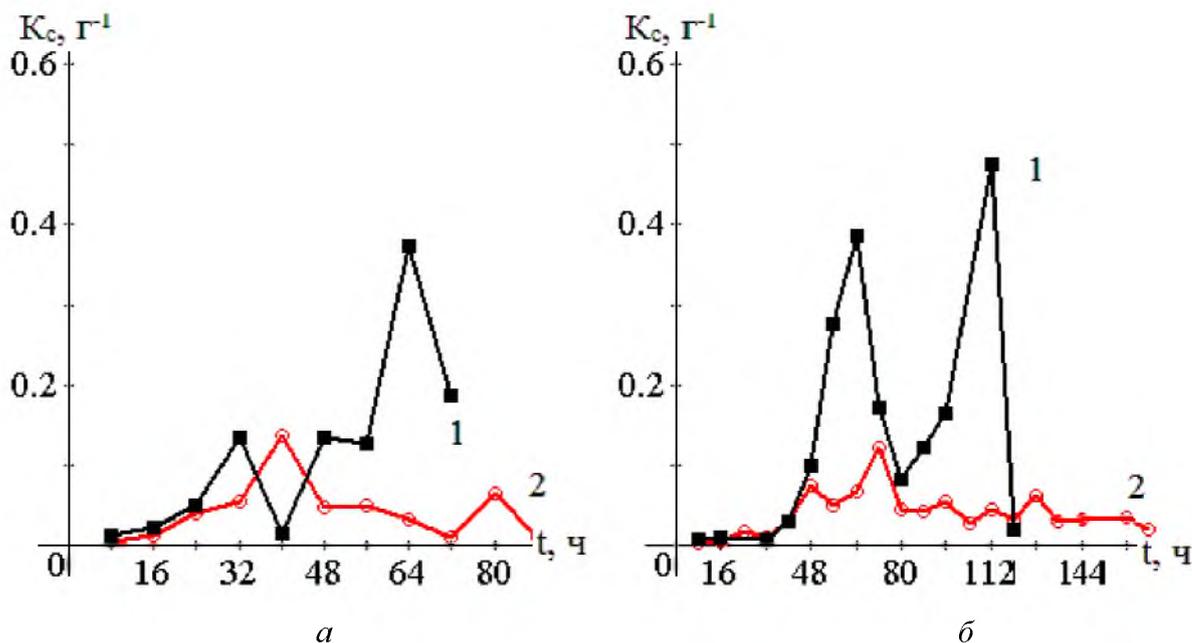


Рисунок 3.36 – Зависимости коэффициента самоорганизации от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: *a* – температура испытания  $180\text{ }^\circ\text{C}$ ; *b* – температура испытания  $170\text{ }^\circ\text{C}$

Важные эксплуатационных свойств масла является кинематическая вязкость, которая не является величиной постоянной, изменяется с изменением температуры и концентрации продуктов окисления, температурной дест-

рукции и других механических примесей, а также индекс вязкости – безразмерный показатель пологости вязкостно-температурной характеристики, рассчитываемый по значениям кинематической вязкости масла, измеренной при температурах 40 и 100 °С (ГОСТ 25371–82). Чем выше индекс вязкости, тем более пологая вязкостно-температурная характеристика [106]. Данные по изменению индекса вязкости ИВ от времени и температуры испытания представлены на рисунке 3.37.

Установлено (рисунок 3.37, а), что индекс вязкости синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN за 48 ч испытания ( $T=180$  °С) при окислении (кривая 2) снизился на 25 %, а при температурной деструкции (кривая 1) – на 20 % за 48 ч, а после при температурной деструкции наблюдается увеличение индекса вязкости на 10 %. При температуре испытания 170 °С (рисунок 3.37, б) индекс вязкости при температурной деструкции снизился на 19 % за 40 ч, а при окислении – на 25 % за 48 ч. После 72 ч при окислении и температурной деструкции наблюдается увеличение индекса вязкости на 25 и 12 % соответственно.

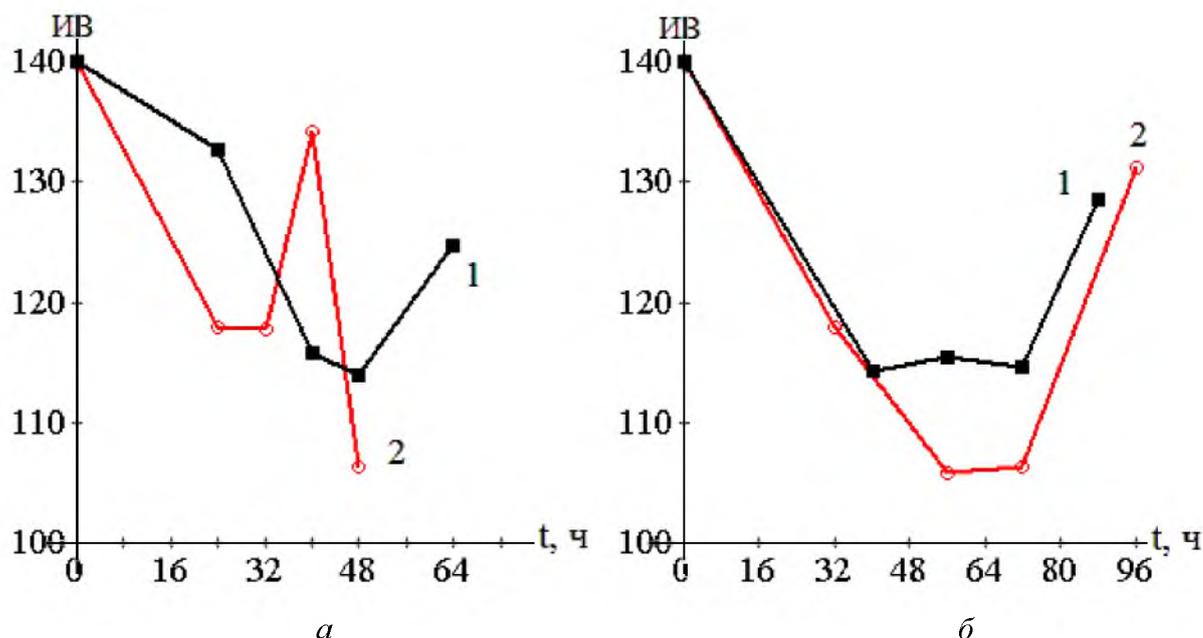


Рисунок 3.37 – Зависимости индекса вязкости от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Как упоминалось выше, в работе предложены альтернативные критерии термоокислительной стабильности и температурной стойкости, учитывающие индекс вязкости, определяемые по выражениям (3.7–3.8).

Зависимости критериев термоокислительной стабильности и температурной стойкости от оптической плотности представлены на рисунке 3.38. Данные зависимости  $K_{TC(TOC)} = f(D)$  описываются линейными уравнениями (см. формулу (3.9)) и представлены в таблице 3.21.

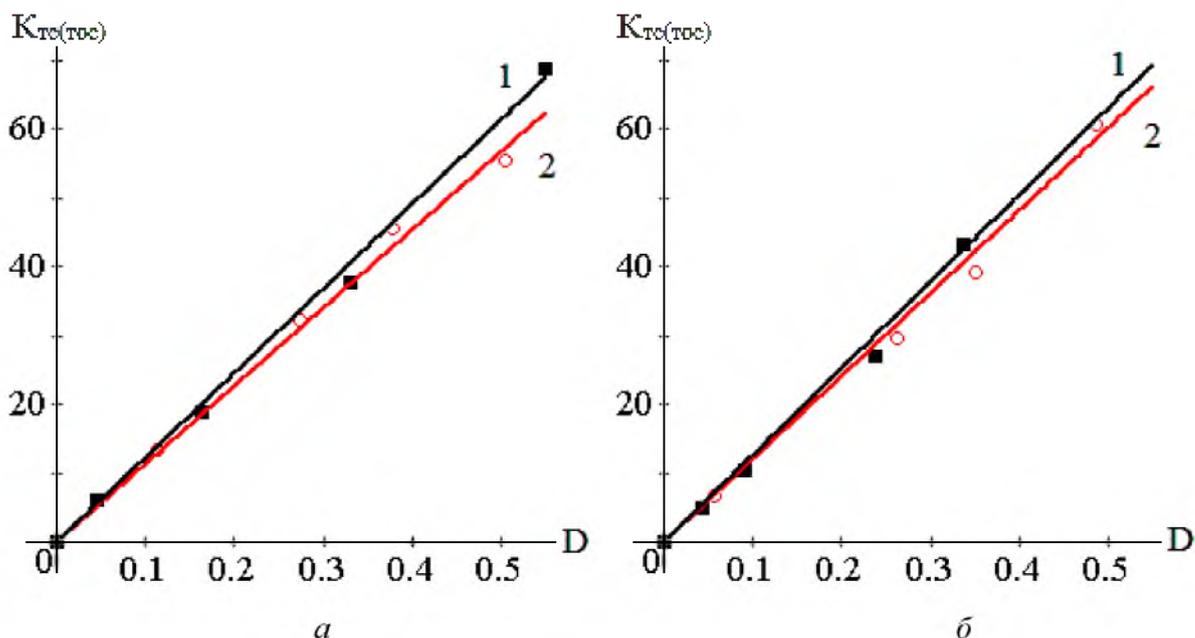


Рисунок 3.38 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от времени и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN: *a* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Согласно данным (рисунок 3.38) критерии термоокислительной стабильности ниже, чем критерии температурной стойкости, на 4 % при температуре испытания 170 °С и на 8 % при 180 °С.

Таблица 3.21 – Результаты регрессионного анализа зависимостей альтернативных критериев от оптической плотности синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Температура испытания, °С	Процесс термостатирования	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
170	Окисление	$K_{\text{ТОС}} = 120,459 \cdot D$	0,999
	Температурная деструкция	$K_{\text{ТС}} = 126,164 \cdot D$	0,999
180	Окисление	$K_{\text{ТОС}} = 113,498 \cdot D$	0,999
	Температурная деструкция	$K_{\text{ТС}} = 122,786 \cdot D$	0,999

Для определения доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции на свойства синтетического моторного масла предложен коэффициент доминирующего влияния  $K_{\text{ДВ}}$ , который рассчитывается, как отношение скоростей изменения критерия температурной стойкости к критерию термоокислительной стабильности (см. формулу (3.10))

Результаты вычисления доминирующего влияния одного из процессов сведены в таблицу 3.22.

