

На правах рукописи

МЕТЕЛИЦА Артем Александрович

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ СТАЛИ 45
НА ПРОЦЕССЫ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ МАСЛА М-10-Г_{2к}**

Специальность:

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ковальский Болеслав Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Кашкин Валентин Борисович

кандидат технических наук, профессор
Назаров Григорий Георгиевич

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет»

Защита состоится «24» июня 2009 г. в 14-00 часов в ауд. УЛК 115 на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.05 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: 660074, Красноярск, Киренского, 26, ауд. Г2-74

Автореферат разослан «22» мая 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

_____ Е.А. Вейсов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надежность механической системы определяется процессами самоорганизации ее элементов, которые зависят от материалов трибосопряжений, смазочного материала и температур в зоне контакта. Роль смазочных масел в этих процессах изучена недостаточно, хотя известно, что от их качества зависят процессы формирования защитных слоев на поверхностях трения. Необходимо отметить, что такие свойства, как надежность и долговечность сложных трибосистем, определяются способностью смазочных материалов защищать трущиеся поверхности от износа, формировать тонкие, но прочные смазочные слои на поверхностях деталей, поэтому смазочный материал необходимо рассматривать как неотъемлемый элемент в любом трибосопряжении.

Большинство узлов механических систем работают в условиях граничной смазки, при которой металлический контакт трущихся тел предотвращается образованием на поверхностях трения граничных смазочных слоев различного происхождения. Известно, что кинетические модели граничной смазки включают три этапа: адсорбция молекул реагента на поверхностях трения; взаимодействия их с поверхностью твердого тела с образованием защитного модифицированного слоя; разрушение этого слоя с обнажением поверхности активированного металла, готового к дальнейшему взаимодействию с масляной средой.

Износостойкость материалов пар трения характеризуется их физико-механическими свойствами и структурой. Но сведения о совместимости сталей различной термообработки с жидкими смазочными материалами, базовой основой и комплектом присадок, практически отсутствуют. Известно, что на процессы формирования защитных слоев на поверхности твердых тел существенное влияние оказывает поверхностная энергия твердого тела, которая изменяется при различной термической обработке стали. Металлы и смазочный материал под действием температурной нагрузки, возникающей при трении, образуют на поверхности защитные адсорбционные, хемосорбционные и модифицированные слои (пленки), которые объясняются приспособляемостью трибосистемы к внешним воздействиям, определяемой интенсивностью процессов самоорганизации.

Совместимость элементов трибосистемы характеризует способность материалов пары трения и смазочного материала образовывать защитные слои на поверхностях трения, снижающие интенсивность изнашивания трущихся деталей. Для познания процессов самоорганизации, протекающих непосредственно на фрикционном контакте, необходимо создать адекватные модели, с помощью которых исследовать процессы, протекающие на поверхности твердого тела при взаимодействии со смазочной средой, и влияние твердого тела на изменение свойств самой среды. В связи с этим разработка моделей и обоснование параметров процессов самоорганизации элементов трибосистемы в статических условиях испытания является актуальной проблемой, имеющей научную и практическую значимость, решение которой позволит обоснованно осуществлять выбор совместимых элементов трибосистем и повысить надежность меха-

нических систем.

Цель диссертационной работы – разработать метод контроля и критерии оценки влияния углеродистой стали на параметры термоокислительной стабильности минерального масла.

Задачи исследования:

разработать методику исследования процессов самоорганизации в трибо-системах при статических условиях термостатирования ее элементов;

установить количественные показатели процесса термоокислительной стабильности минерального масла М-10-Г_{2К} и обосновать критерии оценки влияния стали 45 на процессы самоорганизации;

исследовать процесс образования защитных пленок на поверхности стали 45 при ее термостатировании в среде минерального масла;

разработать практические рекомендации по выбору сталей, совместимых со смазочным маслом.

Объект исследования – минеральное моторное масло М-10-Г_{2К}.

Предмет исследования – процессы самоорганизации при статических условиях термостатирования стали 45 различной термообработки в среде моторного минерального масла М-10-Г_{2К}.

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

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

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

На защиту выносятся:

методика исследования процессов самоорганизации в трибосистемах при статических условиях термостатирования на примере стали 45 (высокого, среднего и низкого отпуска) и минерального масла М-10-Г_{2К};

результаты экспериментальных исследований влияния стали 45 на термоокислительную стабильность минерального масла М-10-Г_{2К}.

результаты регрессионного анализа процессов самоорганизации при термостатировании минерального масла без и со сталью 45 (высокого, среднего и низкого отпусков);

имитационная модель процессов самоорганизации элементов трибосистем при испытании на термоокислительную стабильность;

критерии влияния стали 45 на термоокислительные процессы минерального масла М-10-Г_{2К}: температуры начала окисления и испарения масла, коэффициент тепловых преобразований, сопротивление смазочного масла тепловым воздействиям, интегральный и альтернативный критерии оценки влияния стали 45 на процессы самоорганизации в минеральном моторном масле.

Научная новизна основных результатов, полученных лично автором:

разработанная методика исследования процессов самоорганизации трибосистем при статических условиях термостатирования ее элементов, в отличие от существующих, позволяет отдельно определить параметры этих процессов в объеме смазочного масла и на поверхности твердых тел;

предложена имитационная модель процессов самоорганизации трибосистем, позволяющая определить количественные и качественные показатели изменения свойств смазочного масла и его сопротивляемость при тепловом воздействии;

полученные регрессионные уравнения процессов самоорганизации позволяют оценивать влияние стали 45 на термоокислительную стабильность минерального масла М-10-Г_{2К} и определять температурный диапазон работоспособности элементов трибосистем;

предложены новые интегральный и альтернативный критерии, позволяющие оценивать влияние стали на процессы самоорганизации в минеральном моторном масле М-10-Г_{2К} и осуществлять обоснованный выбор совместимых элементов трибосистем.

Практическая значимость работы. Разработана и внедрена методическая и экспериментальная база испытаний смазочных материалов, которая позволяет на стадии проектирования принять правильное решение по выбору совместимых элементов трибосистем.

Результаты диссертационной работы позволяют разработать организационно-технические мероприятия по эффективности использования моторных масел и обоснованному выбору в зависимости от условий эксплуатации и конструктивных особенностей сложных агрегатов.

