

На правах рукописи

Берёзина Елена Владимировна

**САМООРГАНИЗАЦИЯ ПРИСАДОК
В ГРАНИЧНОМ СМАЗОЧНОМ СЛОЕ
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ МАШИН**

Специальность 05.02.04 — Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Ивановский государственный университет»

Научный консультант

доктор химических наук, профессор

Усольцева

Надежда Васильевна

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Лысенков

Павел Михайлович

доктор технических наук, профессор

Фадин

Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор

Ивасышин

Генрих Степанович

Ведущая организация

Институт химии

растворов РАН (г. Иваново)

Защита состоится «16» октября 2007 г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: _____

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета —

Востров В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание трибологически эффективных и экологически безопасных смазочных материалов (СМ) позволяет уменьшить энергозатраты при трении, замедлить изнашивание трибосопряжений и металлорежущего инструмента, повысить производительность технологических процессов, уменьшить вредное влияние на окружающую среду и персонал. Выбор трибоактивных присадок для СМ в большинстве случаев происходит эмпирически.

Теория строения и процесса формирования смазочного слоя к настоящему времени развита слабо, в особенности это применимо к процессам экстремального трения. В настоящей работе развиты новые представления о формировании граничного смазочного слоя с учетом молекулярного строения и надмолекулярной самоорганизации трибоактивных компонентов СМ в наноразмерном масштабе. Кроме того, в исследовании применяются методы компьютерного моделирования, позволяющие оптимизировать работу по изучению физико-химических основ смазочного действия и созданию новых СМ. Работа выполнена в рамках тематического плана Минобрнауки РФ для Проблемной лаборатории жидких кристаллов ИвГУ, Перечня приоритетных направлений, утвержденного Президиумом РАН «Основные направления фундаментальных исследований»: Приложение к Постановлению № 233 от 1 июля 2003 г. Отдельные разделы диссертации поддержаны грантами: РФФИ (№№ 01-03-32135, 04-03-32305), Минобр науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» РНП 2.2.1.1.7280.

Цель и задачи исследования. *Целью работы* является улучшение триботехнических характеристик водных, масляных и пластичных смазочных композиций путем применения присадок, проявляющих эффект надмолекулярной самоорганизации в граничном смазочном слое (в водных системах) и твердосмазочное действие в масляных и пластичных смазочных материалах, используемых в узлах трения машин и в процессах обработки металлов резанием.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены следующие *задачи*: 1) разработать теорию образования многослойных структурно упорядоченных на молекулярном уровне смазочных пленок; 2) установить взаимосвязь триботехнических характеристик граничных смазочных слоев с особенностями надмолекулярной наноразмерной са-

моорганизации соединений различной химической природы, применяемых в качестве присадок, для разработки научных основ создания смазочных композиций; 3) обосновать выбор материалов, обладающих структурно-адсорбционным и твердосмазочным принципами действия; 4) провести модельные триботехнические испытания выбранных присадок в широком диапазоне концентраций и режимов трения, 5) осуществить цикл физико-химических исследований присадок и композиций на их основе для объяснения особенностей их поведения в смазочном слое; 6) решить проблему предсказания смазочных свойств СМ с использованием молекулярного моделирования и нейросетевого программирования.

Новые научные результаты. 1. Разработано математическое описание образования мезогенными трибоактивными компонентами физически адсорбированного граничного нанослоя. 2. Определена взаимосвязь физико-химических и триботехнических характеристик водных, масляных и пластичных смазочных композиций, содержащих мезогенные и немезогенные присадки гетероциклической природы и их композиции с неионогенными ПАВ. 3. Предложена вербальная модель смазочного действия водных растворов мезогенов дискотического типа, основанная на структурировании граничного смазочного слоя путем надмолекулярной наноразмерной самоорганизации. 4. Определен принцип действия порошкообразных присадок — производных фталоцианина — в масляной и пластичной основах, связанный с реализацией механизма твердой смазки. 5. С помощью нейросетевого программирования разработан метод прогнозирования триботехнических характеристик смазочных материалов, базирующийся на их физико-химических показателях. 6. Разработан метод прогнозирования триботехнических характеристик смазочных материалов для узлов трения машин и технологических процессов обработки металлов с использованием молекулярного моделирования процесса адсорбции присадки на твердой поверхности.

Обоснованность и достоверность результатов. Основные результаты и выводы настоящей работы являются обоснованными и достоверными, поскольку: применена статистическая обработка результатов эксперимента, и использованы стохастические модели при построении экспериментальных зависимостей, положения теоретической части работы хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными отечественными и зарубежными исследователями, касающимися формирования

смазочного слоя в межповерхностной капиллярной системе; имеется удовлетворительное согласование теоретических результатов с экспериментальными данными настоящей работы, а также литературными данными о других исследованиях; корректным применением известных методик физико-химических исследований к выбранным классам смазочных материалов.

