

На правах рукописи



**БРЕКИ АЛЕКСАНДР ДЖАЛЮЛЬЕВИЧ**

**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2011**

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Чулкин Сергей Георгиевич

**Официальные оппоненты:** заслуженный деятель науки,  
доктор технических наук, профессор  
Погодаев Леонгард Иванович;  
кандидат технических наук, доцент  
Муравьёв Александр Николаевич

**Ведущая организация:** ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта»

Защита состоится «8» декабря 2011г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при Учреждении Российской академии наук «Институте проблем машиноведения РАН» по адресу: 199178, Россия, Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., д.61, актовый зал. Телефон/факс: 321-47-78, 321-47-82.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМАШ РАН

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 002.075.01

доктор технических наук, профессор



В.В. Дубаренко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Смазочная эффективность нефтяного масла зависит от сочетания многочисленных тесно переплетающихся факторов, определяющих в совокупности характер влияния масла на износ и трение смазываемых поверхностей. Существенно усложняет явления и процессы при фрикционном взаимодействии наличие в нефтяных маслах дисперсных компонентов различной природы.

Наряду с прогрессом в сфере исследования, создания и применения нефтяных смазочных масел, в этой области имеется ещё много нерешённых вопросов. В настоящее время возникает проблема: уменьшение долговечности смазываемых узлов трения в связи со снижением несущей способности смазочного слоя в условиях интенсификации нагрузок и скоростей в современных машинах. Для повышения несущей способности смазочного слоя предложено много полярно-активных и химически активных веществ, которые не решают проблемы окончательно. Решению данной проблемы посвящено большое количество работ, связанных с модифицированием смазочных масел, посредством целенаправленного введения в них антифрикционных, противоизносных и восстанавливающих дисперсных компонентов. Вместе с тем, в большинстве работ не учитывается наличие в узлах трения других видов дисперсных компонентов, влияющих на свойства нефтяных смазочных масел и взаимодействующих с модифицирующими дисперсными добавками.

Актуальность работы определяется также недостаточным объёмом информации о том: насколько устойчивыми к седиментации и агрегированию являются масла, модифицированные дисперсными добавками; как добавки влияют на несущую способность смазочного слоя, в котором содержатся и (или) образуются другие дисперсные компоненты; как дисперсные компоненты влияют на энергетические потери при режимах граничного и жидкостного трения.

Выводы и рекомендации по приведённым вопросам являются необходимыми для создания эффективных смазочных материалов, повышения долговечности деталей машин (в частности деталей низкого качества) в нормальных условиях и в условиях перегрузок. Работа поддержана министерством по науке и образованию и

Советом грантов президента РФ по поддержке молодых учёных. Грант № 02.120.11.7633-МК (руководитель к.т.н. Васильева Е.С.).

**Объект исследования.** Объектом данного исследования являются нефтяные смазочные масла, содержащие взаимодействующие дисперсные компоненты.

**Предмет исследования.** Предметом данного исследования являются: триботехнические свойства нефтяных смазочных масел, содержащих взаимодействующие дисперсные компоненты; явления и процессы в маслах с дисперсными компонентами, происходящие в работающих и не функционирующих узлах трения и влияющие на их триботехнические свойства.

**Цель исследования.** Целью данного исследования является увеличение несущей способности смазочного слоя, содержащего взаимодействующие дисперсные компоненты, посредством введения в него дополнительных дисперсных добавок.

**Задачи исследования.** Для достижения сформулированной цели необходимо решение следующих задач исследования: 1) осуществить аналитический обзор для выявления и систематизации информации о различных видах дисперсных компонентов в нефтяных маслах, особенностях взаимодействия дисперсных компонентов между собой и с внешней средой; 2) провести теоретические исследования, направленные на выявление общих закономерностей влияния нефтяных смазочных масел, содержащих взаимодействующие дисперсные компоненты, на фрикционное взаимодействие пар трения. 3) реализовать экспериментальные исследования свойств смазочных масел, содержащих взаимодействующие дисперсные компоненты, в условиях работающих и не функционирующих узлов трения; 4) разработать рекомендации по практическому использованию результатов проведённых исследований.

**Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.** В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях трибологии, химмотологии, гидродинамики, физики и математического моделирования. Достоверность результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента и с результатами исследований других авторов.

**На защиту выносятся:** 1. Классификация дисперсных компонентов нефтяных смазочных масел, произведённая по основанию дисперсности и гетерогенности, позволяющая строить прогнозирующие модели для оценки линейного износа, силы и коэффициента трения при различных условиях фрикционного взаимодействия. 2. Впервые полученные модели зависимостей силы и коэффициента жидкостного трения от объёмной доли дисперсных компонентов и их экспериментальное подтверждение. 3. Результаты экспериментальных исследований, состоящие в том, что дисперсные добавки: наноразмерный серпентинит и впервые полученные методом газофазного синтеза наноразмерные дихалькогениды вольфрама  $WS_2$ ,  $WSe_2$  повышают предельную нагрузочную способность смазочного слоя соответственно на 11-20%, 20-44%, в 3 раза; уменьшают диаметр пятна износа соответственно на 15-33%, 12-30%, 15%; уменьшают граничное трение соответственно на 26-41%, 41-44%, в 2 раза, относительно масла, не содержащего добавки, что говорит об улучшении антифрикционных свойств и несущей способности смазочного слоя.

**Научная новизна работы:** 1. Предложена классификация, объединяющая в систему различные дисперсные компоненты нефтяных смазочных масел. 2. Разработаны модели взаимодействия различных дисперсных компонентов нефтяных смазочных масел, учитывающие системный характер изменения объёмов данных компонентов. 3. Впервые разработаны математические модели изменения вязкости смазочных масел, силы и коэффициента жидкостного трения, в зависимости от объёмной доли нескольких видов дисперсных компонентов. 4. Созданы феноменологические модели влияния дисперсных компонентов на характеристики формы неровностей профиля и на фрикционное взаимодействие между деталями в режиме граничной смазки. 5. Обнаружен эффект: повышения несущей способности смазочного слоя в условиях нормального и недопустимого изнашивания при введении высокодисперсных добавок в нефтяное масло, в котором отсутствовали или содержались другие дисперсные компоненты; устойчивости высокодисперсных частиц добавок к агрегированию и седиментации в условиях хранения смазочных композиций.