Реализация результатов работы. Результаты исследований использованы в учебном процессе Института нефти и газа Сибирского федерального университета и на предприятиях: ООО «Технология», ООО «КраМЗ» и ОАО «Красноярское автотранспортное предприятие № 1».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на Всероссийской IV научно-практической конференции «Энергоэффективность жизнеобеспечения города» (Красноярск, 2006 г.); межрегиональной научно-практической конференции «Инновационное развитие регионов Сибири» (Красноярск, 2006 г.); Всероссийской VII научно-практической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, 2006 г.); Всероссийской научной конференции «Молодежь и наука – третье тысячелетие» (Красноярск, 2006); VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механики XXI века» (Братск, 2007 г.); Международной XI научной

конференция «Решетневские чтения» (Красноярск, 2007 г.); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития и эксплуатации поршневых двигателей в транспортном комплексе Азиатско-Тихоокеанского региона» (Хабаровск, 2008 г.); Всероссийской VII с международным участием научно-технической конференции «Механики XXI века» (Братск, 2008 г.); Международной XII научной конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 2008 г.) и Гомельской IV региональной конференции молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (Беларусь, Гомель, 2008 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, включая две работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, получено 2 патента РФ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 149 страниц, включая 120 страниц машинописного текста, 68 рисунков, 29 таблиц. Работа состоит из введения, 4 разделов, основных выводов, библиографического списка из 118 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен обзор исследований, в которых уделено внимание определению путей и возможностей повышения надежности и долговечности механических систем за счет обоснованного выбора материалов пар трения, способных формировать хемосорбционные защитные слои при взаимодействии с масляной средой. С этой целью выполнен анализ современных методов исследования процессов самоорганизации в трибосистемах. Установлено, что влияние базовой основы и комплекта присадок смазочных материалов на механизм формирования защитных слоев на поверхностях трения изучено недостаточно. Кроме того, отсутствуют ускоренные методы испытаний смазочных материалов по выявлению влияния их составных компонентов на металлы различных механических свойств. Классификация масел, а также их обозначение и принадлежность к определенной группе регламентированы ГОСТ 17479.1–85. В данном документе моторные масла разделены на классы вязкости, группы по назначению и уровню эксплуатационных свойств, что является единственной информацией для потребителей и разработчиков техники. Следует отметить, что стандарт не предоставляет информации о применении и совместимости смазочных материалов с конструкционными сталями, используемыми для изготовления деталей агрегатов и машин.

В режиме граничного трения, сопротивляемость изнашиванию и образованию задиров во многом определяется не только материалами трибосопряжений, но и свойствами смазочной среды. Поэтому выбор элементов трибосистем должен осуществляться с учетом их совместимости. Под совместимостью по-

нимают способность материалов пары трения приспосабливаться к внешним условиям эксплуатации. Роль смазочного материала в приспособляемости трибосистемы изучена недостаточно, но следует отметить, что от его качества зависят процессы формирования защитных слоев на поверхностях трения.

Смазочный материал, как элемент механической системы, существенно влияет на надежность всей системы, однако в процессе эксплуатации его свойства изменяются, поэтому установление критериев влияния продуктов окисления на формирование защитных граничных слоев на поверхностях твердых тел имеет научное и практическое значение. Изучение совместимости трущихся пар отражено в работах И.В. Крагельского, И.А. Буяновского, А.С. Кужарова, Ю.А. Розенберга, Н.А. Буше, Р.М. Матвеевского, Б.И. Костецкого.

Основным требованием к смазочным материалам является обеспечение износостойкости материалов пар трения в широком диапазоне нагрузок и температур, что достигается зачастую введением разного рода пакетов присадок, поэтому решение этой проблемы должно быть направлено на определение связи между механизмами старения смазочных материалов и их способностью формировать адсорбционные, хемосорбционные и модифицированные слои на поверхностях трения. Этому вопросу посвящены исследования А.А. Дерябина, Г.И. Фукса, Г.В. Кларка, Ф.П. Боудена, Д. Тейбора, В.Л. Лашхи.

Обзор проведенных исследований выявил отсутствие научно-обоснованного критерия оценки процессов самоорганизации смазочных материалов, а также их влияние на образование комплексных соединений на поверхностях трения. Установлено, что процессы самоорганизации, протекающие отдельно в смазочном материале и на поверхности твердых тел, изучены недостаточно.

Во второй главе представлена разработанная автором методика исследования процессов самоорганизации в трибосистемах, в статических условиях испытания ее элементов. Для достижения поставленной цели использовался специально разработанный прибор для определения термоокислительной стабильности смазочных материалов, позволяющий исследовать процессы самоорганизации, протекающие отдельно в масле и на поверхности твердых тел. Конструктивной особенностью прибора является использование стеклянного стакана и стеклянной мешалки для исключения влияния металлов на процессы окисления пробы смазочного масла. В стакан заливалось минеральное масло постоянной массы (100 ± 1 г) и в течение испытания перемешивалось стеклянной мешалкой, с постоянной частотой вращения 300 об/мин. Испытания проводились при температурах 150, 160, 170 и 180 °С, которые поддерживались автоматически. Продолжительность испытаний определялась временем достижения значений коэффициента поглощения светового потока, равного 0,7–0,8 ед.

В качестве вспомогательного оборудования использовались: спектрофотометр, вискозиметр и электронные весы. Через каждые пять часов испытания отбиралась проба масла для фотометрирования, измерения вязкости и летучести. Для определения различий в процессах самоорганизации, протекающих на поверхности твердого тела и в смазочной среде, сравнительные испытания проводились как для масляной среды, так и для масляной среды с твердым телом в выбранном диапазоне температур.

В качестве металлов (твердых тел) применялись образцы, выполненные из стали 45 (ГОСТ 2590–88) высокого (600 °С), среднего (400 °С) и низкого (200 °С) отпусков. Образцы выполнены в виде дисков диаметром 50 мм и толщиной 2 мм. Поверхности образцов шлифовались и перед испытанием обезжиривались. В качестве параметров оценки окислительных процессов минерального моторного масла приняты коэффициент поглощения светового потока, коэффициент относительной вязкости, коэффициент летучести и коэффициент влияния сталей на изменение этих параметров.

Для исследования выбрано минеральное моторное масло М-10-Г_{2К}. Результаты экспериментальных данных обрабатывались методами математической статистики и регрессионного анализа с использованием программ ЭВМ Eregre и Advanced Grapher. Приведены сведения об обосновании параметров испытания минерального моторного масла М-10-Г_{2К}, произведена оценка достоверности экспериментальных результатов, включающая среднее квадратическое отклонение, коэффициенты корреляции, коэффициенты регрессии и среднюю погрешность аппроксимации.

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований влияния стали различной термообработки на процессы самоорганизации. Получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения, обоснован критерий и предложен альтернативный вариант определения параметров процессов самоорганизации при термостатировании элементов трибосистемы.

Разработанная методика исследования предусматривает термостатирование смазочного материала без стали и со сталью, сравнительная оценка проб масел проводилась по коэффициенту поглощения светового потока $K_{\text{п}}$, коэффициенту относительной вязкости $K_{\text{в}}$ и летучести G .