Методы исследования. Применялись теоретические и экспериментальные методы исследования с использованием стандартных и оригинальных методик и установок (UV – VIS – спектроскопия, ротационная и капиллярная вискозиметрия, поляризационная и электронная микроскопия). Выбор компонентов модельных СОТС проводили на основе их физико-химических свойств, а также с использованием предварительных экспериментов. Стабильность компонентов при высокой температуре изучали с помощью дериватографии. Процесс трения моделировали на трибометре ТАУ-1 и машине трения СМЦ-2, а технологические свойства СОТС для резания металлов определяли на стандартном металлорежущем оборудовании. В процессе обработки результатов экспериментов использовали статистические методы обработки данных и регрессионные модели.

Личный вклад автора. Лично автору принадлежат: направление работы, постановка задач, программа и методология исследований; непосредственное выполнение всех экспериментов, построение математических моделей, установление основных закономерностей, формулирование выводов, разработка на базе выполненных исследований промышленных составов СОТС.

Апробация работы. Результаты, изложенные в настоящей диссертации, были представлены автором на следующих научных конференциях, совещаниях и симпозиумах: 1st Balkan Int. Conf. on Tribology «Balkantrib-93», 1 – 3 October 1993, Sofia, Bulgaria; 1st Int. Symp. on Surfactants. Rovinj, Croatia. May 25 – 27; 1st Int. Conf. «Eurometalworking-94» Udine, Italy, 28 – 30 Sept. 1994; Int. Symp. «Insycont'94 – Slovantribo'94», 14 – 16 Sept. 1994. Kracow, Poland; Int. Conf. «ICSTFC» 10 – 11 Oct. 1994. Sofia, Bulgaria; 4th Yugoslav Conf. on Tribology «Yutrib'95». 27 – 29 Sept. 1995, Herzeg Novi, Yugoslavia; 10th Int. Colloquium on Tribology. 09 – 11 Jan. 1996. Esslingen, Germany; 1st Int. Symp. «Self-Assembly of Amphiphilic Systems». Dresden, Sept. 13 – 16. 1998; Межд. конф. «Проблемы определения технологиче-

ских условий обработки по заданным показателям качества изделий», Рыбинск, РГАТА, 2003; I-е Всес. совещание по лиотропным жидким кристаллам. Иваново, 11 – 13 дек. 1990; II-я межд. конф. по лиотропным жидким кристаллам. Иваново, 1993; IV межд. конф. по лиотропным жидким кристаллам. 25 – 28 сент. 2000 г. Иваново; Межд. конф. «Образование через науку». М., МГТУ им. Н.Э.Баумана 2005; Московский межд. салон инноваций и инвестиций. Москва, ВВЦ. 15 – 18 февраля 2005 г.; Межд. конф. «Поликомтриб-2005». Гомель. Беларусь. 18 – 21 июля 2005 г.; Межд. науч. симп. «Славянтрибо-6», С-Пб, 2004; Межд. науч. симп. «Славянтрибо-7а» С-Пб–Пушкин. 2006; Int. Symp. «Insycont-06». 14 – 16 Sept. 2006. Kracow, Poland; VI Московский межд. салон инноваций и инвестиций. М., ВВЦ, 7 – 10 февраля 2006 г.; Межд. научно-практич. конф.-выставка «Трибология – машиностроению». Москва, «Крокус-Экспо». 19-22 сентября 2006; «Межд. выставке научно-технических достижений — Второй форум научно-технич. сотрудничества Китая и СНГ на высшем уровне» Харбин, КНР. 21 – 25 августа 2006 г.; семинар НКТ рамочной программы Евросоюза по 3-му приоритету (нанотехнологии и нанонауки), Иваново, 21 июня 2006 г.; I Межд. науч.-практич. семин. «Техника и технология триболог. исслед-й» Иваново, 5 – 6 окт. 2006 г.; II межд. научно-практич. конф. «Пожарная и аварийная безопасность объектов», Иваново, 21 – 23 дек. 2006 г.; Ежегодных научных конференциях преподавателей и научн. сотр. ИвГУ, 1990 – 2007 гг.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Предложены модельные составы эффективных водных, масляных и пластичных СМ для узлов трения и операций обработки резанием, включающих изученные присадки гетероциклических соединений, а также Гц-присадки в композиции с ПАВ. Предложены методики нейросетевого прогнозирования и молекулярного моделирования для предсказания триботехнических свойств смазочного материала на основе молекулярной природы трибоактивных присадок. Результаты исследования, связанные с разработкой и исследованием новых смазочных композиций для узлов трения машин и обработки материалов резанием, переданы и используются в следующих организациях: ООО «НПО Янтарь» г. Иваново; ООО «ИвХИМПРОМ»; ООО «Заволжский химический завод», г. Заволжск; Факультет механики и автоматики Харбинского технического университета (КНР). Зарегистрированы в Российском реестре программ две ком-