**Практическая полезность работы.** Разработанные в работе математические модели являются одной из основ: технологии создания жидких смазочных композиций, содержащих высокодисперсные добавки; контроля состояния нефтяных масел в узлах машин. Предложены рекомендации по выбору дисперсности твёрдых добавок, по выбору эффективных смазочных масел с дисперсными компонентами.

**Реализация результатов работы.** Ряд результатов исследований дисперсного серпентинита получен совместно с ОАО «Нанопром». Результаты работы использованы в ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» в виде элементов учебно-методических комплексов по дисциплине «Механика контактного взаимодействия и разрушения».

**Апробация работы.** Материалы исследования докладывались и получили положительную оценку (приложения) на следующих научных форумах: научно-методическая конференция «Машиностроение в условиях инновационного развития экономики» (Санкт-Петербург, 2009 г.); 7-я международная научно-техническая конференция «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (Беларусь, Новополоцк, 2009 г.); международная научно-практическая конференция «XXXVIII Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2009 г.); международная научно-практическая конференция «XXXIX Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2010 г.); четвёртый международный симпозиум по транспортной триботехнике «Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте. ТРАНСТРИБО-2010» (Санкт-Петербург, 2010 г.); международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2011 г.).

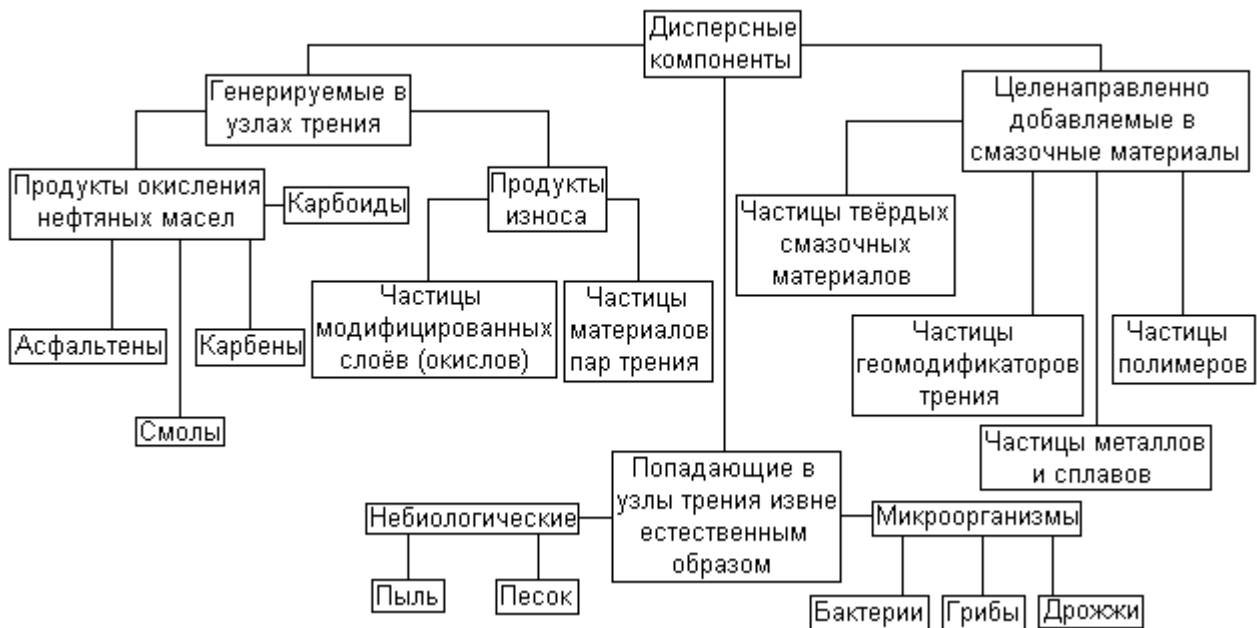
**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 14 научных работах, из которых 4 работы опубликовано в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 106 наименований, и приложений. Работа изложена на 151 листе машинописного текста, содержит 47 рисунков, 2 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

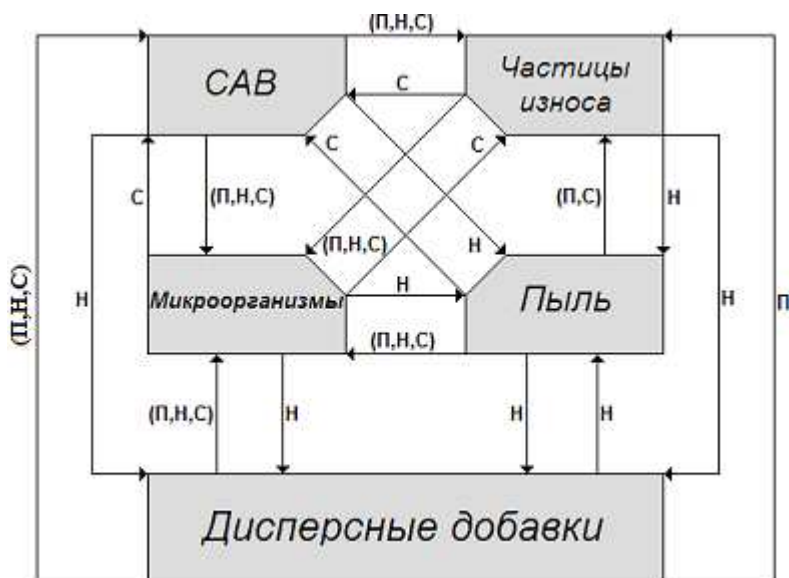
**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации работы.

**В первой главе** приведены сведения о различных видах дисперсных компонентов. В результате проведённого анализа разработана классификация, объединяющая в единую систему дисперсные компоненты, которые потенциально могут генерироваться, внедряться или целенаправленно добавляться в нефтяные смазочные масла (рис.1).



**Рис.1. Классификация дисперсных компонентов в нефтяных маслах**

Приведены общие свойства различных дисперсных компонентов, масел. На основании классификации и сведений аналитического обзора разработана модель взаимодействия дисперсных компонентов (рис.2). Обозначения на приведённой модели: *СAB* – смолисто-асфальтеновые вещества; стрелки указывают направленность воздействия; *П.* – подавление роста числа частиц одного дисперсного компонента другим дисперсным компонентом; *Н.* – нейтральность во взаимодействии дисперсных



**Рис.2. Модель взаимодействия**

ных компонентов; *С.* – стимуляция роста числа частиц одного дисперсного компонента другим дисперсным компонентом; *(П, Н, С)* – или подавление или нейтралитет или стимуляция образования.