Согласно данным (таблица 3.22) с повышением температуры испытания коэффициент  $K_{\text{ДВ}}$  увеличивается для синтетического моторного масла.

Кроме того, установлено, что продукты окисления уменьшают вязкостно-температурные характеристики синтетических масел.

Таблица 3.22 – Результаты вычисления коэффициента доминирующего влияния синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Температура испытания, °С	Значение $K_{дв}$
170	1,047
180	1,081

Влияние продуктов термостатирования на противоизносные свойства оценивалось по методике, описанной в п. 2.5 [107; 108]. Зависимости диаметра пятна износа от оптической плотности и температуры испытания представлены на рисунке 3.39.

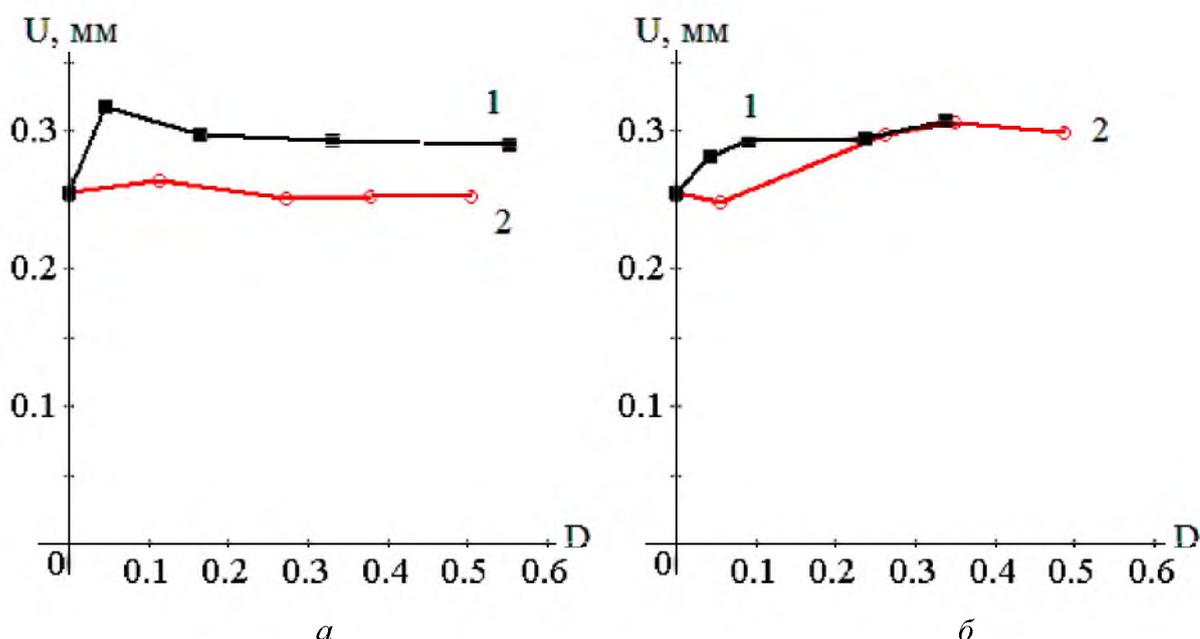


Рисунок 3.39 – Зависимости диаметра пятна износа от оптической плотности и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Общая закономерность изменения противоизносных свойств исследуемого моторного масла от увеличения концентрации продуктов термостатирования, выраженная оптической плотностью  $D$ , заключается в том, что независимо от температуры или процесса термостатирования противоизносные свойства понижаются. При температурной деструкции (кривая 1) противоизносные свойства снижаются на 28 % при температуре испытания 180 °С и на 16 % при 170 °С. При окислении (кривая 2) противоизносные свойства снижаются на 4 % при температуре испытания 180 °С и 20 % при 170 °С. Как отмечалось выше, период времени понижения и повышения противоизносных свойств зависит от соотношения состава растворимых и гелеобразных продуктов старения. Улучшение противоизносных свойств в течение испытания

объясняется тем, что продукты старения адсорбируются на поверхностях трения во впадинах, что создает гидравлические «подушки» и тем самым уменьшает износ. Поэтому концентрация продуктов старения на номинальной площади фрикционного контакта может служить критерием противоизносных свойств.

В работе для упрощения расчета в качестве критерия противоизносных свойств предложено выражение (3.11):

$$P_{\text{ПС}} = \frac{D}{U}, \text{ мм}^{-1}.$$

На рисунке 3.40 представлены зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности.

Установлено, что данные зависимости описываются линейными уравнениями согласно формуле (3.12)

$$P_{\text{ПС}} = \alpha_{\text{ПТС(ПТОС)}} D,$$

Регрессионные уравнения зависимостей критерия противоизносных свойств от оптической плотности представлены в таблице 3.23.

Согласно данным таблицы 3.23, противоизносные свойства при окислении превышают противоизносные свойства термостатированных масел в 1,16 раза при температуре 180 °С, а при 180 °С противоизносные свойства при температурной деструкции и окислении практически одинаковые.

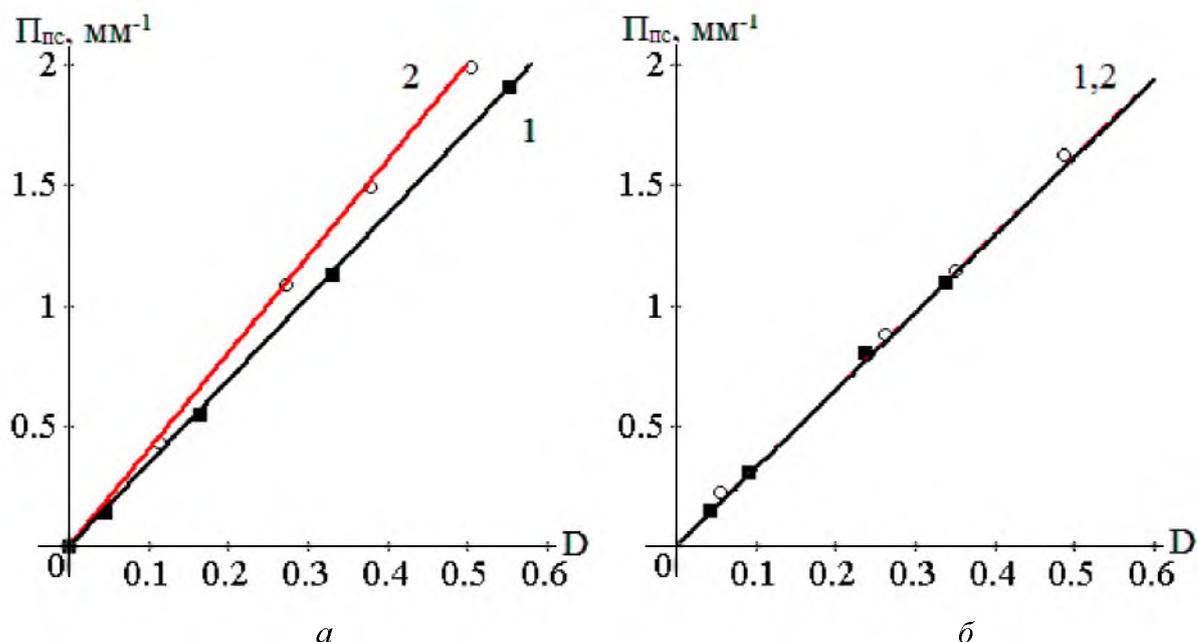


Рисунок 3.40 – Зависимости критерия противоизносных свойств от оптической плотности и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: *a* – температура испытания 180 °С; *б* – температура испытания 170 °С

Таблица 3.23 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критерия противоизносных свойств от оптической плотности синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$\Pi_{\text{ПС}} = 3,236 \cdot D$	0,997
Температурная деструкция		$\Pi_{\text{ПС}} = 3,231 \cdot D$	0,999
Окисление	180	$\Pi_{\text{ПС}} = 4,013 \cdot D$	0,999
Температурная деструкция		$\Pi_{\text{ПС}} = 3,456 \cdot D$	0,999

Для определения доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции на противоизносные свойства был предложен обобщенный показатель противоизносных свойств термостатированных масел, вычисляемый по формуле (3.13):

$$\text{ОППС} = \frac{\alpha_{\text{ПТС}}}{\alpha_{\text{ПТОС}}}$$

Результаты вычисления обобщенного показателя противоизносных свойств синтетического масла представлены в таблице 3.24.

Таблица 3.24 – Результаты вычисления обобщенного показателя противоизносных свойств синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Температура испытания, °С	Значение ОППС
170	0,999
180	0,861

Согласно данным (таблица 3.24) с повышением температуры испытания обобщенный показатель противоизносных свойств уменьшается для синтетического моторного масла. Кроме того, установлено, что с увеличением температуры испытания продукты окисления повышают противоизносные свойства синтетического моторного масла.

Для исследования связи между критерием температурной стойкости или термоокислительной стабильности  $K_{\text{ТС(ТОС)}}$  с критерием противоизносных свойств  $\Pi_{\text{ПС}}$  и температуры испытания моторного масла, построена зависимость между ними (рисунок 3.41).

Установлено, что данные зависимости описываются линейными уравнениями согласно формуле (3.14)

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

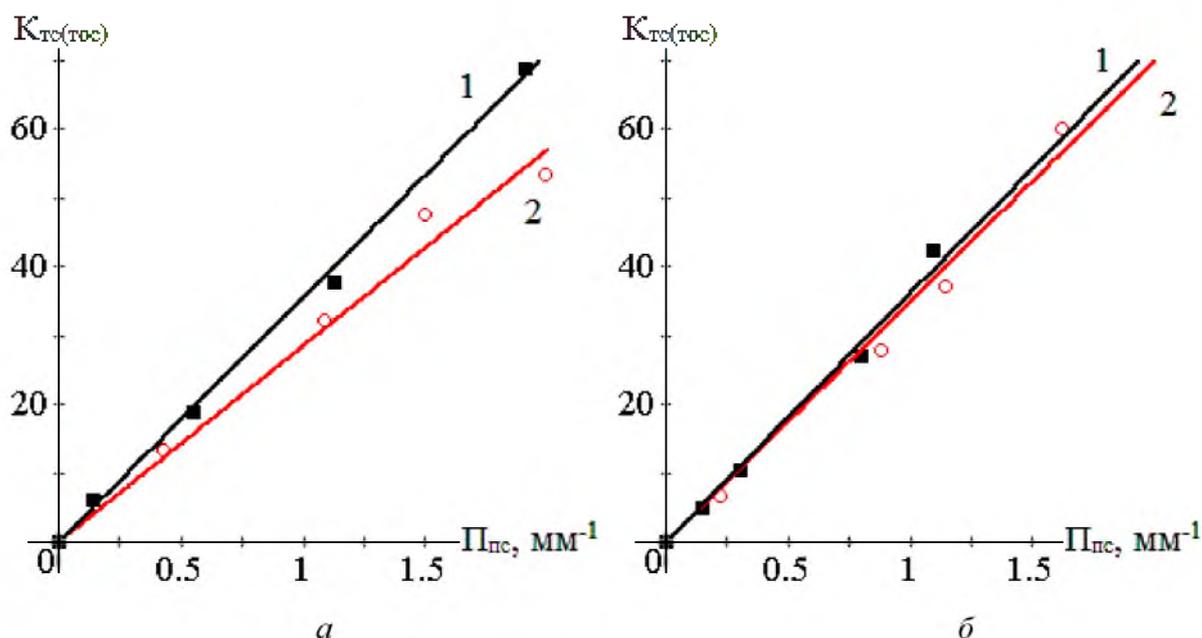


Рисунок 3.41 – Зависимости критериев температурной стойкости 1 и термоокислительной стабильности 2 от критерия противоизносных свойств и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Регрессионные уравнения зависимостей критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств представлены в таблице 3.25.