Анализ зависимостей $K_{\text{п}}=f(t)$ показал, что влияние стали на окислительные процессы проявляется после определенного периода испытания, который увеличивается с уменьшением температуры испытания. С появлением кислых продуктов окисления на поверхности стали, проявляются хемосорбционные процессы, в результате которых поверхность образца покрывается химическими комплексными соединениями. Химические реакции всегда сопровождаются физическими эффектами: поглощением и выделением энергии в виде теплопередачи, изменением агрегатного состояния реагентов (изменение объема пробы смазочного масла), изменением окраски реакционной смеси, из-за чего оптические свойства масла изменяются более интенсивно.

При температуре 180 °С процессы окисления протекают настолько быстро, что влияние стали не установлено. С понижением температуры испытания эти процессы замедляются, увеличивается время испытания и действие стали проявляется более активно за счет сбрасывания в объем масла ультрадисперсных фрагментов продуктов реакции, изменяющих оптические и вязкостные свойства смазочного материала. По окончании испытания стальной образец вынимался из стакана и обезжиривался. Установлено, что на поверхности стали образуется плотный хемосорбционный слой, цвет которого зависит от температуры и времени испытания и изменяется от светло-коричневого до черного. На

рис.1 представлены поверхности образца стали 45 высокого отпуска, после испытания его в масляной среде в диапазоне температур от 180 до 150 °С.

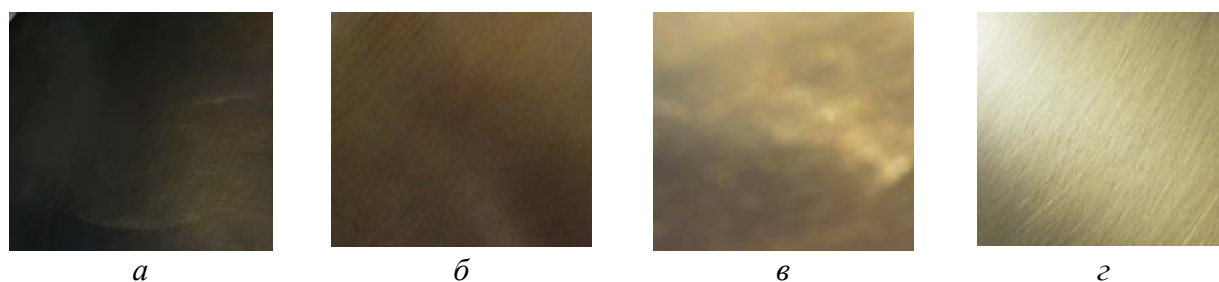


Рис. 1. Изменение цвета поверхности образца стали 45 (отпуск 600°С) при температурах окисления минерального моторного масла: *a* – 180 °С; *б* – 170 °С; *в* – 160 °С; *з* – 150 °С

Сравнительная оценка изменения оптических свойств при окислении товарного минерального масла без стали и со сталью 45 проводилась по изменению коэффициента поглощения светового потока $K_{\text{п}}$ от времени и температуры испытания. На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований при температурах 170 °С (*a*) и 150 °С (*б*). Установлено, что влияние стали на процессы самоорганизации не проявляется в начальный период времени, который для температуры 150 °С составляет 90 часов, а с повышением температуры он уменьшается. Изменение периода времени влияния стали объясняется особенностью хемосорбционного слоя на поверхности стали, состоящего из двух слоев, поэтому процессы самоорганизации при термостатировании стали в среде масла заключаются в первоначальном формировании хемосорбционного слоя, который в дальнейшем отслаивается в виде ультрадисперсных фрагментов и переходит в масляную среду, а на освободившейся микроповерхности формируется новый слой. Этим и объясняется механизм влияния стали на увеличение скорости окисления масла в присутствии стали.

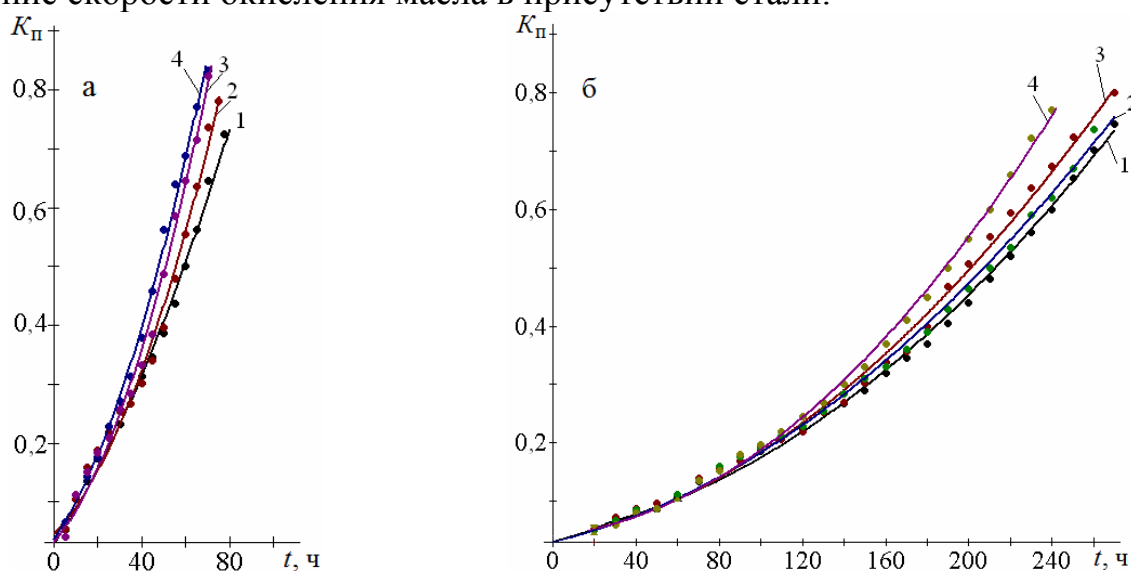


Рис. 2. Зависимость коэффициента $K_{\text{п}}$ от температуры и времени испытания моторного масла М-10-Г_{2К} при температурах испытания 170 °С (*a*) и 150 °С (*б*): 1 – товарное масло; 2 – со сталью 45 (отпуск 600 °С); 3 – со сталью 45 (отпуск 400 °С); 4 – со сталью 45 (отпуск 200 °С)

Регрессионные уравнения процесса окисления моторного масла имеют вид

$$K_{\Pi} = at^2 + bt + c, \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты, характеризующие склонность исследуемого масла к окислению; c – начальные оптические свойства масла.