пьютерные программы. Результаты работы нашли применение в учебном процессе кафедры экспериментальной и технической физики Ивановского госуниверситета в виде лабораторных практикумов, курсовых и дипломных работ студентов; вошли в ряд дисциплин, читаемых на факультете.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 75 печатных работах, в том числе в одной монографии, в 7 работах в журналах, входящих в список ВАК, в 5 отчетах по НИР, депонированных в ВИНТИ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 406 страницах, содержит список условных обозначений, введение, восемь основных глав, общие выводы, список литературы из 363 наименований и 4 приложения на 55 стр. Работа включает 175 рисунок и 32 таблицы.

Основное содержание работы.

Во Введении дается общая характеристика исследуемой проблемы, приводятся данные об актуальности, новизне, апробации и практическом использовании результатов работы.

Глава 1 содержит аналитический обзор проблемы действия трибоактивных присадок в составе смазочного материала. Модели смазочного действия у большинства авторов основываются на том, что на поверхностях трения образуются вторичные структуры, предотвращающие непосредственное взаимодействие металлов фрикционной пары. В соответствии с механизмами образования вторичных структур, выделяют следующие модели смазочного действия: 1) контактно-гидродинамическая, 2) химическая и физическая, 3) диффузионно-химическая, 4) физико-химическая (адсорбционно-диспергирующая).

Научные основы применения адсорбционно-активных компонентов СМ были заложены в трудах *П.А. Ребиндера* и *А.С. Ахматова*. Примером количественного описания действия СМ в рамках класса динамических моделей, является капиллярная модель, предложенная *Д. Тейбором* и *Дж. Уильямсом*. Согласно «модели микрокапельного взрыва» (*Годлевский В.А. с сотр.*), проникновение СМ в зону контакта происходит через межповерхностную капиллярную сеть в несколько этапов. Явления саморганизации трибосистем впервые в широком термодинамическом аспекте рассматривались *Л.Б. Бершадским*. Подход, связанный с рассмотрением трибосистемы как диссипативной термодинамической системы, развивал *Д. Тейбор*. Под надмолекулярной самоорганизацией (структури-

рованием) смазочного слоя понимается возникновение упорядоченных, надмолекулярных структур в объеме слоя и на поверхности, которые являются результатом действия межмолекулярных сил внутри СМ под влиянием силового поля поверхности и под действием внутрислойовой сдвиговой деформации.

Рассмотрена проблема применения в качестве трибоактивных присадок жидкокристаллических соединений. Основные результаты в области изучения жидкокристаллических (мезоморфных) систем были получены, главным образом, для объемного состояния вещества. Использование данного подхода для тонких поверхностных слоев встречает сложности при экспериментальном изучении слоя, поскольку в процессе трения он не доступен для исследования. Проблема надмолекулярной самоорганизации смазочного слоя была изучена в работах *А. Кравчика*, который предложил концепцию структурных превращений смазочной среды в зоне трения. Первые сообщения по трибологическому применению дискотических мезогенов появились в 1988 году при использовании жидкокристаллического производного гексаокситруксена, обладающего столбчатой фазой, непосредственно в качестве смазочного материала.

Анализ литературы по применению мезогенных соединений в качестве трибоактивных присадок (*Б.И. Купчинов, Н.В. Усольцева* и др.) дает возможность предполагать, что благоприятным фактором является структурная упорядоченность молекул мезогенных присадок на трущейся поверхности, т.е. формирование *эпитропных мезофаз*. К формированию таких мезофаз склонны соединения, являющиеся термотропными или лиотропными мезогенами. Использование в смазочных композициях в качестве присадок жидких кристаллов обусловлено полифункциональностью их действия – полезным сочетанием антифрикционных, противоизносных, противозадирных свойств. Показано, что общепринятых теоретических критериев подбора присадок, улучшающих смазочные свойства материалов в широком диапазоне режимов трения, пока нет. Первая глава завершается выводами, формулированием цели и задач исследования.

Глава 2 посвящена выбору материалов для исследования: обрабатываемых и инструментальных материалов, базовых жидких и пластичных СМ (ПСМ), поверхностно-активных веществ (ПАВ), органических соединений, присадок гетероциклических соединений, в качестве которых использовали производные фталоцианина. Фталоцианин относят к классу

макрогетероциклических соединений (рис. 1). Производные фталоцианина содержат в молекуле центральный макрогетероциклический фрагмент и боковые (латеральные) заместители. Способность к мезоморфизму производных фталоцианина определяется их молекулярной структурой, а наличие в составе их молекул ряда функциональных групп определяет химическую и трибологическую активность данных соединений как компонентов СМ.