Установлено, что с повышением температуры испытания увеличивается различие между процессами окисления и температурной деструкции. Вязкостно-температурные характеристики процессов температурной деструкции преобладают над характеристиками процессов окисления. Противоизносные свойства выше при окислении, так как зависимость  $K_{ТC(ТОС)} = f(\Pi_{ПС})$  окисления расположена ближе к оси абсцисс.

Таблица 3.25 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от критерия противоизносных свойств синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$K_{ТОС} = 34,941 \cdot \Pi_{ПС}$	0,998
Температурная деструкция		$K_{ТC} = 36,169 \cdot \Pi_{ПС}$	0,999
Окисление	180	$K_{ТОС} = 28,513 \cdot \Pi_{ПС}$	0,999
Температурная деструкция		$K_{ТC} = 35,529 \cdot \Pi_{ПС}$	0,999

Предложенный в работе эмпирический критерий эксплуатационных свойств моторных масел  $K_{ЭС}$ , который учитывает концентрацию продуктов

термостирования, вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства и определяется по формуле (3.15):

$$K_{\text{ЭС}} = \frac{D \cdot \lg \text{ИБ}}{U}, \text{ мм}^{-1}$$

Зависимости критерия эксплуатационных свойств представлены на рисунке 3.42.

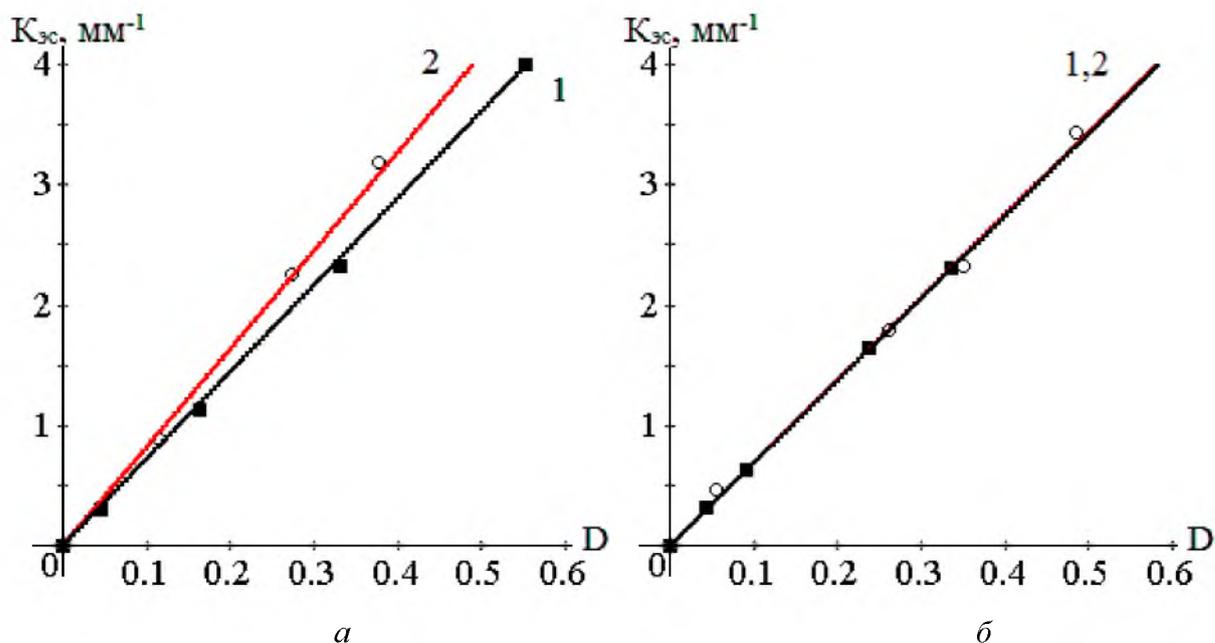


Рисунок 3.42 – Зависимости критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности и температуры испытания синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температурной деструкции 1 и при окислении 2: а – температура испытания 180 °С; б – температура испытания 170 °С

Установлено, что данные зависимости описываются линейными уравнениями согласно формуле (3.16):

$$K_{\text{ЭС}} = \alpha_{\text{ЭСТС(ЭСТОС)}} D.$$

Регрессионные уравнения зависимостей критерия эксплуатационных свойств от критерия противоизносных свойств представлены в таблице 3.26.

Согласно полученным данным при повышении температуры испытания критерий эксплуатационных свойств увеличивается при температурной деструкции на 5 % и при процессах окисления на 18 %. Лучшими эксплуатационными свойствами обладают синтетические моторные масла при окислении. Критерий эксплуатационных свойств при температуре испытания 170 °С при окислении превышает  $K_{\text{ЭС}}$  при процессах температурной деструкции в 1,001 раза, а при 180 °С – в 1,13 раза. Данный показатель следует учитывать при выборе синтетических моторных масел для двигателей.

Таблица 3.26 – Результаты регрессионного анализа зависимостей критерия эксплуатационных свойств от оптической плотности синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Процесс термостатирования	Температура испытания, °С	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
Окисление	170	$K_{эс} = 6,878 \cdot D$	0,999
Температурная деструкция		$K_{эс} = 6,876 \cdot D$	0,999
Окисление	180	$K_{эс} = 8,171 \cdot D$	0,999
Температурная деструкция		$K_{эс} = 7,222 \cdot D$	0,999

Для определения доминирующего влияния процессов окисления или температурной деструкции на основные эксплуатационные свойства моторных масел был предложен коэффициент влияния процессов  $K_{ВП}$  термостатированных масел (таблица 3.27), вычисляемый по формуле (3.17)

$$K_{ВП} = \frac{\alpha_{эстс}}{\alpha_{эстос}}$$

Результаты вычисления обобщенного показателя противоизносных свойств минерального масла сведены в таблицу 3.27.

Таблица 3.27 – Результаты вычисления коэффициента влияния процессов синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN

Температура испытания, °С	Значение $K_{ВП}$
170	0,999
180	0,883

Согласно данным (таблица. 3.27) с повышением температуры испытания коэффициент влияния процессов уменьшается для синтетического моторного масла.

### 3.4 Анализ результатов исследования моторных масел различной базовой основы, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств

Для сравнения качества моторных масел различных базовых основ, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств испытания проводились при одинаковых режимах окисления и температурной деструкции. *Результаты окисления моторных масел* сведены в таблицу 3.28. Сравнительная оценка масел при окислении осуществлялась по следующим показателям: потенциальному ресурсу при  $D = 0,5$  ед., коэффициенту относительной вязкости  $K_{\mu}$ , испаряемости, показателю термоокислительной стабильности

$\Pi_{\text{ТОС}}$ , индексу вязкости товарного масла и окисленного масла, критерию термоокислительной стабильности  $K_{\text{ТОС}}$ , параметру износа, критерию противоизносных свойств  $\Pi_{\text{ПС}}$ , критерию эксплуатационных свойств  $K_{\text{ЭС}}$ .

Согласно таблице 3.28, наименьший потенциальный ресурс при  $D=0,5$  установлен у минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурах испытания 170 и 180 °С. Наибольший потенциальный ресурс при  $D=0,5$  установлен у синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.

При окислении при 180 °С наименьшее изменение относительной вязкости моторных масел зафиксировано для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а наибольшее – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF. При окислении при 170 °С наименьшее изменение относительной вязкости моторных масел выявлено у частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а наибольшее – у минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL.

При окислении при 180 и 170 °С наибольшая испаряемость установлена для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а наименьшая – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF.

Минимальный показатель термоокислительной стабильности при 180 и 170 °С получен для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а максимальный – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL.

Самое высокое значение индекса вязкости для товарных масел установлено для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самым низким – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL. При окислении наименьшее изменение индекса вязкости моторных масел установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а наибольшее – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.

Самое высокое значение критерия термоокислительной стабильности получено для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF.

Самым высоким параметром износа обладает частично-синтетическое моторное масло Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самым низким – минеральное моторное масло ZIC HIFLO 10W-40 SL. Наименьшее изменение противоизносных свойств установлено для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а наибольшее – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при 170 °С, а для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при 180 °С.

Самое высокое значение критерия противоизносных свойств при окислении при 180 °С имеет синтетическое моторное масло ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – минеральное моторное масло ZIC HIFLO 10W-40 SL. Самое

высокое значение критерия противоизносных свойств при окислении при 170 °С установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а самое низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.

Самое высокое значение критерия эксплуатационных свойств при окислении выявлено для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при 170 °С и для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при 180 °С.

*Результаты термостатированных моторных масел* представлен в таблице 3.29. Сравнительная оценка масел при температурной деструкции производилась по следующим показателям: потенциальному ресурсу при  $D = 0,5$  ед., коэффициенту относительной вязкости  $K_{\mu}$ , испаряемости, показателю температурной стойкости  $\Pi_{TC}$ , индексу вязкости товарного масла и термостатированного масла, критерию температурной стойкости  $K_{TC}$ , параметру износа, критерию противоизносных свойств  $\Pi_{IC}$ , критерию эксплуатационных свойств  $K_{\Sigma C}$ .