Разработанная модель позволяет системно представить взаимодействие дисперсных компонентов, содержащихся в нефтяных смазоч-

ных маслах. Анализ данной модели позволяет выделить процессы противостояния при взаимодействии дисперсных компонентов. В конце первой главы диссертации определена общая цель и сформулированы задачи исследований.

**Во второй главе** приведены результаты теоретических исследований свойств нефтяных смазочных масел с дисперсными компонентами, находящихся в работающих и не функционирующих узлах трения машин. Произведены исследования вязкости смазочных масел, содержащих дисперсные компоненты. Изменение вязкости масла с дисперсной фазой в зависимости от её объёмной доли при малых концентрациях может быть описано обобщённым уравнением А. Эйнштейна:

$$\mu = \mu_{dc} \cdot (1 + \alpha_f \cdot \varphi), \quad (1)$$

где  $\alpha_f$  – коэффициент формы и взаимодействия частиц,  $\varphi$  – объёмная доля дисперсной фазы, состоящей из одного или нескольких дисперсных компонентов.

Аналитический обзор в первой главе данной работы показывает, что масла содержат множество различных дисперсных компонентов. Поскольку объёмная доля дисперсной фазы в масле определяется следующим образом:

$$\varphi = V_{df} / V = V_{df} / (V_{dc} + V_{df}),$$

( $V_{dc}$  объём дисперсионной среды: масла) а для нескольких дисперсных компонентов:

$$V_{df} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i,$$

где  $n$  – количество различных видов дисперсных компонентов, то подставляя сумму в уравнение для объёмной доли дисперсной фазы, получим:

$$\varphi = \left( \sum_{i=1}^n V_i \right) / \left( V_{dc} + \sum_{i=1}^n V_i \right). \quad (2)$$

Если при приращениях объёмов дисперсных компонентов смазочный материал изменяет вязкость линейно, то подставляя (2) в (1) имеем:

$$\mu = \mu_{dc} \cdot \left( 1 + \left( \alpha_f \cdot \sum_{i=1}^n V_i \right) / \left( V_{dc} + \sum_{i=1}^n V_i \right) \right). \quad (3)$$

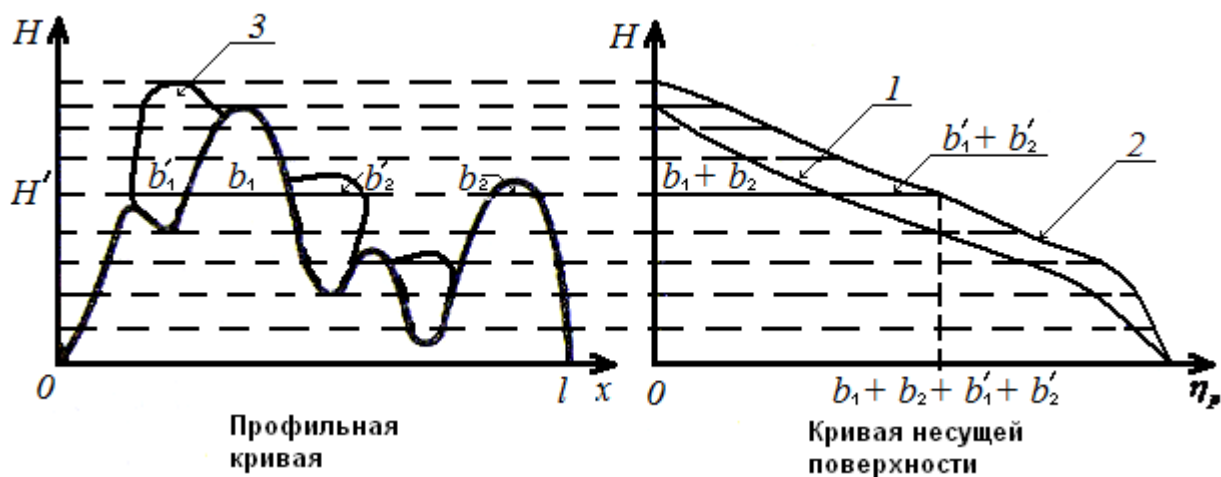
В (3) полагаем коэффициент формы и взаимодействия  $\alpha_f = K \cdot a$ , где  $K$  – коэффициент, учитывающий взаимодействие частиц;  $a = (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n a_i$ ;  $a_i$  – отношение длинной оси частиц к короткой для  $i$ -го дисперсного компонента.

Далее приведены результаты исследований: кинетических свойств смазочных масел с дисперсными компонентами и коагуляции частиц дисперсного компонента в не функционирующих узлах трения; диспергирования дисперсных компонентов в смазочных маслах. Рассмотрен закон Стокса при осаждении сферических частиц и



закон Эйнштейна-Смолуховского при диффузии частиц. Приведены сведения о седиментационно-диффузионном равновесии. Данные сведения являются теоретическими основами технологии изготовления жидких смазочных композиций с дисперсными добавками.

Приведены результаты теоретического исследования взаимодействия дисперсных компонентов смазочного слоя с поверхностью трения. Для характеристики профильной кривой в целом служит кривая несущей поверхности (рис.3).



**Рис.3. Профильная кривая и кривая несущей поверхности: 1 – кривая несущей поверхности при отсутствии частиц дисперсной фазы; 2 – при наличии; 3 – прилипшая (или внедрившаяся) частица**

Кривая несущей поверхности отображает в определённой степени увеличение несущей площади детали по мере срабатывания её наружных слоёв.

Заполнение неровностей частицами добавок приводит к увеличению площади фактического контакта поверхностей трения. При сближении шероховатых поверхностей в случае наличия частиц дисперсной фазы в контакт могут входить всё более малые частицы, давая дополнительное приращение фактической площади контакта. В связи с этим происходит уменьшение фактического давления при взаимодействии поверхностей и, при определённых условиях, реализуется уменьшение износа.

Далее рассмотрены закономерности изменения объёма дисперсных компонентов смазочного слоя. Изменение объёма одного дисперсного компонента при наличии другого может быть описано в общем виде уравнением:

$$V_{дк1} = k_{п}(V_{дк2}, D_{дк2}, \dots) \cdot f(t),$$

где  $k_{п}$  – коэффициент подавления, учитывающий действие одного дисперсного компонента на другой и зависящий от объёма и дисперсности второго компонента и

других факторов. В случае подавления роста количества частиц  $0 < k_{II} < 1$ , в случае нейтралитета во взаимодействии  $k_{II} = 1$ , в случае стимуляции роста количества частиц справедливо неравенство  $k_{II} > 1$ .