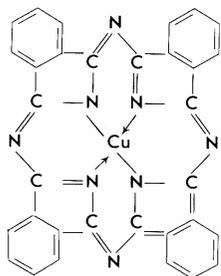


Рис. 1. Структурная формула медного комплекса фталоцианина

В Главе 3 изложены теоретические основы процесса формирования физически адсорбированного граничного смазочного полимолекулярного слоя, который происходит в условиях ограниченного доступа смазочной среды, в частности, для процесса лезвийного резания и трения с элементами адгезионной связи. Описанием такого смазочного процесса является микрокапиллярная модель, отражающая кинетику формирования слоя. Нами эта модель была снабжена описанием этапа надмолекулярной самоорганизации смазочного слоя, что позволило дать оценку характерному времени упорядочения слоя и учитывать это время при расчете общего времени формирования смазочного слоя. Капиллярная теория была разработана для случая формирования граничного смазочного слоя при резании металлов, представляется, что данное описание может быть распространено и на случай трения скольжения, происходящего в условиях частичного задира. На рис. 2 показана адаптация микрокапиллярной модельной схемы к трению скольжения.

Согласно механизму сваривания – среза, два смежных выступа вступают в дискретный адгезионный контакт (см. рис. 2а). Под действием тангенциальной силы эта связь разрывается, и обнажаются две площадки с ювенильными поверхностями, каждая из которых представляет собой стенку межповерхностного микрокапилляра.

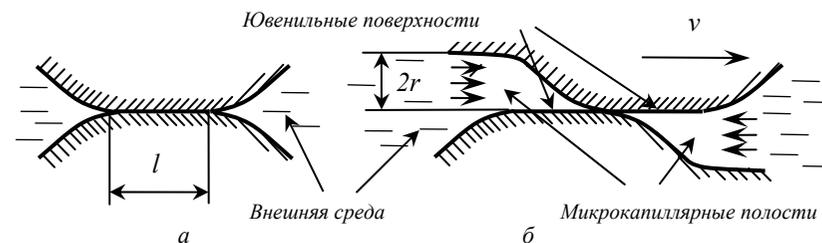


Рис. 2. Вариант микрокапиллярной модели смазочного действия для случая трения скольжения: а — адгезионная связь на вершинах микронеровностей; б — образование двух микрокапиллярных полостей после разрыва адгезионной связи.

Некоторые параметры межповерхностной капиллярной системы при трении скольжения будут иными, чем для резания. Схожими параметрами являются: 1) наличие характерных размеров капилляра r и l , 2) состояние вакуума внутри капилляра в начальный момент разрыва, 3) наличие одного открытого конца, 4) наличие высокой контактной температуры (согласно модели «горячих точек» *Брудена-Тейбора*), превышающей температуру кипения обычных жидких смазочных сред, 5) относительное тангенциальное движение стенок капилляра. Различия в параметрах модели будут следующие: 1) длина капилляра l совпадает со средним размером адгезионного контакта, 2) радиус капилляра связан с высотой неровностей и приблизительно может быть оценен параметром шероховатости R_a , 3) только одна из двух стенок капилляра является активной, 4) кинетика образования смазочного слоя в случае граничного трения имеет в качестве ограничивающих факторов не только скорость скольжения (она определяет «время жизни» капилляра), но и нормальную нагрузку (в предлагаемой модели увеличение нормальной нагрузки может снижать высоту капилляра и тем самым осложнять доступ смазочного материала на ювенильную поверхность).

Если полагать мгновенную температуру в контактных точках большей, чем температура кипения, то можно применить представления о стадийности процесса формирования слоя: а) жидкофазное проникновение, б) испарение, в) заполнение капилляра паровой фазой, г) адсорбция трибоактивного компонента. Соответственно для расчета характерных времен этапов формирования слоя можно применять те же математические выражения, что и ранее применялись для лезвийного резания. Нами

показана возможность использования новой модели для изучения кинетики формирования граничного смазочного слоя путем оценки временных параметров процесса. Чтобы эта модель могла быть включена в описание многоэтапного формирования слоя, она должна позволять рассчитывать характерное время τ образования структурированного слоя толщиной h .