Согласно таблице 3.29, наименьший потенциальный ресурс при  $D = 0,5$  установлен у минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при температурах испытания 170 и 180 °С, наибольший – у синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при температуре испытания 170 °С, а при температуре испытания 180 °С – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN и частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF.

При температурной деструкции при 180 и 170 °С наименьшее изменение относительной вязкости моторных масел выявлено у минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а наибольшее – у частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF.

При температурной деструкции при 180 и 170 °С наибольшая испаряемость установлена для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а наименьшая – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при 170 °С и для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при 180 °С.

Минимальный показатель температурной стойкости при 180 и 170 °С зафиксирован для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самый максимальный – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL.

Самым высоким значением индекса вязкости для товарных масел обладает синтетическое моторное масло ALPHA'S 5W-40 SN, а самым низким – минеральное моторное масло ZIC HIFLO 10W-40 SL. При температурной деструкции наименьшее изменение индекса вязкости моторных масел установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а наибольшее – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.

Таблица 3.28 – Результаты испытания моторных масел различных базовых основ, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств при окислении

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

Таблица 3.29 – Результаты испытания моторных масел различных базовых основ, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств при температурной деструкции

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

Самое высокое значение критерия температурной стойкости у синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – у минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL.

Самым высоким параметром износа обладает синтетическое моторное масло ALPHA'S 5W-40 SN, а самым низким – минеральное моторное масло ZIC HIFLO 10W-40 SL. Наименьшее изменение противоизносных свойств установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при 180 °С и для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при 170 °С, а наибольшее – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при обеих температурах.

Самое высокое значение критерия противоизносных свойств при температурной деструкции при 180 °С установлено для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL. Самое высокое значение критерия противоизносных свойств при температурной деструкции при 170 °С отмечено для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самое низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.

Самое высокое значение критерия эксплуатационных свойств при температурной деструкции 180 °С имеет минеральное моторное масло ZIC HIFLO 10W-40 SL, а самое низкое – частично-синтетическое моторное масло Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF. Самое высокое значение критерия эксплуатационных свойств при температурной деструкции при 170 °С установлено для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самое низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN.

*Сравнительная оценка преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции моторных масел* представлена в таблице 3.30 и производилась по следующим параметрам: коэффициенту доминирующего влияния  $K_{дв}$ , обобщенному показателю противоизносных свойств и коэффициенту влияния процессов  $K_{ВП}$ .

Если значения обобщенного показателя противоизносных свойств, коэффициентов доминирующего влияния или влияния процессов меньше 1, то преобладающее влияние на соответствующие критерии оказывают процессы окисления, а если больше 1, то – процессы температурной деструкции.

Самое высокое значение коэффициента доминирующего влияния при 180 °С установлено для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF и при 170 °С – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при обеих температурах.

Самое высокое значение обобщенного показателя противоизносных свойств при температуре 180 °С получено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL и при 170 °С установлено для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самое

низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при обеих температурах.

Таблица 3.30 – Сравнительная оценка преобладающего влияния процессов окисления или температурной деструкции масел различных базовых основ, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств

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

Самое высокое значение коэффициента влияния процессов при температуре 180 °С установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL и при 170 °С – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самое низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при обеих температурах.

### 3.5 Выводы по третьей главе

1. Установлен общий механизм окисления и температурной деструкции моторных масел различных базовых основ, классов вязкостей и групп эксплуатационных свойств, заключающийся в образовании при термостатировании вначале растворимых продуктов, переходящих в гелеобразные, причем вторые вызывают для большинства масел изгиб зависимостей оптической плотности  $D$  от времени или температуры испытания.

2. Процессы окисления и температурной деструкции характеризуются с физической точки зрения сбросом избыточной тепловой энергии, поглощаемой продуктами окисления (или деструкции) и испарения, что вызывает ее перераспределение между ними и обуславливает интенсивность процессов самоорганизации, протекающих в смазочном материале.

3. Доказано, что в начальный период термостатирования моторных масел интенсивность процессов окисления и деструкции практически одинакова и зависит от температуры, но после образования продуктов с большей

энергоемкостью процессы деструкции преобладают над процессами окисления.

4. Интенсивность процессов окисления и температурной деструкции предложено оценивать, соответственно показателями термоокислительной стабильности  $\Pi_{\text{ТОС}}$ , температурной стойкости  $\Pi_{\text{ТС}}$ , оптической плотности  $D$  и коэффициентом испаряемости  $K_G$ , характеризующими условную энергию, поглощенную смазочным материалом.

5. Влияние продуктов окисления и температурной деструкции на вязкость оценивалось коэффициентом относительной вязкости, определяемым отношением вязкости термостатированных масел к вязкости товарных.

6. Максимальный потенциальный ресурс при  $D = 0,5$  ед. установлен у синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN не зависимо от температуры испытания и процессов старения моторных масел.

7. Испаряемость моторных масел значительно уменьшается при процессах температурной деструкции независимо от температуры испытания и базовой основы масел.

8. Самые низкие показатели термоокислительной стабильности  $\Pi_{\text{ТОС}}$  и температурной стойкости  $\Pi_{\text{ТС}}$  установлены для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF не зависимо от температуры испытания, а самые максимальные – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL независимо от температуры испытания.

9. Предложены альтернативные критерии термоокислительной стабильности  $K_{\text{ТОС}}$  и температурной стойкости  $K_{\text{ТС}}$ , учитывающие индексы вязкости и продукты старения моторных масел. Самые высокие значения критериев термоокислительной стабильности и температурной стойкости установлены для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN независимо от температуры испытания, а самое низкое значение критерия термоокислительной стабильности – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF и самое низкое значение температурной стойкости – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL.

10. Предложен коэффициент доминирующего влияния  $K_{\text{ДВ}}$ , определяющий доминирующее влияние процессов окисления или температурной деструкции на критерий термоокислительной стабильности или температурной стойкости, который представляет собой отношением скоростей изменения данных критериев. Самое высокое значение коэффициента доминирующего влияния при 180 °C установлено для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF и при 170 °C – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при обеих температурах.

11. Предложен критерий противоизносных свойств  $\Pi_{\text{ПС}}$ , характеризующий условную концентрацию продуктов старения (в зависимости от оптической плотности) на номинальной площади фрикционного контакта. Са-

мое высокое значение критерия противоизносных свойств при температуре 180 °С установлено для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN независимо от процессов старения, а самое низкое – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL независимо от процессов старения. Самое низкое значение критерия противоизносных свойств при температуре 170 °С выявлено для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN независимо от процессов старения.

12. Предложен обобщенный показатель противоизносных свойств термостатированных масел, характеризующий доминирующие влияния продуктов температурной деструкции над продуктами окисления через отношение скоростей изменения условной концентрации продуктов температурной деструкции к изменению условной концентрации продуктов окисления на площади фрикционного контакта. Самое высокое значение обобщенного показателя противоизносных свойств при температуре 180 °С установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL и при 170 °С – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самое низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при обеих температурах.

13. Предложен эмпирический критерий эксплуатационных свойств  $K_{ЭС}$ , определяемый как отношение произведения оптической плотности окисленного масла на десятичный логарифм индекса вязкости к критерию противоизносных свойств, который позволяет комплексно оценить эксплуатационные свойства исследуемых масел и их отношение к группам эксплуатационных свойств по классификации API. Самое высокое значение критерия эксплуатационных свойств при температурной деструкции 180 °С установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL, а самое низкое – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF. Самое высокое значение критерия эксплуатационных свойств при температурной деструкции при 170 °С зафиксировано для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самое низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN. Самое высокое значение критерия эксплуатационных свойств при окислении – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN, а самое низкое – для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL при 170 °С и для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF при 180 °С.

14. Предложен коэффициент влияния процессов  $K_{ВП}$ , характеризующий доминирующие влияния продуктов температурной деструкции над продуктами окисления через отношение скоростей изменения эмпирического критерия эксплуатационных свойств температурной деструкции к изменению эмпирического критерия эксплуатационных свойств окисления. Самое высокое значение коэффициента влияния процессов при температуре 180 °С установлено для минерального моторного масла ZIC HIFLO 10W-40 SL и при 170

°C – для частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF, а самое низкое – для синтетического моторного масла ALPHA'S 5W-40 SN при обеих температурах.

## 4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО КОНТРОЛЮ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОТОРНЫХ МАСЕЛ

### 4.1 Технология контроля термоокислительной стабильности моторных масел различной базовой основы

Технология контроля термоокислительной стабильности моторных масел различной базовой основы (рисунке 4.1) предусматривает использование следующих средств контроля: прибора для определения термоокислительной стабильности, фотометра, малообъемный вискозиметра, электронных весов, техническая характеристика которых приведена во второй главе диссертации. Температурный интервал термостатирования моторных масел определяется их назначением и базовой основой. Для моторных масел он составляет от 170 до 180 °С.



Рисунок 4.1 – Схема метода контроля термоокислительной стабильности моторных масел различной базовой основы

Для исследования термоокислительной стабильности моторных масел в температурном интервале от 170 до 180 °С потребуется объем масла (200,0±0,1) г. Пробу масла массой (100,0±0,1) г заливают в прибор для определения термоокислительной стабильности и термостатируют в течение 8 ч с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. При каждой температуре испытывают новую пробу масла. После термостатирования пробу масла взвешивают на электронных весах, устанавливают массу испарившегося масла  $G$ , отбирают пробы для фотометрирования и определения оптической плотности  $D$ , измерения вязкости  $\mu$  при 40 и 100 °С и расчета индекса вязкости. По результатам измерения оптической плотности и испарения вычисляют показатель термоокислительной стабильности  $\Pi_{\text{ТОС}}$ , как сумму (см. формулу (3.5)):

$$П_{ТОС} = D + K_G$$

По полученным данным изменения оптической плотности, вязкости, летучести, показателю термоокислительной стабильности строятся зависимости от температуры термостатирования. По ним определяют температуры начала образования первичных, вторичных продуктов окисления и окончания процесса окисления, критическая температура, при которой вязкость достигает предельного увеличения на 35–40 %, либо уменьшения на 20 %.

Экспериментальные результаты по термоокислительной стабильности смазочных масел позволяют создать базу данных, которая даст возможность конструкторам техники обоснованно осуществлять выбор термостойких масел в зависимости от температурных условий работы трибосопряжений.

#### 4.2 Технология контроля температурной стойкости моторных масел различной базовой основы

Технология контроля температурной стойкости моторных масел различной базовой основы (рисунок 4.2) предусматривает использование следующих средств контроля: прибора для определения температурной стойкости, фотометра, малообъемного вискозиметра, электронных весов, техническая характеристика которых приведена во второй главе диссертации. Температурный интервал термостатирования моторных масел определяется их назначением и базовой основой. Для моторных масел он составляет от 170 до 180 °С.