В границах исследования проанализировано влияние смазочных масел, содержащих дисперсные компоненты на подшипники скольжения и качения, работающие в условиях жидкостного трения.

Установлено, что сила жидкостного трения при использовании смазочного масла с дисперсными компонентами в подшипниках скольжения и качения выражается аналогично обобщённому уравнению А. Эйнштейна (Симха-Эйнштейна):

$$F_{жс} = F_{жс0} \cdot (1 + \alpha_f \cdot \varphi), \quad (4)$$

где  $F_{жс0}$  – сила жидкостного трения при использовании смазочного масла без дисперсных компонентов.

С учётом генезиса в нефтяных смазочных маслах различных дисперсных компонентов в процессе функционирования подшипников:

$$F_{жс} = F_{жс0} \left( 1 + \alpha_f \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V_{с0} + \sum_{i=1}^n V_i} \right). \quad (5)$$

Аналогичные соотношения справедливы для коэффициента трения и характеристик несущей способности смазочного слоя при функционировании подшипников скольжения и качения в гидродинамическом режиме.

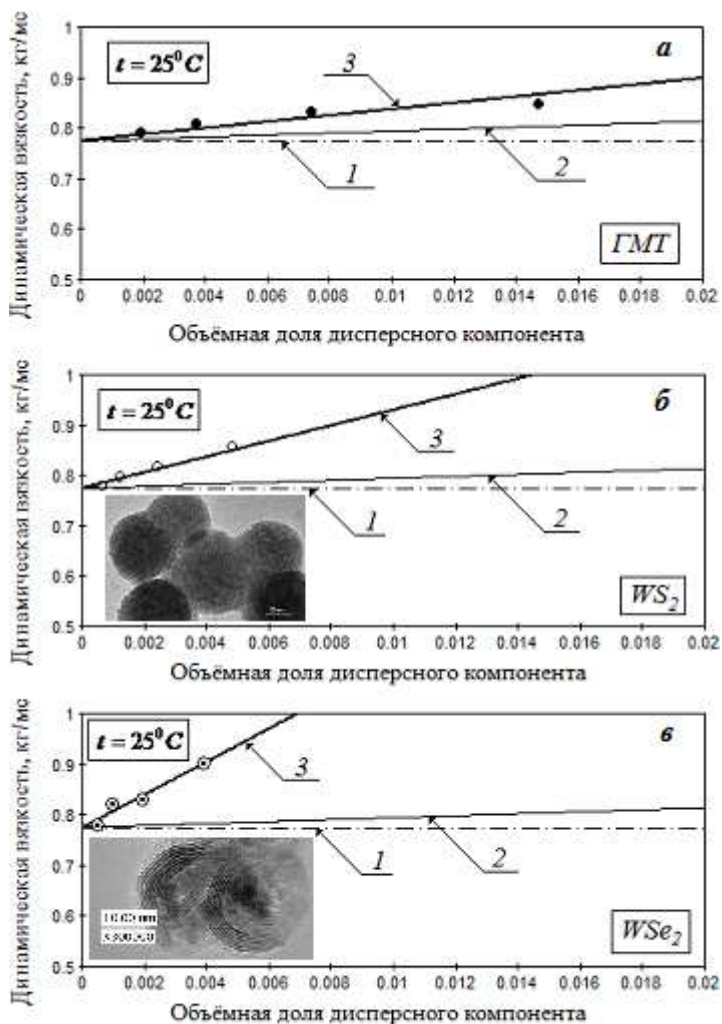
В конце второй главы приведены гипотезы, сформулированные в результате проведённых теоретических исследований.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований свойств нефтяных смазочных масел с дисперсными компонентами, находящихся в работающих и не функционирующих узлах трения.

Для проверки гипотез, выдвинутых во второй главе, разработан алгоритм экспериментальных исследований.

В качестве дисперсионной среды для экспериментальных исследований выбрано авиационное масло МС-20. В качестве дисперсных добавок использованы порошки: графита, дихалькогенидов вольфрама (дисульфида  $WS_2$  и диселенида  $WSe_2$ ,

полученных методом газофазного синтеза), геомодификатора трения – серпентинита (ГМТ). В качестве других дисперсных компонентов для масла использованы: грубо-дисперсный порошок из стали Р6АМ5 (моделирование абразивных частиц); коллоидно-дисперсные смолисто-асфальтеновые соединения. В качестве дисперсных компонентов рассматривались также частицы из материалов пар трения, используемых в испытаниях: сталь ШХ15, сталь Р6АМ5.



**Рис.4. Зависимости вязкости от объёмной доли дисперсной добавки**

аппроксимации экспериментальных точек уравнением Симха-Эйнштейна (1).

Если положить  $\alpha_f = 2,5 \cdot K \cdot a$ , то для ГМТ, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub> коэффициент взаимодействия  $K$  равен соответственно 3,2; 8; 1,4.

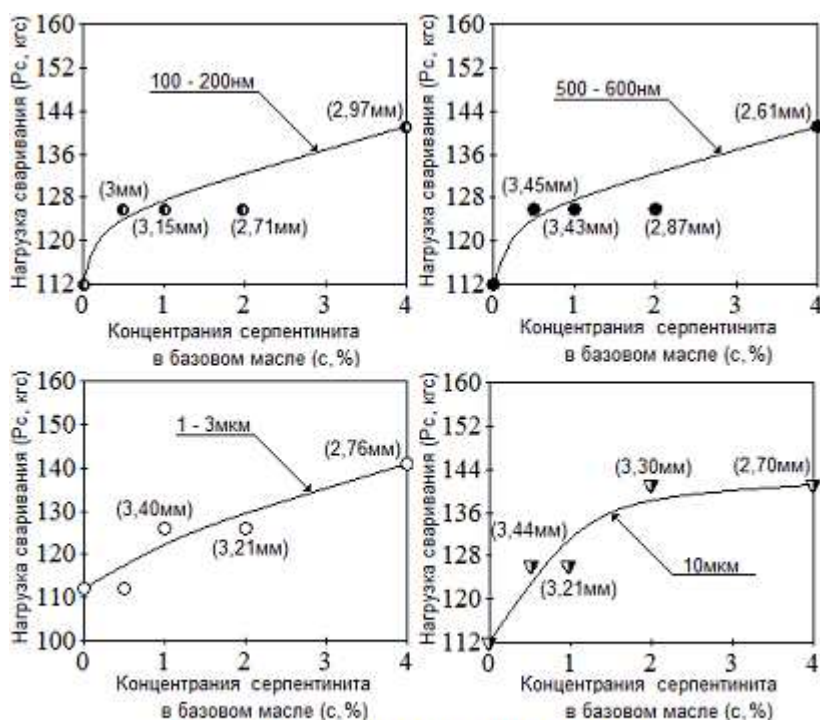
Для экспериментальной оценки устойчивости нефтяного смазочного масла с дисперсными добавками использовали масло МС-20, содержащее 1% по массе ГМТ 100-200нм, WS<sub>2</sub> 40нм, WSe<sub>2</sub> 60x5нм. После заполнения ёмкостей смазочные композиции оставили в состоянии покоя на интервал времени  $\Delta t_{xp} = 1год$ , при средней