Пусть существует множество молекул присадки, находящихся у поверхности, характеризуемое адсорбционной активностью A молекулы. Поверхность трения (адсорбент) можно характеризовать некоторой величиной — «адсорбционной пассивностью» S . У активности молекулы и пассивности поверхности введем исходный масштаб – ноль. Определим адсорбционную активность молекулы A . Пусть $S_0 = 1$ – пассивность поверхности, принятая за единицу. Тогда

$$A = \frac{P_{A_1}}{q_{A_1}}, \quad (1)$$

где P_{A_1} – вероятность данной молекулы образовать связь со стандартной поверхностью; $q_{A_1} = 1 - P_{A_1}$ — вероятность не образовывать эту связь с поверхностью, $S_0 = 1$. Чем выше вероятность P_{A_1} , тем больше активность молекулы. Определим пассивность поверхности как отношение вероятностей:

$$S = \frac{q_{S_1}}{P_{S_1}}, \quad (2)$$

где q_{S_1} – вероятность молекулы $A_0 = 1$ не образовывать связь, P_{S_1} – вероятность её образовать. Будем полагать, что если есть молекулы с адсорбционными активностями A_1 и A_2 и поверхность с адсорбционной пассивностью S , то

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{P_{A_1 S}}{q_{A_1 S}} \cdot \frac{P_{A_2 S}}{q_{A_2 S}} \quad (3)$$

— величина, не зависящая от S , где $P_{A_1 S}$ – вероятность адсорбции молекулы с активностью A_1 на поверхности с пассивностью S . Если принять, что $A_1 = A$, $A_2 = A_0 = 1$, то вероятность того, что данная молекула с активностью A образует связь с поверхностью пассивности S , имеет следующий характер:

$$\frac{A}{1} = \frac{P_{AS}}{q_{AS}} \cdot \frac{P_{1S}}{q_{1S}}. \quad (4)$$

Поскольку $S = \frac{q_{1S}}{P_{1S}}$; $\frac{A}{S} = \frac{P_{AS}}{q_{AS}} \rightarrow P_{AS} = q_{AS} \left(\frac{A}{S} \right)$ (5)

Пусть $A/S = \xi$ — отношение адсорбционной активности к адсорбционной пассивности. Тогда, поскольку $q_{AS} = 1 - P_{AS}$, получаем однопараметрическую модель

$$P_{AS} = \frac{\xi}{1 + \xi}, \quad P_{AS} = P(A, S) \quad (6)$$

При формировании многослойных адсорбционных слоев в первую очередь формируются слои, вероятность образования которых наибольшая. Поэтому, если h – толщина адсорбционного слоя, то $P(h) = P(\xi(h))$ – вероятность образования слоя толщины h . С целью физической интерпретации отношения A/S используем уравнение Я.И. Френкеля, которое связывает времени адсорбции молекулы τ с молярной теплотой адсорбции Q_a и температурой T :

$$\tau = \tau_0 \exp(Q_a / RT), \quad (7)$$

где τ_0 — время, близкое периоду колебаний атомов в решетке адсорбента.

На основании этого уравнения можно показать, что

$$\frac{A}{S} = \alpha \frac{\tau_0}{\tau_k} \exp(Q_a / RT). \quad (8)$$

Если скорость образования слоя пропорциональна числу соударений молекул с поверхностью $n(t)$ в единицу времени, то :

$$\frac{dh}{dt} = \beta P(h) \cdot n(t), \quad (9)$$

где β – коэффициент пропорциональности. Для полного описания динамики образования слоя, адсорбционная пассивность которого по мере заполнения растёт, возникает необходимость в гипотезе о поведении функции $P(h)$. Пусть

$$-\frac{dP(h)}{dh} = \alpha P(h), \quad (10)$$

т.е. скорость убыли вероятности формирования слоя толщины h , пропорциональна вероятности его формирования, где α – коэффициент пропорциональности. Тогда

$$P(h) = P(0) e^{-\alpha h}, \quad (11)$$

где $P(0)$ — вероятность формирования первого слоя. Последнее уравнение показывает, что пассивность слоев растет, так как вероятность их формирования убывает. После преобразований имеем:

$$\frac{1}{\alpha} e^{\alpha h} = \beta \int n(t) dt + C, \quad (12)$$

где β — коэффициент, n — объемная концентрация присадки, t — время. При $t = 0, h = 0 \rightarrow C = 1/\alpha$. Тогда приходим к выражению

$$\alpha h = \ln \left(\gamma \int n(t) dt + 1 \right), \quad (13)$$

где $\gamma = \alpha \cdot \beta$ — параметр, связанный с процессом надмолекулярного структурирования. При $n(t) = n_0 = const$ получаем зависимость для толщины слоя:

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln (\gamma n_0 t + 1). \quad (14)$$

Если в процессе формирования слоя считать, что $P(h)$ падает в e раз, то характерная толщина сформированного слоя за некоторое время τ равна $h_0 = 1/\alpha$. Тогда можно оценить время формирования слоя τ

$$\tau = \frac{e-1}{\gamma n_0} \approx \frac{1,71}{\gamma n_0}. \quad (15)$$

где n_0 — число соударений молекул с поверхностью

$$n_0 = \frac{1}{2} n \sqrt{\frac{iRT}{3\mu}}. \quad (16)$$

Фактор структурирования γ зависит от степени ориентации молекул, участвующих в образовании слоя.