Рисунок 4.2 – Схема комплексного метода контроля температурной стойкости моторных масел различной базовой основы

Для исследования температурной стойкости моторных масел в температурном интервале от 170 до 180 °С потребуется объем масла (200,0±0,1) г. Пробу масла массой (100,±0,1) г заливают в прибор для определения температурной стойкости и термостатируют в течение 8 ч без перемешивания. При каждой температуре испытывают новую пробу масла. После термостатирования пробу масла взвешивают на электронных весах, устанавливают массу испарившегося масла  $G$ , отбирают пробы для фотометрирования и определе-

ния оптической плотности  $D$ , измерения вязкости  $\mu$  при 40 и 100 °С и расчета индекса вязкости. По результатам измерения оптической плотности и испарения вычисляют показатель температурной стойкости  $\Pi_{TC}$  (см. формулу (3.5)):

$$\Pi_{TC} = D + K_G$$

По полученным данным изменения оптической плотности, вязкости, летучести, показателю температурной стойкости строят зависимости от температуры термостатирования. По ним определяют температуры начала образования первичных, вторичных продуктов деструкции и окончания процесса деструкции, критическую температуру, при которой вязкость достигает предельного увеличения на 35–40 %, либо уменьшения на 20 %.

Результаты исследования по температурной стойкости смазочных масел позволяют создать базу данных, которая даст возможность конструкторам техники обоснованно осуществлять выбор термостойких масел в зависимости от температурных условий работы трибосопряжений.

### **4.3 Технология контроля триботехнических свойств окисленных и термостатированных моторных масел**

Конструированию деталей машин и технологии машиностроения посвящено большое количество литературы, а вопросы смазки остаются практически в тени. В результате этого инженерно-технические работники машиностроения недостаточно осведомлены в научно-теоретических, практических вопросах смазки и о природе смазочного действия масел и особенностях их влияния на трение и износ деталей машин, что приводит к недооценке влияния масел на долговечность и работоспособность машин, неумению правильно назначать масло для конкретных случаев эксплуатации, а также формулировать требования на разработку нужного сорта масла.

Технология определения противоизносных свойств термостатированных смазочных масел (рисунок 4.3) предусматривает использование следующих средств контроля: приборов для определения температурной стойкости и термоокислительной стабильности, трехшариковой машины трения со схемой трения шар-цилиндр и микроскопа, техническая характеристика которых приведена во второй главе диссертации.

После термостатирования пробу масла испытывают на трехшариковой машине трения со схемой трения шар-цилиндр в течение 1,5 ч со следующими параметрами трения: нагрузка – 33 Н, скорость скольжения – 0,68 м/с, температура масла в объеме – 80 °С. Износ измеряют с помощью микроскопа. Противоизносные свойства масел определялись по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах из трех опытов.

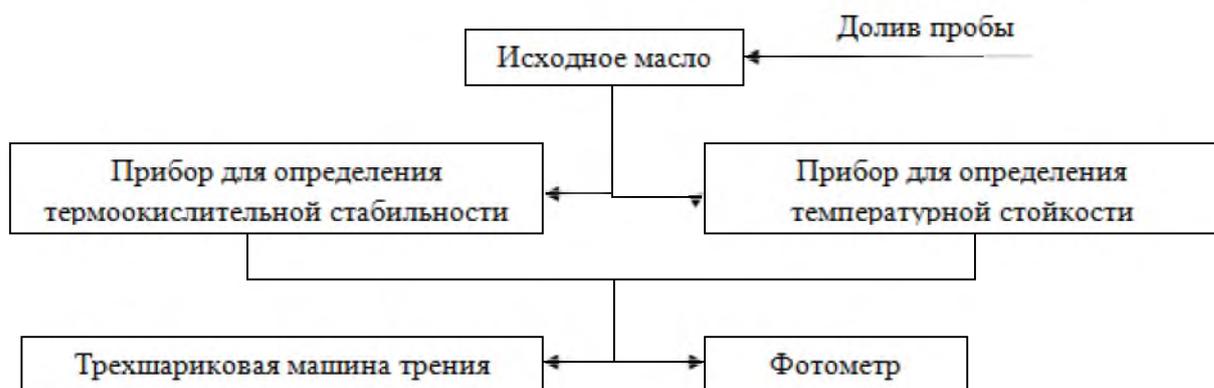


Рисунок 4.3 – Схема комплексного метода контроля противоизносных свойств термостатированных смазочных масел

По полученным данным изменения износа определялся критерий противоизносных свойств  $\Pi_{\text{ПС}}$ , характеризующий условную концентрацию продуктов старения на номинальной площади фрикционного контакта (см. формулу (3.11)):

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

Затем строят графические зависимости износа от температуры термостатирования и критерия противоизносных свойств от оптической плотности, по которым определяют температурные области работоспособности по параметру износа, температурный диапазон действия противоизносных присадок; противоизносные свойства – по углу наклона графической зависимости  $\Pi_{\text{ПС}} = f(D)$ .

Результаты по противоизносным свойствам смазочных масел дадут возможность сравнивать масла одного назначения и создать базу данных, которая позволит конструкторам техники обоснованно осуществлять выбор масел с наилучшими противоизносными свойствами в зависимости от температурных условий работы трибосопряжений.

#### 4.4 Технология контроля влияния продуктов окисления и температурной деструкции на вязкостно-температурные характеристики моторных масел

Технология предусматривает использование следующих средств контроля: приборов для определения температурной стойкости и термоокислительной стабильности, малообъемного вискозиметра, техническая характеристика которых приведена во второй главе диссертации.

После термостатирования отбирают пробу для измерения вязкости  $\mu$  при 40 и 100 °С и расчета индекса вязкости. По результатам измерения вязкости определяют критерии температурной стойкости  $K_{\text{ТС}}$  и термоокисли-

тельной стабильности  $K_{\text{ТОС}}$ , как произведения индекса вязкости и оптической плотности (см. формулы (3.7) и (3.8)):

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

Затем строят графические зависимости индекса вязкости от времени термостатирования и критериев температурной стойкости и термоокислительной стабильности от оптической плотности, по которым определяют температурные области работоспособности по вязкостно-температурным характеристикам, температурный диапазон действия вязкостно-температурных присадок; вязкостно-температурные характеристики - по углу наклона графической зависимости  $K_{\text{ТС(ТОС)}} = f(D)$ .

Результаты по вязкостно-температурным характеристикам моторных масел дают возможность сравнивать масла одного назначения и класса вязкости и создать базу данных, которая позволит конструкторам техники обоснованно осуществлять выбор масел с наилучшими вязкостно-температурными характеристиками в зависимости от температурных условий работы трибосопряжений.

#### **4.5 Технология определения преобладающего влияния продуктов окисления или температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел**

При осуществлении данной технологии применяются следующие средства измерения: прибор для определения температурной стойкости; прибор для определения термоокислительной стабильности; фотометр; малообъемный вискозиметр и трехшариковая машина трения.

*Для исследования термоокислительной стабильности* моторных масел в температурном интервале от 170 до 180 °С потребуется объем масла (200,0±0,1) г. Пробу масла массой (100,0±0,1) г заливают в прибор для определения термоокислительной стабильности и термостатируют в течение 8 ч с перемешиванием стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. При каждой температуре испытывают новую пробу масла. После термостатирования отбирают пробы для фотометрирования и определения оптической плотности  $D$ , измерения вязкости  $\mu$  при 40 и 100 °С и расчета индекса вязкости и испытывают на трехшариковой машине трения со схемой трения шар-цилиндр в течение 1,5 ч с параметрами трения: нагрузка –33 Н, скорость скольжения – 0,68 м/с, температура масла в объеме – 80 °С. Износ измерялся с помощью микроскопа. Противоизносные свойства масел определялись по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах из трех опытов.

*Для исследования температурной стойкости* моторных масел в температурном интервале от 170 до 180 °С потребуется объем масла (200,0±0,1)

г. Пробу масла массой  $(100,0 \pm 0,1)$  г заливают в прибор для определения температурной стойкости и термостатируют в течение 8 ч без перемешивания. При каждой температуре испытывают новую пробу масла. После термостатирования пробу масла взвешивают на электронных весах, определяют массу испарившегося масла  $G$ , отбирают пробы для фотометрирования и определения оптической плотности  $D$ , измерения вязкости  $\mu$  при 40 и 100 °С и расчета индекса вязкости, и испытывают на трехшариковой машине трения со схемой трения шар–цилиндр в течение 1,5 ч с параметрами трения: нагрузка – 33 Н, скорость скольжения – 0,68 м/с, температура масла в объеме – 80 °С. Износ измерялся с помощью микроскопа. Противоизносные свойства масел определялись по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах из трех опытов.

По полученным данным определяют: критерии температурной стойкости  $K_{TC}$  и термоокислительной стабильности  $K_{ТОС}$  (см. формулы (3.7) и (3.8)), критерий противоизносных свойств  $\Pi_{ИС}$  (см. формуле (3.11)) и критерий эксплуатационных свойств моторных масел  $K_{ЭС}$ , который учитывает концентрацию продуктов термостирования, вязкостно-температурные характеристики и противоизносные свойства (см. формулу 3.15).

Преобладающее влияние продуктов окисления или температурной деструкции:

- на вязкостно-температурные характеристики определяется отношением скоростей изменения критериев температурной стойкости  $K_{TC}$  и термоокислительной стабильности  $K_{ТОС}$ , названным коэффициент доминирующего влияния (см. формулу (3.10));
- на противоизносные свойства определяется отношением скоростей изменения критериев противоизносных свойств  $\Pi_{ИС}$ , названным обобщенным показателем противоизносных свойств (см. формулу (3.13));
- на основные эксплуатационные свойства моторных масел был предложен коэффициент влияния процессов  $K_{ВП}$  термостатированных масел (см. формулу (3.17)).

#### **4.6 Предложения по усовершенствованию существующей системы классификации моторных масел**

На рынке страны присутствует большой ассортимент моторных масел, как отечественных, так и импортных производителей, поэтому перед потребителем возникает проблема выбора смазочного материала необходимого качества. Существует риск приобрести дорогостоящий смазочный материал, не соответствующий рекомендованной группе эксплуатационных свойств. Применение этого материала может сократить срок службы объекта или целой системы, в которой использовался данный материал. Расходы на восстановление деталей и механизмов машин ежегодно возрастают. Затраты на ремонт

и техническое обслуживание техники в несколько раз превышают их стоимость: для тракторов это превышение установлено в 4 раза, автомобилей – в 6 раз, для станков – в 8 раз и более [110].