температуре внешней среды  $22^{\circ}\text{C}$ . Через указанный интервал времени методом измерения вязкости проб оценили кинетическую устойчивость смазочных композиций: градиент вязкости во всех композициях незначителен. Исследуемые смазочные композиции являются агрегативно-устойчивыми системами, поскольку в результате седиментации крупных частиц образуется плотный осадок малого объёма.

Исследование влияния дисперсных добавок на параметры шероховатости поверхностей трения осуществлялось посредством использования профилометра TR200 фирмы TIME GROUP. В качестве дисперсных добавок использовали высокодисперсные порошки графита 100-200нм, ГМТ 100-200нм,  $WS_2$  40нм и  $WSe_2$  60x5нм.

При коагуляции высокодисперсных частиц добавок с поверхностью образца произошло увеличение относительной опорной длины профиля  $t_p$  на разных уровнях, уменьшение наибольшей высоты неровностей профиля для графита на 68%, для ГМТ на 22%, для  $WS_2$  на 15%, для  $WSe_2$  на 30%.

Оценку несущей способности смазочного слоя, содержащего дисперсные компоненты, осуществляли на четырёхшариковой машине трения ЧШМ-3,2 в соответствии с ГОСТ 9490–75 при трении скольжения. В качестве исследуемых образцов

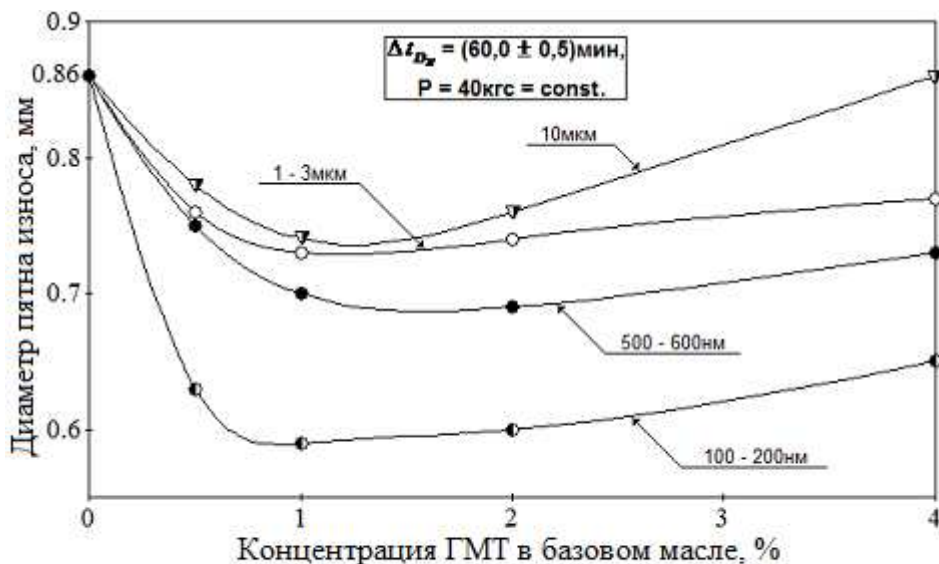


**Рис.5. Зависимости нагрузки сваривания от концентрации ГМТ**

использовали смазочные композиции на основе масла МС-20 с добавками: геомодификатора трения ГМТ – 100-200нм, 500-600нм, 1-3мкм, 10мкм;  $WS_2$  – 40нм; 1-2мкм;  $WSe_2$  – 60x5нм; грубодисперсного порошка из стали Р6АМ5; коллоидно-дисперсных смолисто – асфальтовых соединений. Ряд концентраций частиц (по массе): 0,5%, 1%, 2%, 4%. Вначале оценили в условиях нормального и недопустимого изнашивания несущую способность смазочного слоя, со-

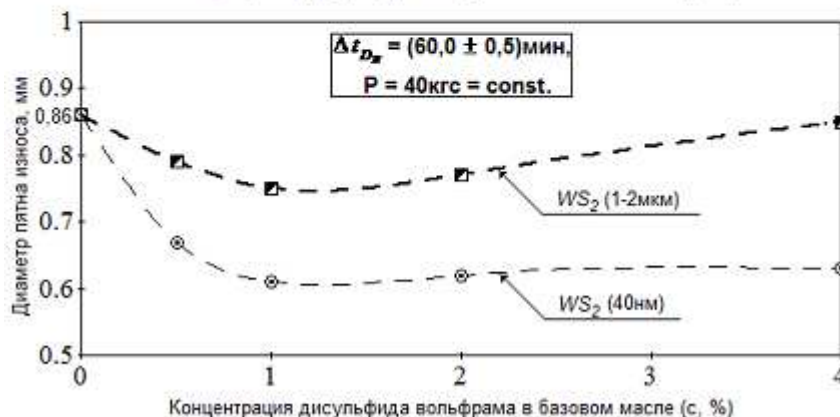
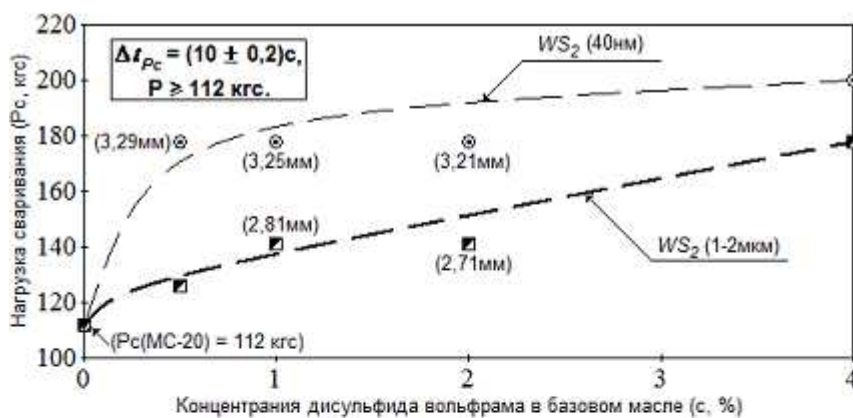
держивающего нагрузку в течение заданного времени.