Результаты регрессионного анализа сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты регрессионного анализа зависимостей $K_{\Pi}=f(t)$

°С	Наименование пробы	Уравнения регрессионного анализа
150	Товарное масло	$K_{\Pi} = 7,2524 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 6,1324 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,0413$
	Товарное масло + Ст 45 (отпуск 600 °С)	$K_{\Pi} = 6,8376 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 8,4875 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,03046$
	Товарное масло + Ст 45 (отпуск 400 °С)	$K_{\Pi} = 7,7004 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 8,104 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,0261$
	Товарное масло + Ст 45 (отпуск 200 °С)	$K_{\Pi} = 1,0875 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 3,892 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,0407$
170	Товарное масло	$K_{\Pi} = 4,02 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,00525 \cdot t + 0,0278$
	Товарное масло + Ст 45 (отпуск 600 °С)	$K_{\Pi} = 7,6939 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0036 \cdot t + 0,044$
	Товарное масло + Ст 45 (отпуск 400 °С)	$K_{\Pi} = 9,2915 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0042 \cdot t + 0,0309$
	Товарное масло + Ст 45 (отпуск 200 °С)	$K_{\Pi} = 8,7143 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,0051 \cdot t + 0,0359$
Коэффициент корреляции составил от 0,985 до 0,990		

Анализ регрессионных уравнений показал, что второй член уравнений характеризует скорость процесса окисления. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента поглощения светового потока от температуры испытания товарного минерального масла и масла со сталью 45 различной термообработки.

Влияние температуры испытания и стали 45 высокого, среднего и низкого отпусков, на окислительные процессы оценивалось при времени, равном 50 часам (рис. 3), что позволило установить температуру начала окисления и влияния стали на этот показатель. Аналогичная тенденция наблюдается при времени испытания: 10 и 30 часов. Показано, что сталь снижает температуру начала окисления на 10 °С.

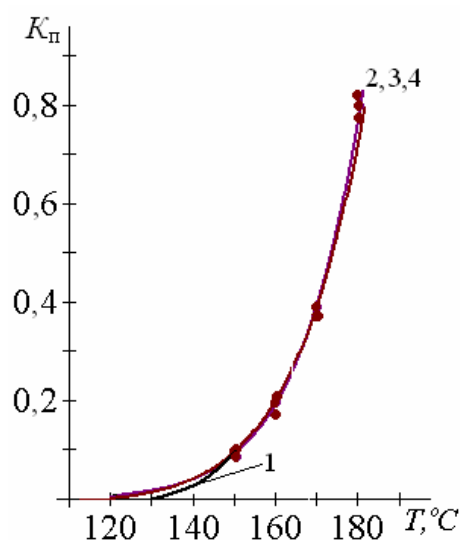


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения светового потока K_{Π} от температуры испытания моторного масла М-10-Г_{2К} при времени 50 часов (Усл. обозн. см. на рис. 2)

Изменение вязкости при окислении масла М-10-Г_{2К} без стали и со сталью (рис. 4) имеет общую тенденцию снижения в начальный период испытания, однако сталь оказывает большее влияние на снижение этого показателя, причем с

понижением температуры отпуска влияние стали уменьшается. Понижение вязкости может объясняться температурной деструкцией вязкостных присадок.

Минимальное значение вязкости установлено при коэффициенте $K_{\Pi} = 0,1$ ед. как для товарного масла, так и при испытании его со сталью. При значениях коэффициента $K_{\Pi} = 0,7$ ед. вязкость масла испытанного со сталью превышает вязкость товарного масла. Это объясняется наличием в масле продуктов окисления и ультрадисперсных фрагментов распада хемосорбционного слоя. Летучесть масла при термостатировании (рис.5) с уменьшением температуры отпуска стали 45 уменьшается, это объясняется увеличением поверхностной энергии стали и, как отмечается в работах Г.К. Борескова, ускорение реакции при гетерогенном катализе (металл в масляной среде) в большинстве случаев обуславливается тем, что энергия активации всех этапов нового реакционного пути, возникающего в результате поверхностного взаимодействия с катализатором, ниже энергии активации реакции в отсутствие катализатора.

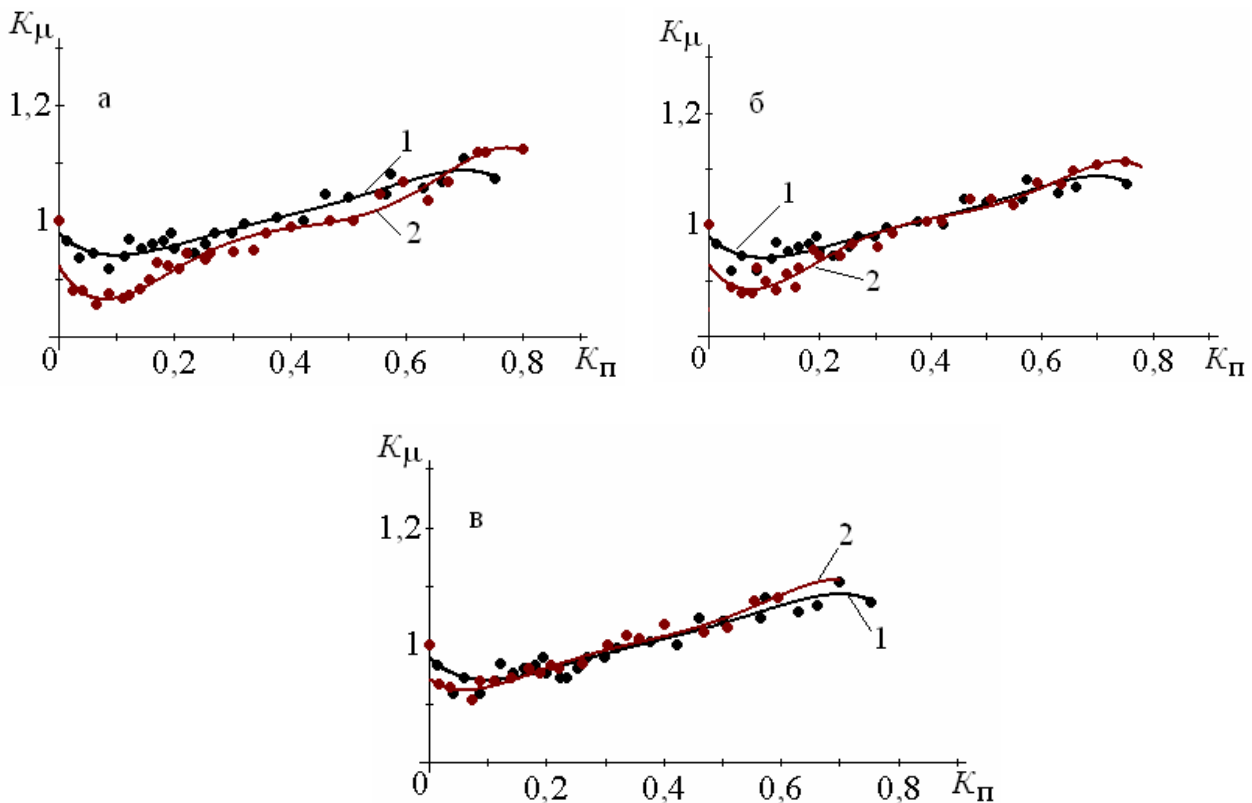


Рис. 4. Зависимость коэффициента относительной вязкости от коэффициента поглощения светового потока и температуры испытания моторного масла М-10-Г_{2К}: а – испытание масла со сталью 45 (отпуск 600 °С); б – со сталью 45 (отпуск 400 °С); в – со сталью 45 (отпуск 200 °С); 1 – товарное масло; 2 – масло со сталью