Настоящие рекомендации разработаны на основании проведенных исследований, представленных в третьей главе и предусматривают определение и применение показателей для идентификации смазочных материалов по классам вязкости и группам эксплуатационных свойств. В качестве показателей предлагаются: потенциальный ресурс, критерий противоизносных свойств, критерий термоокислительной стабильности, критерий температурной стойкости, критерий эксплуатационных свойств, использование которых позволит усовершенствовать существующую систему классификации масел, и коэффициент доминирующего влияния, обобщенный показатель противоизносных свойств, коэффициент влияния процессов, применение которых даст возможность усовершенствовать существующую систему контроля производства масел.

Часто у потребителей возникает вопрос о том, какими противоизносными свойствами обладает смазочный материал, как быстро (при каком пробеге) противоизносные свойства становятся неудовлетворительными и нужна замена масла. Дать ответы на такие вопросы позволяет метод, описанный в настоящей работе. Используя указанную приборную базу и порядок действий при испытаниях масла различного назначения, классов вязкости и групп эксплуатационных свойств возможно создание абсолютно нового банка данных, позволяющего более точно осуществлять подбор масел к различным двигателям, предоставляющего больше информации о масле.

Это дает возможность уточнить и упростить процедуру выбора моторных масел для конструкторов и технологов, проектирующих новые двигатели внутреннего сгорания.

#### **4.7 Выводы по четвертой главе**

1. Разработанные практические рекомендации позволяют: определить влияние продуктов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства и вязкостно-температурные характеристики моторных масел, выявить их потенциальный ресурс, что очень важно при выборе масел для квалификационных и моторных испытаний; усовершенствовать систему идентификации.

2. Применение средств контроля даст возможность установить предельное состояние моторных масел, обосновать его значение по противоизносным свойствам и параметрам индекса вязкости, организовать на предприятиях текущий контроль за состоянием работающих масел, снизить эксплуатационные затраты и улучшить надежность двигателей внутреннего сгорания путем прогнозирования противоизносных свойств моторных масел.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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

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

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

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

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

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондаков, Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л. А. Кондаков. – М. : Машиностроение, 1982. – 216 с.
2. Бакунин, В. Н. Молекулярная ассоциация в процессе жидкофазного окисления углеводородов / В. Н. Бакунин, О. А. Паренаго, Г. Н. Кузьмина // Россия. Хим. журнал. – 1997. – № 3. – С. 69–75.
3. Изменения структуры углеводородной среды в процессе жидкофазного окисления / В. Н. Бакунин, З. В. Попова, Э. Ю. Оганесова, Г. Н. Кузьмина // Нефтехимия. – 2001. – Т. 41, № 1. – С. 41–46.
4. Бакунин, В. Н. О роли мицеллообразования в реакциях высокотемпературного окисления углеводородов / В. Н. Бакунин, Г. Н. Кузьмина, О. П. Паренаго // Нефтехимия. – 1997. – Т. 37, № 2. – С. 99–104.
5. Венцель, С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С. В. Венцель. – М. : Химия, 1979. – 238 с.
6. Альтшулер, М. А. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания / М. А. Альтшулер – М. : Химия, 1979. – С. 45–48.
7. Резников, В. Д. Моторные масла: правильный выбор для спецтехники / В. Д. Резников // Спецтехника. – 2001. – № 1. – С. 8–9.
8. Резников, В. Д. Классификация и взаимозаменяемость отечественных и зарубежных моторных масел: / В. Д. Резников, А. И. Григорьев. – М. : УНИИ ТЭНефтехим, 1976. – 64 с. – тем. обзор. Сер. Переработка нефти.
9. Григорьев, М. А. Качество моторного масла и надежность двигателей / М. А. Григорьев, Б. М. Бунаков, В. А. Долецкий. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 238 с.
10. Арабян, С. Г. Масла и присадки для транспортных и комбайновых двигателей / С. Г. Арабян, А. Б. Виппер, И. А. Холомонов. – М. : Машиностроение, 1984. – 208 с.
11. Восстановление эксплуатационных свойств моторных масел. Теоретические предпосылки / В. А. Гуцин, В. В. Остриков, А. И. Гущина, В. В. Паутов // Химия и технология топлив и масел. – 1999. – № 1 – С. 24–25.
12. Черножуков, Н. И. Окисляемость минеральных масел / Н. И. Черножуков, С. Э. Крейн. – М. –Л. : Гостоптехиздат, 1995. – 372 с.
13. Химия минеральных масел / Н. И. Черножуков, С. Э. Крейн, Б. В. Лосиков [и др]. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – 417 с.
14. Непогодьева, А. В. Механизм окисления масла в поршневых двигателях / А. В. Непогодьева // Химия и технология топлив и масел. – 1997. – № 4. – С. 34–38.
15. Влияние условий жидкофазного высокотемпературного окисления гексадекана на механизм процесса / Э. Ю. Оганесова, Е. Г. Бордубанова, З. В. Попова [и др.] // Нефтехимия. – 2004. – Т. 44, № 2. – С. 119–126.
16. Условия формирования и свойства мицеллярной структуры продуктов окисления гексадекана, изученные методом солубилизации красителя

/ Э. Ю. Оганесова, В. Н. Бакулин, Е. Г. Бордубанова [и др] // Нефтехимия. – 2005. – Т. 45, № 4. – С. 294–300.

17. Большаков, Г. Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов / Г. Ф. Большаков. – Л. : Недра, 1974. – 318 с.

18. Большаков, Г. Ф. Физико-химические основы применения топлив и масел / Г. Ф. Большаков. – Новосибирск : Наука, 1987. – 207 с.

19. Зуидема, Г. Г. Эксплуатационные свойства смазочных масел / Г. Г. Зуидема. – М. : Гостоптехиздат, 1957. – 170 с.

20. 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.

21. Пинчук, Л. С. О некоторых возможностях поляризации пар трения / Л. С. Пинчук, А. С. Неверов, В. А. Гольдаде // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 6. – С. 1089–1092.

22. Шор, Г. И. Роль электрического потенциала твердой фазы при каталитическом старении масел в объеме и в тонком слое / Г. И. Шор, Н. Ф. Благовидов // Улучшение качества смазочных масел и присадок : труды ВНИИ НП. – М. : Химия, 1976. – Вып. XIV С. 128–138.

23. Коваленко, В. П. Загрязнения и очистка нефтяных масел / В. П. Коваленко. – М. : Химия, 1978. – 320 с.

24. Соколов, А. И. Изменения качества масел и долговечность автомобильных двигателей / А. И. Соколов. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1976. – 120 с.

25. Венцель, С. В. Смазка двигателей внутреннего сгорания / С. В. Венцель. – М. : Машгиз, 1963. – 180 с.

26. Розенберг, Ю. А. Эксплуатационные свойства смазочных материалов и их оценка / Ю. А. Розенберг // Вестн. машиностроения. – 1975. – № 8. – С. 42–49.

27. Полунин, В. Н. Исследование эксплуатационных свойств автомобильных масел и присадок к ним / В. Н. Полунин, С. Е. Павлихин, В. П. Дорфман // Использование смазочных материалов и присадок. Испытание. Применение. Перспективы (Спец. вып. жур. «Трение. Износ. Смазка»). – 2003. – Март. – 144 с.

28. Проблемы ингибирования высокотемпературного окисления углеводородов / О. П. Паренаго, Г. Н. Кузьмина, В. Н. Бакунин, [и др] // Нефтехимия. – 1995. – Т. 35, № 3. – С. 219–227.

29. Матвеевский, Р. М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов / Р. М. Матвеевский. – М. : Наука, 1971. – 227 с.

30. Мышкин, Н. К. К определению температурной стойкости граничных слоев / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц // Трение и износ. – 1981. – Т. 11, № 4. – С. 725–728.

31. Матвеевский, Р. М. Противозадирная стойкость смазочных средств при трении в режиме граничной смазки / Р. М. Матвеевский, И. Я. Буяновский, О. В. Лазовская. – М. : Наука, 1978. – 192 с.
32. А. С. 1525576 СССР, МКИ G 01 N 33/30. Способ определения термической стабильности смазочного масла / П. Ф. Григорьев, О. А. Лебедев ; заявитель и патентообладатель Гос. науч-исслед. ин-т граждан. авиации. – № 4089717 ; заявл. 07. 07. 1986; опубл. 30. 11. 1989, Бюл. № 44.
33. ГОСТ 23.221–84. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении. – Дата введ. 01.01.1986. – 12 с.
34. Пат. 2240558 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/30. Способ определения термической стабильности смазочного масла / Ковальский Б. И., Васильев С. И., Ковальский С. Б. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2003110308/12; заявл. 10.04.2003; опубл. 20.11.2004, Бюл. № 32.
35. Пат. 2366945 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Ковальский Б. И., Малышева Н. Н. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2008117201/04; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.
36. Пат. 2409814 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных материалов / Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н., Петров О. Н., Юдин А. В., Ромашенко А. С.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2009141423/15; заявл. 09.11.2009; опубл. 20.01.2011, Бюл. № 2.
37. Пат. 2415422 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/30. Способ определения температурной стойкости смазочных масел / Ковальский Б. И., Малышева Н. Н., Безбородов Ю. Н., Петров О. Н.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2009143446/15; заявл. 24.11.2009; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9.
38. А. С. 113465 СССР, МКИ G 01 N 33/30. Метод оценки термической стабильности смазочных масел / К. К. Папок; заявитель и патентообладатель К. К. Папок. – № 584056; заявл. 03. 10. 1957; опубл. 01. 01. 1958.
39. Исследование триботехнических характеристик пластичных железнодорожных смазок с неорганическими полимерными присадками / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, С. Б. Булгаревич [и др.] // Трение и износ. – 2008 (29). – № 3. – С. 261–267.
40. Клейменов, Б. В. Присадки к маслам / Б. В. Клейменов. – М. : Химия, 1966. – С. 228–236.
41. Заславский, Ю. С. Механизм действия противоизносных присадок к маслам / Ю. С. Заславский, Р. Н. Заславский. – М. : Химия, 1978.
42. Лашхи, В. Л. Противоизносные свойства моторных масел и методы их оценки / В. Л. Лашхи, В. В. Кулагин, А. Б. Виппер. – М. : ЦНИИТнефтехим, 1977. – С. 41–52.