держающего ГМТ. При оценках несущей способности смазочного слоя в условиях недопустимого изнашивания пользовались таким показателем как «нагрузка сваривания». Время испытания составляло  $t_{pc} = (10 \pm 0,2)c$  (рис.5). В скобках около точек указаны диаметры пятна износа при нагрузке, предшествующей свариванию.



**Рис.6. Зависимости диаметра пятна износа от концентрации ГМТ**

пятна износа нижних шариков. Результаты для ГМТ приведены на рис.6.



**Рис.7. Зависимости нагрузки сваривания и диаметра пятна износа от концентрации  $WS_2$**

два раза. Это может быть связано с тем, что наночастицы более «качественно»

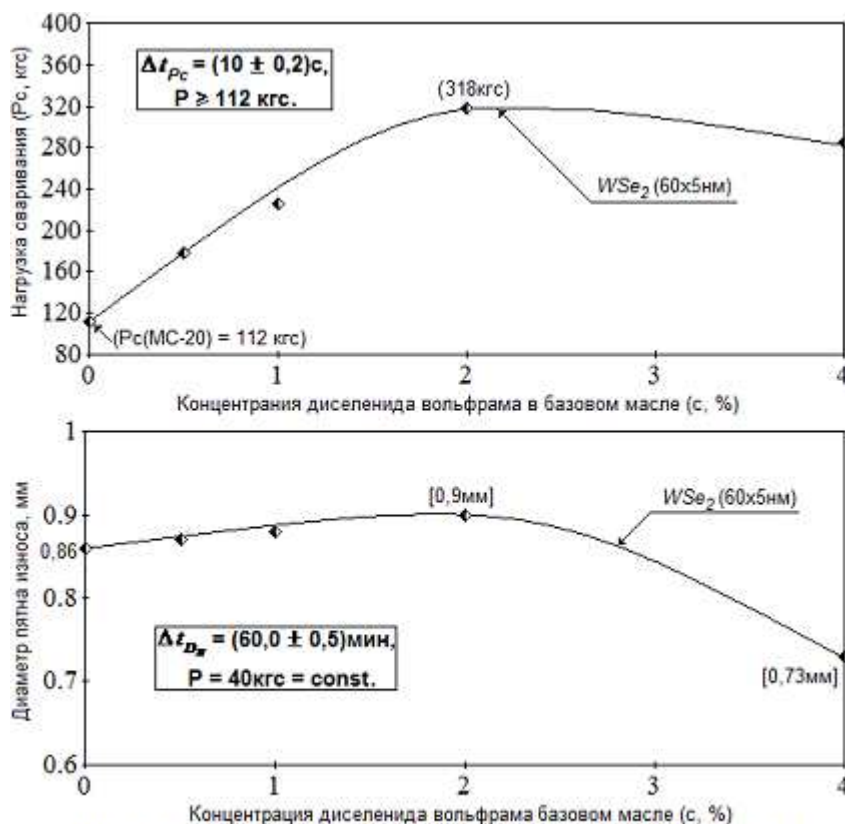
При оценке несущей способности смазочного слоя с дисперсными добавками в условиях нормального изнашивания время одного испытания составляло  $t_{pc} = (60 \pm 0,5)мин$  при фиксированной нагрузке равной  $P = 40кгс = const$ . Показателем был диаметр

Графики зависимости нагрузки сваривания и диаметра пятна износа от концентрации нано- и микрочастиц  $WS_2$  в  $MC-20$  приведены на рис.7.

В этом случае, в отличие от серпентинита, предельная нагрузочная способность зависит от дисперсности дисульфида вольфрама. Результаты показывают, что переход к наночастицам способствует повышению предельной нагрузочной способности почти в



заполняют микронеровности, чем микрочастицы, в большей степени увеличивая относительную опорную длину профиля. Кроме того, наночастицы, добавленные в той же объёмной доле, что и микрочастицы, увеличивают вязкость в большей степени, чем микрочастицы, способствуя повышению несущей способности смазочного слоя.



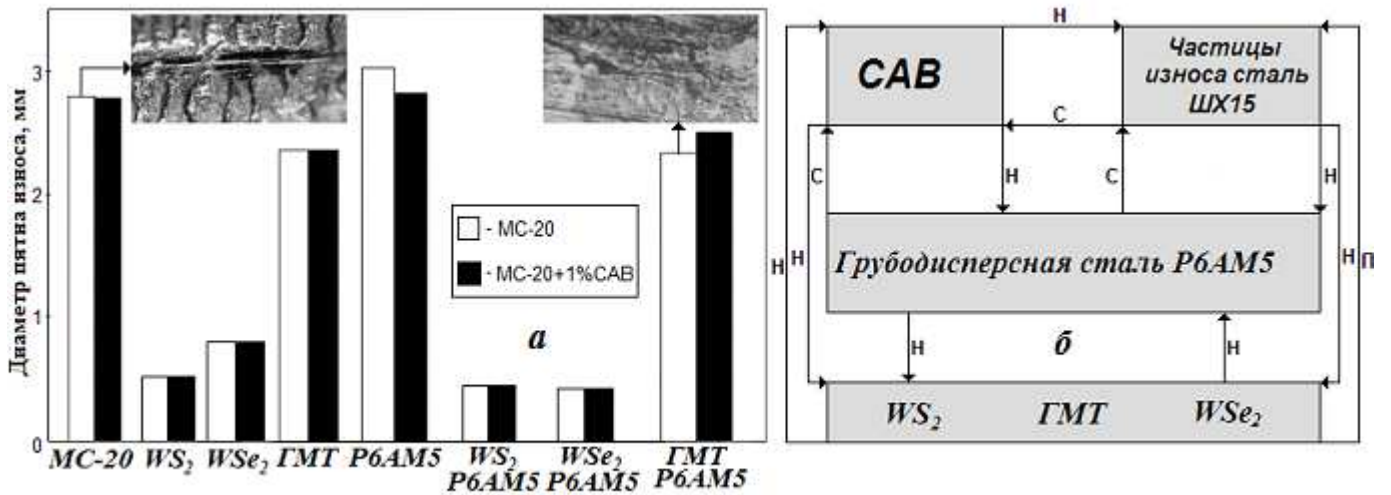
**Рис.8. Зависимости нагрузки сваривания и диаметра пятна износа от концентрации  $WSe_2$**