Процесс летучести описывается регрессионным уравнением второго порядка

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

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

Второй член регрессионного уравнения характеризует скорость испарения масла М-10-Г_{2К}, которая уменьшается с понижением температур отпуска стали 45 и испытания. Результаты регрессионного анализа сведены в табл. 2.

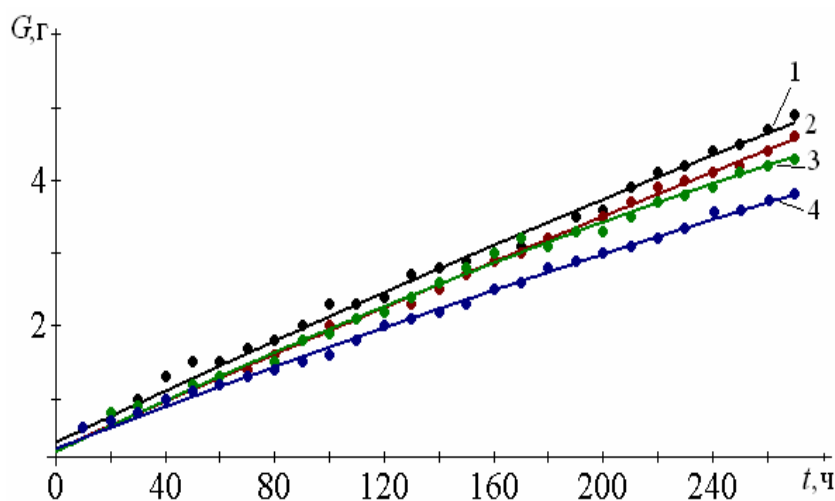


Рис. 5. Зависимость летучести от температуры и времени испытания моторного масла М-10-Г_{2К} при температуре испытания 150 °С (Усл. обозн. см. на рис. 2)

Таблица 2 – Результаты регрессионного анализа зависимостей $G=f(t)$

Наименование пробы	Уравнения регрессионного анализа
Товарное масло	$G = - 5,96 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,018t + 0,40$
Товарное масло + Ст 45 (отпуск 600 °С)	$G = - 2,92 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,017t + 0,30$
Товарное масло + Ст 45 (отпуск 400 °С)	$G = - 1,07 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,017t + 0,27$
Товарное масло + Ст 45 (отпуск 200 °С)	$G = - 5,99 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,015t + 0,31$
Коэффициент корреляции составил от 0,98 до 0,997	

Исследованиями термоокислительной стабильности показано, что процессы самоорганизации при термостатировании минерального масла М-10-Г_{2К} со сталью и без нее характеризуются химической реакцией между элементами трибосистем и превращением продуктов реакции: изменение оптических свойств, летучести и отслаивание фрагментов хемосорбционных слоев с поверхности раздела фаз.

Подводимая температурная нагрузка оказывает воздействие на смазочный материал, в результате чего происходит изменение его физико-химических свойств по двум направлениям: образование продуктов окисления и испарения, поэтому для количественной оценки процессов самоорганизации предложен коэффициент тепловых преобразований $E_{\text{п}}$, являющийся критерием термоокислительной стабильности и определяемый по формуле

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

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

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

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

Процесс самоорганизации в смазочном масле можно представить в виде имитационной модели (см. рис. 6). Данная модель показывает, что за счет тепловых преобразований внутренняя энергия смазочного масла уменьшается, а значит его сопротивляемость тепловым воздействиям также понижается. Понижение сопротивляемости R_c рассчитывается по формуле

$$R_c = \frac{K_{\Pi} \cdot K_G}{K_{\Pi} + K_G}, \quad (5)$$

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

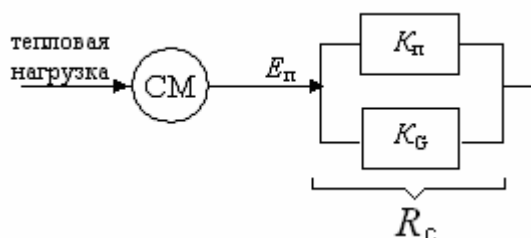


Рис. 6. Имитационная модель изменения внутренних свойств смазочного материала при тепловом воздействии (СМ – смазочный материал)

Зависимости коэффициента сопротивляемости тепловым воздействиям от времени и температуры испытания представлены на рис. 7. Данные зависимости имеют линейный характер

$$R_c = at + c, \quad (6)$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость изменения коэффициента сопротивляемости; c – коэффициент, характеризующий начальное сопротивление масляной среды, при котором начинается превращение продуктов реакции при тепловом воздействии.

Из представленных данных (рис. 7, *а* и *б*) видно, что сталь 45 (кривые 2, 3 и 4) снижает сопротивляемость окислению, а значит, увеличивает поток тепловых преобразований и наблюдается тенденция снижения сопротивляемости окислению с понижением температуры отпуска стальных образцов.