Четвертая глава посвящена рассмотрению использованных методик триботехнических испытаний. Все выполненные эксперименты можно сгруппировать по методикам испытаний (измерение коэффициента трения, интенсивности изнашивания, предельной нагрузки задира, работы резания, стойкости инструмента) и по видам смазочных композиций, отличающихся базовой основой (водные, масляные, пластичные).

Пятая глава рассматривает исследования триботехнических свойств присадок при трении. При испытании СМ на трибометре ТАУ-1 были поставлены задачи: 1) исследовать возможность снижения трения путём введения в базовую основу исследуемых присадок; 2) определить опти-

мальную концентрацию присадки по параметру коэффициента трения. Гц-присадки демонстрируют эффективность в широком диапазоне концентраций. При этом обнаружена оптимальная концентрация присадки в масляной суспензии (0,25 мас. %), снижение коэффициент трения на 25–30 % по сравнению с базовым маслом.

Выявлено, что антизадирные свойства суспензий мезогенных присадок много выше, чем у чистого минерального масла. Если при малых нагрузках увеличение концентрации присадки в ПСМ приводит к понижению коэффициента трения, то при больших нагрузках изменение концентрации не дает эффекта. Наибольшее увеличение предельной нагрузки задира (до 2-х раз) показала композиция на основе Литол-24 с присадкой Гц 3 (рис. 3). Значительную эффективность по параметру предельной нагрузки задира оказывают соединения с хорошо развитой структурой боковых фрагментов (Гц 3), в то время как незамещенный фталоцианин меди (Гц 6) практически не оказывает положительного действия. В то же время соединение Гц 6 оказалось самым эффективным по влиянию на снижение коэффициента трения.

Следует особо отметить проявление синергизма в экспериментах по исследованию параметра предельной нагрузки задира при совместном использовании присадок. Так, эффективность присадок Гц 1 и Гц 2 в базовой основе Литол-24 составила 55 % и 60 % соответственно, а эффективность Гц 3, которая является смесью двух вышеназванных соединений, составила 100 %.

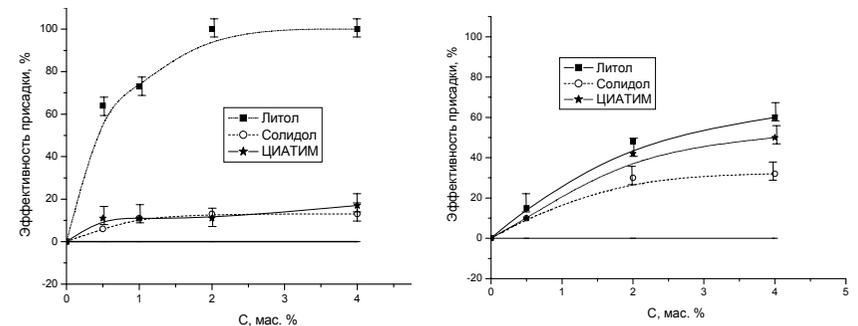


Рис. 3. Изменение предельной нагрузки задира в различных ПСМ при добавлении Гц-соединений по сравнению с ПСМ без примесей: а) мезогенное соединение Гц 3; б) немезогенное – Гц 6

Седьмая глава посвящена исследованию триботехнических свойств Гц-присадок при сверлении и нарезании резьбы. Сопоставляли смазочные свойства одних и тех же СМ при трении скольжения и резания, и выявляли различия в тенденциях, связанных с природой и физико-химическими свойствами присадок. Исследования выполнялись при различных режимах обработки, на разных обрабатываемых материалах (сталь Ст. 3, титан ВТ-00, сталь 12Х18Н10Т) и с использованием различных СМ. Независимо от природы обрабатываемого материала, уменьшение энергозатрат на резание происходит уже при концентрации присадки в 1–2 мас. % (рис. 4).

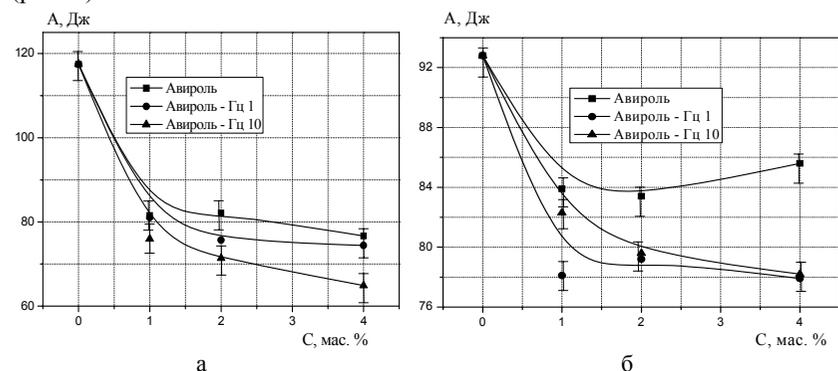


Рис. 4. Зависимость работы (А), затраченной на сверления отверстия, от концентрации (С) Гц-присадки в растворе ПАВ для образца из стали 12Х18Н10Т для двух величин скорости резания: а) $v = 0,08$ м/с; б) $v = 0,16$ м/с.