При повышении в смазочной композиции концентрации диселенида вольфрама до 2% предельная нагрузочная способность увеличилась почти в три раза. Такое приращение может быть обусловлено различными факторами: особенностями морфологии частиц, размерами, природой. При испытаниях в условиях малых нагрузок эффект наблюдается после превышения 2%.

Далее оценивали несущую способность смазочного слоя, содержащего различные виды взаимодействующих дисперсных компонентов: геомодификатор трения  $GMT$  100-200нм;  $WS_2$  – 40нм;  $WSe_2$  – 60x5нм; коллоидно-дисперсные смолисто-асфальтеновые вещества; грубодисперсная сталь Р6АМ5.

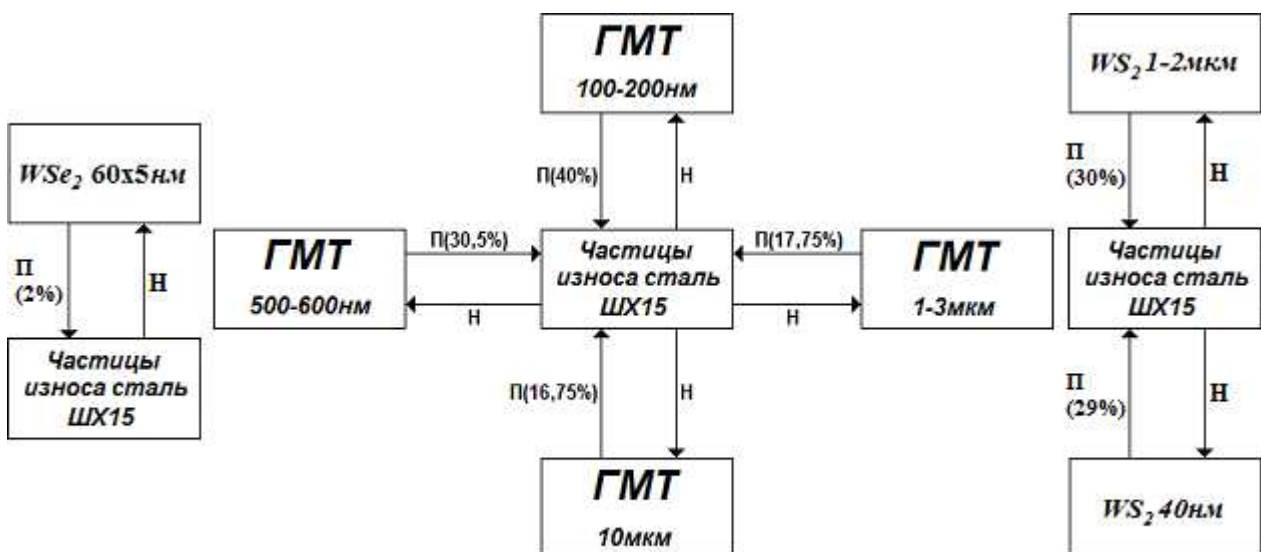
Смолисто-асфальтеновые вещества содержались в МС-20 в концентрации 1% по массе. Остальные дисперсные компоненты добавлялись в концентрации 2% по массе. При этом проводились испытания смазочных композиций, содержащих один и несколько дисперсных компонентов. Условия данных экспресс испытаний: нагрузка  $P = 100кгс = const$ ; время испытания  $t_{pc} = (10 \pm 0,2)c$  (рис.9, а).

Полученные данные позволяют составить модель взаимодействия выбранных дисперсных компонентов (рис.9, б).



**Рис.9. Результаты взаимодействия дисперсных компонентов**

Для оценки подавления численности частиц износа и снижения энергетических затрат при наличии дисперсных добавок в смазочном масле была использована универсальная машина трения 2070 СМТ-1. Для исследования влияния дисперсных добавок на износ и трение в условиях скольжения поверхностей реализовывалась схема испытаний «шар – ролик». Подвижный образец состоял из стали Р6АМ5, неподвижный (шар) – из стали ШХ-15. Производились испытания тех же смазочных композиций, что и на машине ЧШМ-3,2. Нагрузка составляла  $W = 147H$ . Частота вращения вала  $n = 500 \text{ мин}^{-1}$ . Зависимость среднего диаметра пятна износа от времени в общем случае аналитически выражается соотношением:  $d_{cp} = k_{пер} \cdot 0,26 \cdot t^{0,35}$ , где  $k_{пер}$  – средний коэффициент подавления,  $t$  – время. Среднюю степень подавления определяли из соотношения:  $S_{пер} = (1 - k_{пер}) \cdot 100\%$ .



**Рис.10. Различная степень подавления линейного износа частицами дисперсных добавок**

Параллельно с исследованием подавления частиц износа дисперсными добавками проводились исследования сдвигового сопротивления в режиме граничного трения. Установлено, что *ГМТ* различной дисперсности уменьшает трение на 25 – 40%, Микрочастицы  $WS_2$  снизили трение максимально на 41%, наночастицы – на 44%. Диселенид вольфрама максимально снизил трение в 2 раза.

Эксперименты, проведённые на подшипниках скольжения и качения в режиме жидкостного трения, подтвердили справедливость уравнения (4): расхождения расчётных и экспериментальных данных менее 10%. При использовании дисперсных добавок в малых концентрациях жидкостное трение увеличивается незначительно.