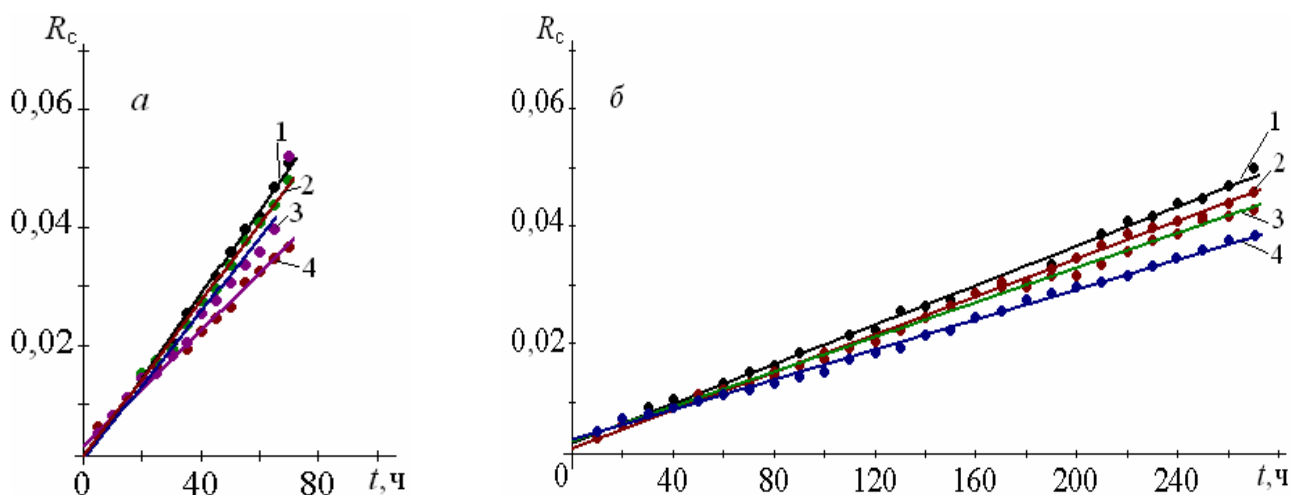


Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивляемости масла тепловым воздействиям от температуры и времени испытания моторного масла М-10-Г_{2К} (Усл. обозн. см. на рис. 2)

По результатам проведенных исследований (рис. 7) влияние металлов на процессы самоорганизации предложено оценивать интегральным критерием, названным коэффициентом влияния сталей, определяемого как отношение скоростей сопротивляемости тепловым воздействиям товарного масла и масла со сталью 45 по формуле

$$K_{KB} = V_{Rc} / V'_{Rc}, \quad (7)$$

где V_{Rc} – скорость сопротивляемости тепловым воздействиям товарного масла; V'_{Rc} – скорость сопротивляемости тепловым воздействиям масла со сталью.

Зависимость данного критерия представлена на рис. 8. Согласно данным, по изменению значений коэффициента K_{KB} от температуры испытания, установлены две характерных области, первая – до температуры 160 °С, вторая в диапазоне от 160 до 180 °С. В первой области (I) происходит преимущественно влияние стали на смазочный материал, а с повышением температуры испытания смазочный материал оказывает влияние на сталь путем образования на ее поверхности хемосорбционных слоев, область (II).

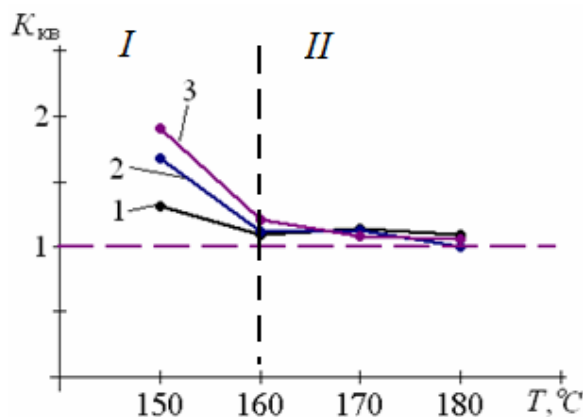


Рис. 8. Зависимость коэффициента влияния сталей различной термообработки от температуры испытания моторного масла М-10-Г_{2К}; 1 – образец из стали 45 (отпуск 600 °С); 2 – из стали 45 (отпуск 400 °С); 3 – из стали 45 (отпуск 200 °С)

Для получения количественного показателя влияния металлов на процессы самоорганизации минерального моторного масла, можно воспользоваться альтернативным вариантом (Пат. РФ № 2298173), используя уравнение (1), описывающее изменение коэффициента поглощения светового потока исследуемого смазочного материала. Влияние металлов на процессы самоорганизации, определялось интегрированием регрессионных зависимостей $K_{\Pi} = f(t)$ (рис. 9), ограниченных по ординате значением коэффициента поглощения светового потока равного $K_{\Pi} = 0,5$. Таким образом, площадь, ограниченная кривыми зависимостей коэффициента поглощения светового потока определяется из выражения

$$S_{K_{\Pi}} = \int_{t_{in}}^{t_{к}} (at^2 + bt + c) dt, \quad (8)$$

Пределы интегрирования выбирались для каждой из исследуемых температур следующим образом: нижним пределом интегрирования является время

начала окислительных процессов, верхним – время, при котором, коэффициент поглощения светового потока достигает значения 0,5 ед.

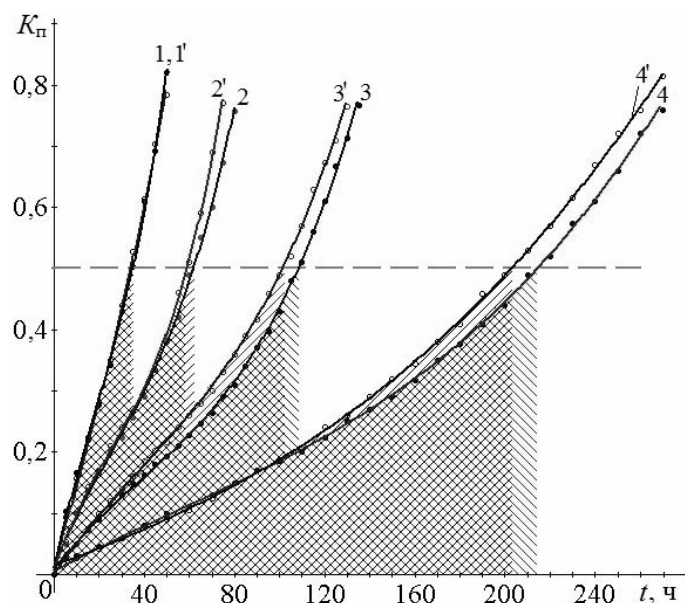


Рис. 9. Зависимость коэффициента $K_{п}$ от температуры и времени испытания при значении $K_{п} = 0,5$; 1-4 – товарное масло М-10-Г_{2К} при температурах соответственно 180, 170, 160, 150 °С; 1'-4' – то же, со сталью 45 (отпуск 600 °С)

Влияние металлов на процессы самоорганизации смазочного масла определялось коэффициентом влияния стали $K_{к.в}$ по выражению

$$K_{к.в} = S_{K_{п.т}} / S_{K_{п.к}}, \quad (9)$$

где $S_{K_{п.т}}$ – площадь, ограниченная кривой зависимости коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ от времени испытания товарного смазочного материала без стали; $S_{K_{п.к}}$ – площадь, ограниченная кривой зависимости коэффициента поглощения светового потока $K_{п}$ от времени испытания товарного смазочного материала, со сталью.

По представленной выше формуле определялся количественный показатель влияния стали на окислительные процессы, протекающие в смазочном материале. Установлено, что при значении $K_{к.в} > 1$, процесс окисления моторного масла М-10-Г_{2К} ускоряется.