43. Виноградова, И. Э. Противоизносные присадки к маслам / И. Э. Виноградова. – М. : Химия, 1971.
44. ГОСТ 20457–75. Масла моторные. Метод оценки антиокислительных свойств на установке ИКМ. – Дата введ. 01.01.1977. – 8 с.
45. ГОСТ 11063–77. Масла моторные с присадками. Метод определения стабильности по индукционному периоду осадкообразования. – Дата введ. 30.06.1979. – 3 с.
46. ГОСТ 23175–78. Масла моторные. Метод оценки моторных свойств и определения термоокислительной стабильности. – Дата введ. 01.01.1980. – 7 с.
47. ГОСТ 23797–79. Масла для авиационных газотурбинных двигателей. Метод определения термоокислительной стабильности в объеме масла. – Дата введ. 01.01.1981. – 7 с.
48. ГОСТ 981–75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления. – Дата введ. 30.06.1978. – 12 с.
49. ГОСТ 18136–72. Масла. Метод определения стабильности против окисления в универсальном приборе. – Дата введ. 01.01.1978. – 11 с.
50. А. С. 113465 СССР, МПК G 01 N 33/30. Метод оценки термической стабильности смазочных масел / К. К. Папок; заявитель и патентообладатель К. К. Папок. – № 584056; заявл. 03.10.1957; опубл. 01.01.1958, Бюл. № 2.
51. А. С. 135692 СССР, МПК G 01 N 33/28. Способ определения стабильности растворов присадок к маслам / Ю. С. Заславский, Г. Н. Шор, Е. В. Евстегнеев, Н. В. Дмитриева; заявители и патентообладатели Ю. С. Заславский, Г. Н. Шор, Е. В. Евстегнеев, Н. В. Дмитриева. – № 659570; заявл. 21.03.1960; опубл. 01.01.1961, Бюл. № 3.
52. А. С. 527660 СССР, МПК G 01 N 33/30. Способ определения свойств моторного масла / А. В. Непогодьеv, В. Г. Колупаев; заявитель и патентообладатель предприятие п/я Р-6711. – № 2134062; заявл. 06.05.1975; опубл. 05.09.1976, Бюл. № 33.
53. А. С. 744325 СССР, МПК G 01 N 33/28. Прибор для оценки термоокислительной стабильности масла / Е. П. Федоров, Н. Т. Разгоняев, В. В. Горячев, О. А. Запорожская; заявитель и патентообладатель предприятие п/я В-2504. – № 2610077; заявл. 19.04.1978; опубл. 30.06.1980, Бюл. № 24.
54. А. С. 179083 СССР, МПК G 01 N 33/28. Прибор для оценки эксплуатационных свойств моторных масел / Н. А. Сорокин, Ю. А. Суетин; заявитель и патентообладатель Научно исследовательский институт автомобильного транспорта. – № 914717; заявл. 29.07.1964; опубл. 01.01.1966, Бюл. № 4.
55. А. С. 1270701 СССР, МПК G 01 N 33/28. Прибор для определения стабильности и коррозионности смазочных масел / В. Ю. Кирсанов, Д. П. Якуба, Ю. В. Луньков, В. М. Колиевский; заявитель и патентообладатель Ивано-Франков. ин-т нефти и газа. – № 3794918; заявл. 25.09.1984; опубл. 15.11.1986, Бюл. № 2.

56. Пат. 2199114 Российская Федерация: МПК G 01 N 33/28. Прибор для оценки эксплуатационных моторных масел / Ковальский Б. И., Барков Д. Г., Ерашов Р. А., Васильев С. И.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т. – № 2001115919/28; заявл. 08.06.2001; опубл. 20.02.2003, Бюл. № 5.

57. А. С. 2057326 СССР, МПК G 01 N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б. И. Ковальский, Л. Н. Деревягина, И. А. Кириченко; заявитель и патентообладатель гос. проект. научно-исслед. и конструктор. ин-т "Красноярский ПромстройНИИпроект". – № 5046019/25; заявл. 04.06.1992; опубл. 27.03.1996, Бюл. № 9.

58. Пат. 2247971 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Васильев С. И., Безбородов Ю. Н., Бадьина А. А.; заявитель и патентообладатель Красноярский гос. техн. ун-т. – № 2004104761/28; заявл. 17.02.2004; опубл. 30.03.2005, Бюл. № 7.

59. Пат. 2274850 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Васильев С. И., Безбородов Ю. Н., Гаврилов В. В.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т. – № 2004126304/28; заявл. 30.08.2004; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11.

60. Пат. 2318286 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Даниленко В. С., Малышева Н. Н., Безбородов Ю. Н.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО "Орловский государственный аграрный университет" – № 2006146512/09; заявл. 25.12.2006; опубл. 27.02.2008, Бюл. № 27.

61. Пат. 2334976 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Малышева Н. Н., Метелица А. А., Безбородов Ю. Н.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т. – № 2006146732/28; заявл. 26.12.2006; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27.

62. Пат. 2371706 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Вишневская Е. А., Безбородов Ю. Н., Малышева Н. Н.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т. – № 2008115037/28; заявл. 16.04.2008; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30.

63. Пат. 2408886 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/30. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н., Юдин А. В., Ананьев Н. Н., Мальцева Е. Г.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет». – № 2009141424/28; заявл. 09.11.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

64. Lubricant Testing. Focussing on Mechanico-Dynamical tests, Edition 09/03, Klüber Lubrication München, Munich, 2003.

65. Трение, изнашивание и смазка : справочник: в 2-х кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.
66. ГОСТ 9490–75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. – Введ. 01.01.1978. – М., 1993. – 8 с.
67. А. С. 970190 СССР, МКИ G 01 N3/56. Способ оценки вида противоизносных свойств смазочных материалов на четырехшариковой машине трения / В. А. Михеев, К. А. Семенов,. Оpub. 30.10.1982, Бюл. № 40.
68. РД 50-531–85. Методические указания. Обеспечение износостойкости изделий. Метод экспериментальной оценки противоизносных свойств смазочных материалов при трении. – Ввод. в действие 01.01.1986. – М. : Госкомитет СССР по стандартам АН СССР, 1986. – 11 с.
69. А. С. 1270642 СССР, МКИЗ G01 N3/56. Способ оценки вида изнашивания поверхностей трения. /Б. И. Ковальский, Г. М. Сорокин, Бюл. № 42. 1. Оpubл. 15.11.1986.
70. А. С. 1315866 СССР, МКИ G 01 N3/56. Способ определения противоизносных свойств / Б. И. Ковальский, Г. М. Сорокин,. Оpubл. 07.06.1987, Бюл. № 21
71. А. С. 1315866 СССР, МКИ G01 N3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Н. Н. Титовский, Н. К. Мышкин, Б. И. Ковальский, Оpubл. 15.08.1991, Бюл. № 30.
72. Лосиков, Б. В. Зарубежные методы испытаний моторных масел на двигателях / Б. В. Лосиков, А. Б. Виппер. – М. : Химия, 1966. – 263 с.
73. Impact of engine oil degradation on wear and corrosion caused by acetic acid evaluated by chassis dynamometer bench tests / C. Besser, K. Steinschütz, N. Dorr, F. Novotny-Farkas, G. Allmaier // Elsevier: Wear. – 2014. – № 317. – С. 64–76.
74. Mang, T. Industrial tribology / T. Mang, K. Bobzin, T. Bartels. – Weinheim: Wear, 2010. – С. 491–494.
75. Useful information in scuffing load tests, // Edition 09/06, Klüber Lubrication München, Munich, 2006.
76. Кламанн, Д. Н. Смазки и родственные продукты / Д. Н. Кламанн. – М. : Химия, 1988. – 488 с.
77. ASTM D2509–14, Standard Test Method for Measurement of Load-Carrying Capacity of Lubricating Grease (Timken Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
78. ASTM D3233–93 (2014). Standard Test Methods for Measurement of Extreme Pressure Properties of Fluid Lubricants (Falex Pin and Vee Block Methods), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
79. Пат. № 2428677 Российская Федерация, МПК G 01 N 19/02. Устройство для испытания трущихся материалов и масел / Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н., Петров О. Н., Тихонов В. И.; заявитель и патентообла-

тель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2010119754/28; заявл. 17.05.2010; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25.

80. Моторные масла для автотракторных двигателей. Свойства. Классификация. Ассортиментные группы / А. С. Сафонов, А. И. Ушаков, В. А. Золотов, К. Д. Братчиков. – СПб. : НПИКЦ, 2004. – С. 181–192.

81. Термоокислительная стабильность трансмиссионных масел: монография / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Л. А. Фельдман, Н. Н. Малышева. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 150 с.

82. 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.: Техинформ, 1999. – 596 с.

83. Ковальский, Б. И. Прибор для анализа качества моторных масел двигателей внутреннего сгорания / Б. И. Ковальский, Н. А. Яворский // Механизация строительства и технологический транспорт: науч.-техн. реф. сб. Сер. 3, Вып. 4 Минтяжстроя СССР – М.: УБНТН, 1980.

84. А. С. 851111 СССР: МКИ G 01 J 1/04 / Фотометрический анализатор / Б. И. Ковальский, Г. М. Сорокин; заявитель и патентообладатель Проектный и науч.-исслед. ин-т «Красноярский ПРОМСТРОЙНИИПРОЕКТ». – № 2829562; заявл 23.10.1979; опубл. 30.07.1981, Бюл. № 28.

85. ГОСТ 25371–97. Нефтепродукты. Расчет индекса вязкости по кинематической вязкости. – Введ. 01.08.1999. – Минск, 1999. – 9 с.

86. Substantiation of optical criterions of thermal-oxidative stability of lubricating oil / B. I. Kovalski, V. A. Balyasnikov, D. V. Agrovichenko, V. Z. Oleynik, V. I. Afanasov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 87, Is. 8.