**В четвёртой главе** приведены рекомендации по практическому использованию результатов исследований. Рекомендация по выбору дисперсности твёрдых добавок позволяет реализовать выбор размера частиц, обеспечивающего кинетическую устойчивость не склонных к агрегированию смазочных композиций. Рекомендация по выбору смазочных масел с дисперсными компонентами, основанная на системном использовании теоретических и экспериментальных данных, указывает основные принципы и действия, которые необходимы для выбора эффективных смазочных композиций. Рекомендация по предварительной обработке поверхностей трения дисперсным компонентом позволяет реализовать эксплуатационные мероприятия, способствующие уменьшению адгезионного взаимодействия поверхностей трения. Рекомендация по созданию смазочных композиций для подшипников качения при использовании различных дисперсных добавок позволяет получить смазочные композиции с вязкостью, равной вязкости минеральных масел в конкретных условиях эксплуатации подшипников качения. Представленные сведения об оценке состояния нефтяного смазочного масла в подшипниковых узлах по тепловыделению могут быть использованы для реализации диагностических мероприятий.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. По основанию дисперсности и гетерогенности произведена классификация дисперсных компонентов нефтяных смазочных масел, позволяющая строить про-



гнозирующие модели для оценки линейного износа, силы и коэффициента трения при различных условиях фрикционного взаимодействия.

2. Впервые получены модели зависимостей силы и коэффициента жидкостного трения от объёмной доли дисперсных компонентов. Прогнозы, полученные с помощью данных моделей, подтверждены статистическими испытаниями с погрешностью не более 5%.

3. Экспериментально установлено, что наноразмерный серпентинит и впервые полученные методом газофазного синтеза наноразмерные дихалькогениды вольфрама  $WS_2$ ,  $WSe_2$  повышают предельную нагрузочную способность смазочного слоя соответственно на 11-20%, 20-44%, в 3 раза; уменьшают диаметр пятна износа соответственно на 15-33%, 12-30%, 15%; уменьшают граничное трение соответственно на 26-41%, 41-44%, в 2 раза, относительно масла, не содержащего добавки, что говорит об улучшении антифрикционных свойств и несущей способности смазочного слоя.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях**

#### **В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. Бреки А.Д. Исследование модернизированных конструкционных смазочных материалов, содержащих мелкодисперсные частицы модификаторов трения [Текст] / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, М.Ю. Максимов; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Машиностроение – 2010. – 2-2(100). – С. 92 – 97.

2. Бреки А.Д. Противоизносные и антифрикционные свойства смазочных композиций с геомодификаторами трения [Текст]/ А.Д. Бреки, М.Ю. Максимов, О.В. Толочко, Е.С. Васильева // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – №4. – С. 27 – 30.

3. Толочко О.В. Исследование жидких смазочных композиций для смазки и восстановления ответственных узлов трения машин [Текст]/ О.В. Толочко, А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, М.Ю. Максимов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – №3. – С. 30 – 33.

4. Толочко О.В. Определение основных трибологических характеристик жидких смазочных композиций, содержащих мелкодисперсные частицы диалкогенидов вольфрама [Текст]/ О.В. Толочко, А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, М.Ю. Максимов // Вопросы материаловедения. СПб. – 2011. – №1(65). – С.143 – 149.

### **В сборниках статей конференций, проведённых в РФ**

1. Бреки А.Д. Оценка осаждения мелкодисперсных частиц модификаторов трения в базовых маслах при хранении жидких смазочных композиций [Текст] / А.Д. Бреки // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте: Труды 4-го междунар. симпозиума по транспортной триботехнике «ТРАНСТРИБО-2010». – СПб.: Изд-во ЛОМО-Инфраспек, 2010. – С. 305 – 310.

2. Бреки А.Д. Движение конгломератов из мелкодисперсных частиц модификаторов трения в жидких смазочных композициях [Текст] / А.Д. Бреки // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте: Труды четвёртого международного симпозиума по транспортной триботехнике «ТРАНСТРИБО-2010». – СПб.: ЛОМО-Инфраспек, 2010.– С. 311 – 315.

3. Бреки А.Д. Технология изготовления жидких и пластичных смазочных композиций, содержащих мелкодисперсные частицы серпентинита [Текст] /А.Д. Бреки, И.В. Соловьёва // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы междунар. науч.-практ. конференции. Ч. IV. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 47 – 48.

4. Бреки А.Д. Дисперсные системы триботехнического назначения [Текст] / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин // Материалы международной научно-практической конф. «XXXIX Неделя науки СПбГПУ». – 6 ноября – 11 декабря 2010. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010. – С. 65 – 66.

5. Бреки А.Д. Оценка состояния нефтяного смазочного масла в подшипниковых узлах по тепловыделению [Текст] / А.Д. Бреки // Материалы международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2011. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 163 – 166.

6. Чулкин С.Г. Разработка новых самосмазывающихся полимерных композиционных материалов [Текст] / С.Г. Чулкин, А.Д. Бреки, И.В. Соловьёва // Машиностроение в условиях инновационного развития экономики: сборник тезисов и док-

ладов научно-методической конференции. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2009. С. 142 – 147.

### **В сборниках статей конференций, проведённых в республике Беларусь**

1. Чулкин С.Г. Оценка влияния смазочных материалов на триботехнические характеристики пар трения [Текст] / С.Г. Чулкин, И.В. Соловьёва, А.Д. Бреки, Р. Качиньски // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, экспл., ремонте и модерн. машин: сб. науч. Трудов 7-й Междунар. науч.-техн. конф. В 3-х т. Т.2 / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика.- Новополоцк: ПГУ, 2009. - С. 19 – 22.*

2. Чулкин С.Г. Методика исследования влияния смазочных материалов на триботехнические характеристики подшипников качения [Текст] / С.Г. Чулкин, М.М. Радкевич, А.Д. Бреки, И.В. Соловьёва // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. Трудов 7-й Междунар. науч.-техн. конф. В 3-х т. Т.2 / под общ. Ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 91 – 94.*

### **В рецензируемых журналах Польши**

1. Chulkin S.G., Breki A.D., Soloviova I.V., Radkevich M.M. Research of base and alloyed oil MC-20 influence on the tribotechnical characteristics of roller bearings // *Bialystok university of technology, faculty of mechanical engineering. Acta mechanica et automatica. Quarterly vol. 3, no. 4(10). – 2009. – P. 21 – 23.*

2. Chulkin S.G., Breki A.D., Soloviova I.V., Kaczynski R. Generalized methods of estimations of lubricants influence on the tribotechnical characteristics of friction pair “steel-steel” on the four-ball machine // *Bialystok university of technology, faculty of mechanical engineering. Acta mechanica et automatica. Quarterly vol. 4, no. 4(14). – 2010. – P. 5 – 8.*