При проведении пятикратных испытаний товарного минерального моторного масла со сталью 45 и при соответствующей математической обработке полученных экспериментальных данных для определения интегрального критерия влияния стали 45 на процессы самоорганизации двумя способами, установлено, что альтернативный вариант обладает большей точностью, и погрешность не превышает 2 %. Но оба предложенных способа позволяют достоверно оценить влияние твердого тела на процессы самоорганизации в минеральном моторном масле.

В четвертой главе представлены технологии, включающие определение параметров влияния сталей на процессы самоорганизации смазочных масел, температурной области применения элементов трибосистем, критериев влияния

сталей на термоокислительную стабильность смазочных материалов, практические рекомендации позволяющие осуществлять обоснованный выбор конструкционных сталей, совместимых со смазочными материалами на этапе проектирования.

На рис. 10 представлена блок-схема технологий определения влияния сталей на процессы самоорганизации смазочных материалов в статических условиях испытания.

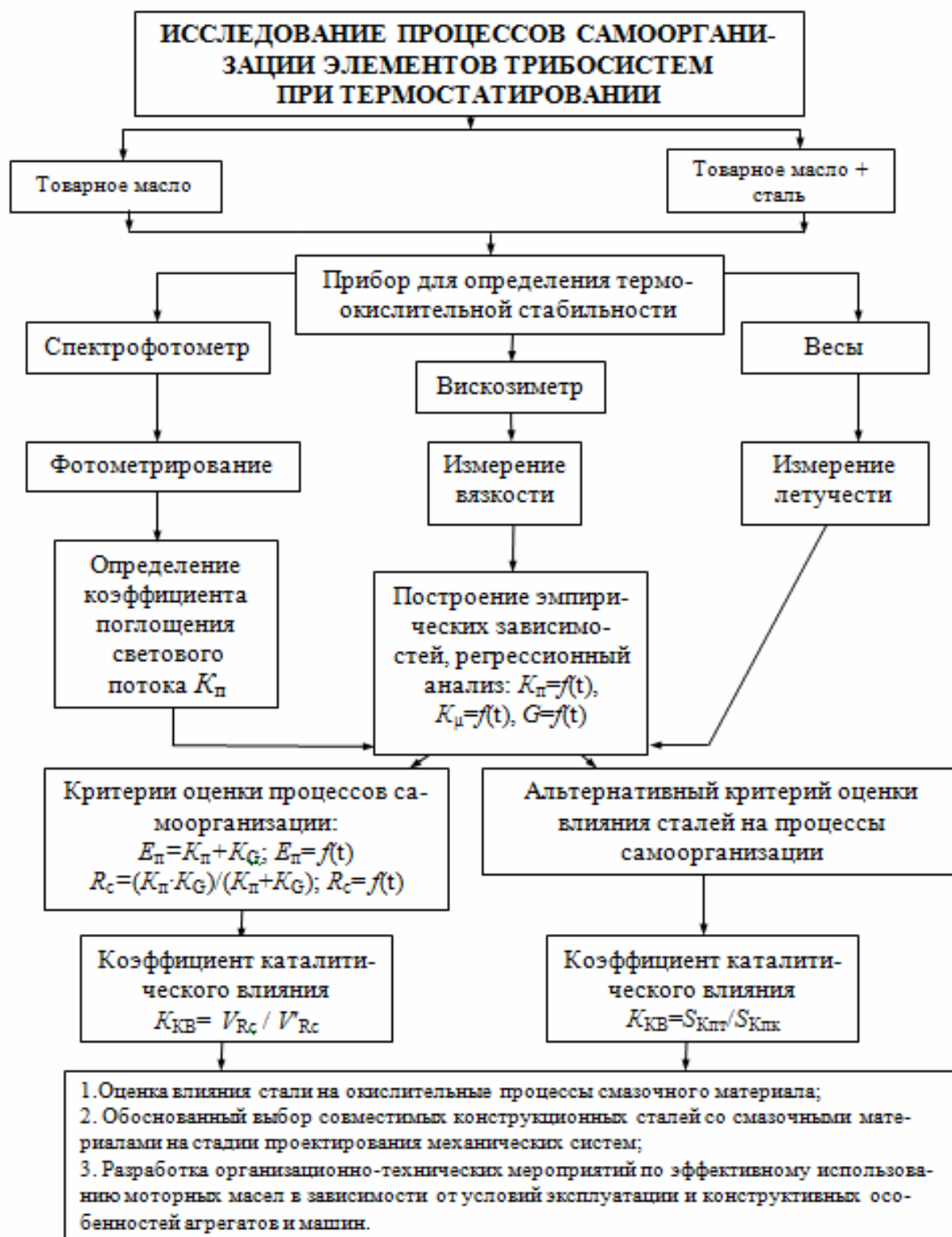


Рис. 10. Блок-схема технологий определения влияния сталей на процессы самоорганизации смазочных материалов в статических условиях испытания

В работе представлен альтернативный критерий, количественно оценивающий влияние твердого тела на масляную среду, определяемый интегрированием зависимостей коэффициента $K_{\text{п}}$ от времени и температуры испытания в соответствующих пределах интегрирования.

Разработанные технологии внедрены на предприятиях: ООО «КраМЗ», ОАО «Красноярское автотранспортное предприятие №1», ООО «Технология», а также в учебный процесс Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

Основные выводы и результаты исследования

1. Разработанная методика исследования процессов самоорганизации трибосистем при термостатировании с применением средств измерения, включающих прибор для определения термоокислительной стабильности, фотометр, вискозиметр и весы, позволяет отдельно определить процессы, протекающие на поверхности твердых тел на примере стали 45 различной термообработки и в самом смазочном материале, определить количественные показатели этих процессов и обосновать критерий.

2. Получены функциональные зависимости и регрессионные уравнения процессов самоорганизации в смазочном материале, термостатированном без стали и со сталью, что позволило определить количественные показатели влияния стали на эти процессы по изменению таких параметров, как оптические свойства, вязкость и летучесть.

3. Установлено, что в результате процессов самоорганизации на поверхности стали образуется двухслойный хемосорбционный слой, наружный представляет десорбцию ультрадисперсных фрагментов внутреннего слоя, что позволяет объяснить механизм влияния стали на изменение оптических свойств масляной среды при термостатировании.

4. Предложена имитационная модель процессов самоорганизации при термостатировании смазочного масла, показывающая, что изменение его физико-химических свойств происходит по двум направлениям с образованием продуктов окисления и испарения, что позволяет обосновать критерий процесса, названный коэффициентом тепловых преобразований, с помощью которого предложено оценивать совместимость масляной среды со сталью и определять температурный диапазон работоспособности трибосистемы.