Измеряли интегральную работу резания, произведенную крутящим моментом в течение обработки отверстия и рассчитывали коэффициент эффективности присадки $k_{эф-1}$:

$$k_{эф-1} = \frac{W_0 - W}{W_0}, \quad (17)$$

где W_0 – работа резания при сверлении с базовым СОТС; W – работа резания при добавлении присадки.

Все испытанные водные СОТС на материалах разной обрабатываемости показали увеличение стойкости режущего инструмента при введении ГЦ-присадок (рис. 5). Исследуемые СОТС снижали энергозатраты на сверлении по сравнению с водой в среднем на 50 %. Данные по резьбона-

резанию (рис. 6) свидетельствуют, что добавка ПАВ и Гц-присадки снижает работу резания по сравнению с водой до 50 %.

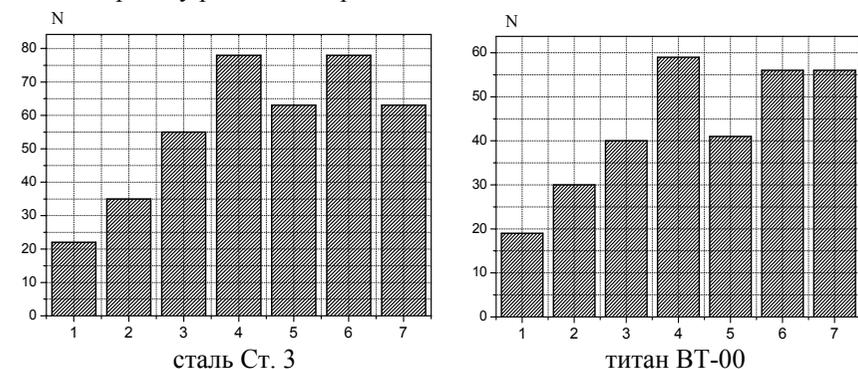


Рис. 5. Зависимость стойкости сверл Р6М5 от природы и состава СОТС и обрабатываемого материала: 1) воздух, 2) вода, 3) масло И-20 А, 4) «Прогресс 13», 5) СРЖН, 6) СРЖН – Гц 1, 7) СРЖН – Гц 10 (N – число просверленных отверстий до затупления).

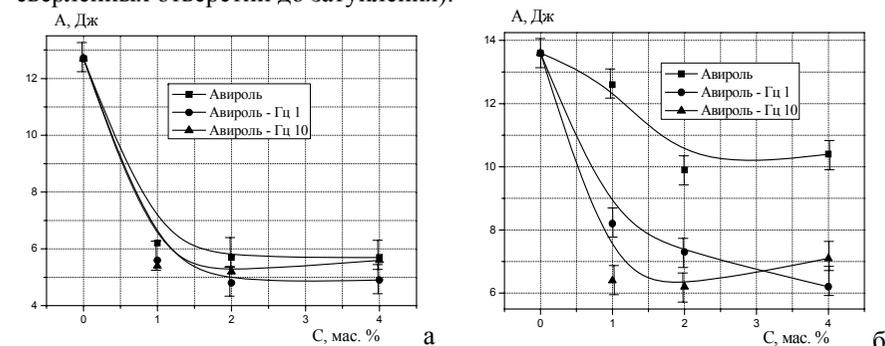


Рис. 6. Зависимость работы (А), затраченной на нарезание резьбы метчиками в стали 45 от концентрации (С) раствора ПАВ с Гц- присадками в образце из титана ВТ-00: а) $v = 0,04$ м/с; б) $v = 0,10$ м/с ($d = 4,2$ мм, $l = 6$ мм.)

Шестая глава посвящена исследованиям физико-химических свойств и надмолекулярной самоорганизации мезогенных и немезогенных присадок. Методом поляризационной микроскопии были получены фотографии слоев, формируемых из водных растворов присадками Гц-соединений на твердой поверхности (рис. 7.), свидетельствующие о том, что молекулы и ассоциаты некоторых исследуемых присадок способны формировать на твердой поверхности упорядоченные слои.

Ни одно из исследованных нами Гц-соединений не проявляет термотропного мезоморфизма, однако некоторые присадки проявляют лиотропный мезоморфизм в водных системах (рис. 7). Установлено, что имеется область формирования мезофазы, значительно сдвинутая в сторону высоких концентраций.