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

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

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

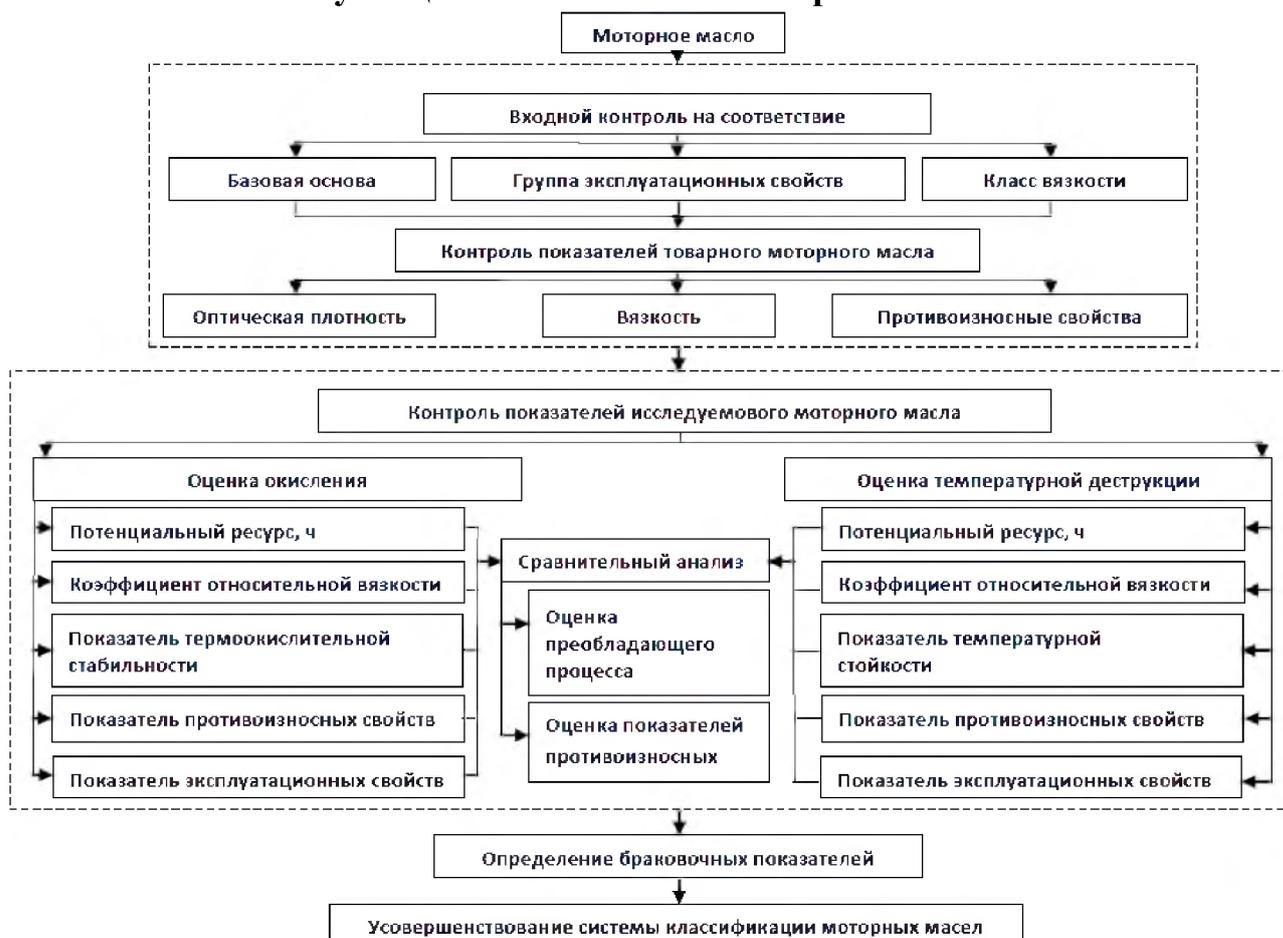
90. Оценка влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции частично-синтетического моторного масла Castrol Magnatec 10W-40 R SL/CF / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. А. Балясников // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 5. С. 99–106.

91. Оценка влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции синтетического моторного масла Alpha'S 5W-40 SN / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. А. Балясников // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 5. – С. 185–192.
92. Оценка влияния температуры на процессы окисления и температурной деструкции минерального моторного масла ZIC NIFLO 10W-40 SL / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. А. Балясников // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 6. – С. 67–74.
93. Оценка влияния процессов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. З. Олейник // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 6. – С. 214–222.
94. Влияние процессов окисления и температурной деструкции на вязкостно-температурные характеристики моторных масел / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, В. З. Олейник // Изв. ТулГУ. – 2017. – № 9. – Ч. 1. – С. 310–318.
95. Метод контроля термоокислительной стабильности моторных масел / Е. А. Ермилов, Б. И. Ковальский, В. З. Олейник, Н. С. Батов // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2017. – №4. – С. 130 – 134.
96. Алексеев Р. И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа / Р. И. Алексеев, Ю. И. Коровин. М. : Атомиздат, 1972. – 72 с.
97. Оценка влияния процессов окисления и температурной деструкции на противоизносные свойства моторных масел / Е. А. Ермилов, В. А. Балясников, В. З. Олейник, Д. В. Агровиченко // Тенденции науки и образования в современном мире. – Самара. – 2017. – №24-2. – С. 21–25.
98. Балясников, В. А. Сравнительная характеристика температурных пределов работоспособности масел и классами эксплуатационных свойств / В. А. Балясников, Е. А. Ермилов, В. З. Олейник // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения, Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», – 2017. – 310 с.
99. Пат. № 2650602, МПК G 01 N 25/12, G 01 N 33/30. Способ определения температурной области работоспособности смазочных материалов / Ковальский Б. И. , Безбородов Ю. Н. , Афанасов В. И. , Ермилов Е. А. , Батов Н. С. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». – № 2016150615; заявл. 21.12.2016; опубл. 16.04.2018, Бюл. № 11.
100. Пат. № 2637621, МПК G 01 N 25/00, G 01 N 33/30. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ермилов Е. А. , Ковальский Б. И. , Безбородов Ю. Н. , Петров О. Н. , Сокольников А. Н. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ «Сибирский федеральный университет». - № 2017117809; заявл. 22.05.2017; опубл. 05. 12. 2017, Бюл. № 34.
101. Пустильник, Е. Н. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. Н. Пустильник. – М. : Наука, 1968. – 288 с.

102. Зайдель, А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель. – М. : Наука, 1968. – 97 с.
103. Процессы самоорганизации в частично синтетических моторных маслах при их окислении / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, М. М. Рунда, А. В. Юдин [и др.] // Технология транспорта и хранения нефтепродуктов – 2011. – С. 64–67.
104. Самоорганизация вторичных структур при трении / И. С. Гершман, Н. А. Буше, А. Е. Миронов, В. А. Никифоров // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 3. – С. 329–334.
105. Гершман, И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 1. – С. 61–70.
106. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении / А. С. Кужаров, С. Б. Булгаревич, А. А. Кужаров, А. Кравчик // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 6. – С. 645–651.
107. Пат. 2219530 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б. И., Васильев С. И., Янаев Е. Ю.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т. – № 2002109501/28; заявл. 11.04.2002; опубл. 20.12.2003, Бюл. № 35.
108. Савин, И. Ф. Основы гидравлики и гидропривод / И. Ф. Савин. – М. : Высш. шк., 1978. – 222 с.
109. Ковальский Б. И. Методика исследования противоизносных свойств товарных моторных масел и механохимических процессов при граничном трении скольжения / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, С. Б. Ковальский и др. // Известия Томского политехнического университета. Т. 316, – № 2, – 2010. – С. 42–46.
110. Исследование связи процессов окисления смазочных материалов с их противоизносными свойствами / Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, А. А. Метелица [и др.] Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте: тр. IV Междунар. симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо–2010» / под общ. ред. С. Г. Чулкина и П. М. Лысенкова. – СПб. : Ломо-Инфроспен, 2010. – С. 86–91.
111. Трибология в работах В. А. Белого / Н. К. Мышкин, М. И. Петрокобец, Ю. М. Плескачевский [и др.] // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 3. – С. 230–235.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А. Схема метода контроля влияния процессов термоокисления и температурной деструкции на эксплуатационные свойства моторных масел





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2627562

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ  
СТОЙКОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Сибирский федеральный университет" (RU)*

Авторы: *Ковальский Болеслав Иванович (RU), Сокольников  
Александр Николаевич (RU), Ермилов Евгений Александрович  
(RU), Баясников Валерий Александрович (RU), Батов  
Николай Сергеевич (RU)*

Заявка № 2016127325

Приоритет изобретения 06 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 08 августа 2017 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 06 июля 2036 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2637621

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ  
СТАБИЛЬНОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Сибирский федеральный университет" (RU)*

Авторы: *Ковальский Болеслав Иванович (RU), Ермилов Евгений  
Александрович (RU), Безбородов Юрий Николаевич (RU),  
Петров Олег Николаевич (RU), Сокольников Александр  
Николаевич (RU)*

Заявка № 2017117809

Приоритет изобретения 22 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 05 декабря 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 22 мая 2037 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2650602

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБЛАСТИ  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Сибирский федеральный университет" (RU)*

Авторы: *Ковальский Болеслав Иванович (RU), Безбородов Юрий  
Николаевич (RU), Афанасов Владимир Ильич (RU), Ермилов  
Евгений Александрович (RU), Батов Николай Сергеевич (RU)*

Заявка № 2016150615

Приоритет изобретения 21 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 апреля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 21 декабря 2036 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

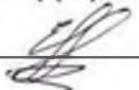
## Приложение В. Акты о внедрении результатов диссертационной работы



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

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы: МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ выполненной ЕРМИЛОВЫМ ЕВГЕНИЕМ АЛЕКСАНДРОВИЧЕМ Кафедра: ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЕ И ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИНСТИТУТА НЕФТИ И ГАЗА СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА внедрены в филиале «Аэронавигация Центральной Сибири» Вид внедренных результатов МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (работы, технологии) и др. Характеристика масштаба внедрения ВЫБОР МОТОРНЫХ МАСЕЛ С БОЛЕЕ ВЫСОКИМИ ПРОТИВОИЗНОСНЫМИ И ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ Форма внедрения ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ Новизна результатов научно-исследовательских работ КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ (принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок) Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ Внедрены: в промышленное производство в службе хозяйственного обеспечения и транспорта Годовой экономический эффект Ожидаемый — Фактический — Удельная экономическая эффективность внедренных результатов — Объем внедрения — что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР Социальный и научно-технический эффект ПРЕДОСТАВЛЕН МЕТОД, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ СРАВНИВАТЬ И ВЫБИРАТЬ МОТОРНЫЕ МАСЛА ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ СВОЙСТВАМ (ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ РЕСУРС, ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ И ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ)

От исполнителя  
Автор разработанного метода контроля

  
Ермилов Е.А.

Зав. кафедры ТОиГСМ  
Института нефти и газа  
Сибирского федерального университета  
Безбородов Ю.Н.