5. На основании экспериментальных исследований предложен критерий процессов самоорганизации трибосистем, определяемый отношением скоростей изменения сопротивляемости смазочного масла температурным воздействиям при термостатировании без стали и со сталью, что позволяет оценить совместимость элементов трибосистем.

6. Предложен альтернативный интегральный критерий оценки влияния стали на процессы окисления, учитывающий количество поглощенной тепловой энергии при образовании продуктов окисления, позволяющий определить совместимость стали и смазочной среды.

7. Разработаны практические рекомендации по совместимости элементов трибосистем, включающие технологии определения: влияния сталей на процес-

сы самоорганизации смазочных материалов; температуры начала процессов самоорганизации; интегрального критерия оценки процессов самоорганизации в минеральном моторном масле и на поверхностях металлов; температурной области работоспособности элементов трибосистем, которые позволяют разработать организационно-технические мероприятия по эффективности использования моторных масел и обоснованному выбору в зависимости от условий эксплуатации и конструктивных особенностей сложных агрегатов.

Основное содержание диссертационной работы отражено в публикациях:

1. Метелица, А.А. Влияние медного катализатора на окислительные процессы в минеральном моторном масле М-10-Г_{2К} / **А.А. Метелица**, Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева и др. // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2007. Вып. 2–С. 216-222.

2. Метелица, А.А. Влияние металлов на процессы самоорганизации в смазочных материалах / **А.А. Метелица**, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева // Вестник СибГАУ имени академика М.Ф. Решетнева. Вып.2(23) – Красноярск, 2009. С.125-129.

3. Метелица, А.А. Метод определения температурной стойкости смазочных материалов / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, **А.А. Метелица** // Наука. Промышленность. Оборона : Труды VII Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2006. С. 275-279.

4. Метелица, А.А. Влияние присадок на деструкцию базовой основы смазочных материалов / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, **А.А. Метелица** // Наука. Промышленность. Оборона: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2006. С. 280-282.

5. Метелица, А.А. Методика повышения эффективности использования смазочных материалов / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, **А.А. Метелица** // Энергоэффективность жизнеобеспечения города: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. С. 308-312.

6. Метелица, А.А. Механизм образования продуктов деструкции в отработанных моторных маслах / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, **А.А. Метелица** // Механика и процессы управления. Том 1. XXXVI Уральского семинара. – Екатеринбург: УрОРАН, 2006. С. 204-211.

7. Метелица, А.А. Результаты исследования влияния катализатора из меди на окислительные процессы минерального масла М-10-Г_{2К} / Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, **А.А. Метелица** и др. // Инновационное развитие регионов СИБИРИ: Материалы межрегиональной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч.2 – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. С. 245-249.

8. Метелица, А.А. Термоокислительная стабильность как показатель качества смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева, **А.А. Метелица** и др. // Вестник КГТУ: Машиностроение. Вып.41. Машиностроение. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. С. 7-17.

9. Метелица, А.А. Методика исследования влияния доливов на термоокислительную стабильность моторного масла М-10-Г_{2К} / А.С. Попов, Б.И. Коваль-

ский, Н.Н. Малышева, **А.А. Метелица** // Молодежь и наука – третье тысячелетие: Сб. материалов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. II часть. / Сост.: Сувейзда В.В.; КРО НС «Интеграция», - Красноярск, 2006. С. 349-352.

10. Метелица, А.А. Разработка технологии диагностирования работающих моторных масел путем определения их температурной стойкости / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, С.П. Ереско, **А.А. Метелица** // Механики XXI века. VI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. С. 11-15.

11. Метелица, А.А. Исследование влияния стали 45 на окислительные процессы минерального моторного масла М-10-Г_{2К} / **А.А. Метелица**, Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева // Решетневские чтения: материалы XI междунар. науч. конф., посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космической систем академика М.Ф. Решетнева (6-10 нояб. 2007, г. Красноярск) / под общ. ред. И.В. Ковалева; Сиб.гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2007. С. 120.

12. Метелица, А.А. Исследование влияния температурной стойкости моторных масел на надежность ДВС / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, **А.А. Метелица**, А.В. Кузьменко // Актуальные проблемы развития и эксплуатации поршневых двигателей в транспортном комплексе Азиатско – Тихоокеанского региона: материалы научно-технической конференции «Двигатели 2008» (Хабаровск, 15-19 сентября 2008г.) - Хабаровск: Изд-во Тихоокеанс. гос. ун-та, 2008. С.331-336.

13. Метелица, А.А. Методика исследования влияния металлов на окислительные процессы смазочных материалов / **А.А. Метелица**, Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева // Механики XXI века. VI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. С. 359-362.

14. Метелица, А.А. Влияние стали ШХ15 на окислительные процессы минерального масла М-10-Г_{2К} / Б.И. Ковальский, Е.А Вишневская, **А.А. Метелица**, Н.Н. Малышева // Решетневские чтения: материалы XI междунар. науч. конф., посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космической систем академика М.Ф. Решетнева (10-12 нояб. 2008, г. Красноярск) / под общ. ред. И.В. Ковалева; Сиб.гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2008. С. 126-127.

15. Метелица, А.А. Метод оценки каталитического действия металлов на окислительные процессы в смазочных материалах / **А.А. Метелица**, Б.И. Ковальский // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы IV Гомельской региональной конф. молодых ученых. Гомель, 23–24 сентября 2008 г. ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2008. С. 123-125.

16. Метелица, А.А. Метод оценки качества отработанных моторных масел / Б.И. Ковальский, В.И. Верещагин, **А.А. Метелица** и др. // Наука и технологии. Том 1. Труды XXVI Российской школы. – М.: РАН, 2006. С. 199-203.

17. Метелица, А.А. Результаты испытания смесей минеральных и синтетических моторных масел / Б.И. Ковальский, В.В. Хомайко, Ю.Н. Безбородов, **А.А. Метелица** // Вестник университетского комплекса: Сб. научн. трудов / Под об-

шей ред. профессора Н.В. Василенко; Красноярск: ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ. – 2006. – Вып. 8(22). С. 96-105.

18. Пат. № 2298173 РФ МПК⁷ G 01 N 25/02. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Н.Н. Малышева, Б.И. Ковальский, М.А. Шунькина, **А.А. Метелица**, В.В. Гаврилов. –Опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.

19. Пат. № 2334676 РФ МПК⁷ G 01 N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов. / Б.И. Ковальский., Н.Н. Малышева, **А.А. Метелица**, Ю.Н. Безбородов. – Опубл. 27.09.2008, Бюл № 27.

Соискатель:

Подписано в печать 19.05.2009. Заказ № _____
Формат 60x90/16. Усл. печ. л.1. Тираж 100 экз.
ИПК Сибирского федерального университета
660074, Красноярск, ул. Киренского 28