Получены данные о существовании мезофазы и в тройной системе: ПАВ неонол 9/10 – вода – Гц-соединение: третий компонент изменяет текстуру мезофазы. Способность к образованию мезофазы у ПСМ наблюдается без приложения нагрузки. Чаще разрушается лишь структурный каркас, а сами дисперсные частицы остаются неизменными; это может происходить при блокировке активных участков поверхностей частицами Гц-соединений. У некоторых ПСМ с присадками Гц-соединений отмечается агрегирование дисперсных частиц. Степень анизотричности частиц оказывает влияние на прочность связей в структурном каркасе. При наличии в смазке гетероциклических соединений, особенно молекул с разветвленными протяженными заместителями, большей интенсивности механического воздействия должна соответствовать более высокая сдвиговая прочность.

Поляризационно-микроскопические исследования проводились при изменении температуры СМ. На микрофотографиях видно, что при увеличении температуры ПСМ с Гц-присадками приобретают либо более «гладкую» текстуру, либо происходит разрушение микрочастиц и крупных ассоциатов, что должно привести к улучшению антифрикционных свойств. Такое разупрочнение связано с уменьшением коэффициента вязкости при введении в ПСМ и растворы ПАВ Гц-соединений в некотором концентрационном диапазоне. Свойствами, определяющими область применения ПСМ, являются вязкость и термическая стойкость. Нами был обнаружен существенное повышение (до 40°C) термической стойкости ПСМ Литол – 24 при введении в него Гц-соединения.

О возможности формирования производными фталоцианина эпитропного жидкокристаллического слоя на границе раздела фаз можно судить по характеру концентрационных зависимостей поверхностного натяжения (рис. 8). Полученные данные могут быть интерпретированы с позиций физикохимии лиотропных жидких кристаллов. Испытанные нами вещества присадок различаются протяженностью и числом боковых заместителей. Это вещества типа дискотических мезогенов (способные в

растворе формировать надмолекулярные «столбцы»). При этом потенциальной мезогенностью могут обладать как дискогены с протяженными заместителями, так и не имеющие протяженных боковых заместителей, поэтому все такие вещества предварительно рассматривались как потенциальные лиомезогены. Гидрофобным фрагментом молекулы является плоская структура макроцикла, гидрофильные группы представлены боковыми (латеральными) заместителями. Характер заместителей в молекуле производных фталоцианина оказывает решающее влияние на поверхностное натяжение во всем диапазоне концентраций. Обнаружено, что величина смазочного эффекта коррелирует с длиной заместителя.

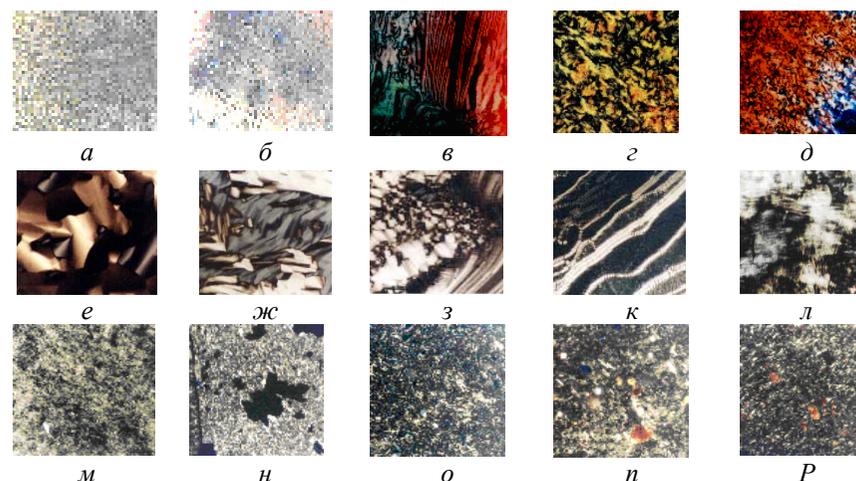


Рис. 7. Микрофотографии текстур СМ и их компонентов: а, б – Гц-соединения в твердом состоянии на опорной поверхности в проходящем свете; в, г, д – водные растворы Гц-соединений в поляризованном свете; е, з, – бинарные системы (неонол–вода); ж, к, л – тройные системы (вода–неонол–Гц-соединение); м) Циатим – 221, Т = 130°C; н) Циатим-221–графит, Т = 165°C; о, п, р – Циатим-221–Гц-соединение, Т = 175°C, 180°C, 165°C.

Обращает на себя внимание немонотонный характер изменения поверхностного натяжения: можно выделить концентрационные интервалы, в которых поверхностное натяжение σ изменяется скачкообразно (рис. 8). Для объяснения скачка в зависимости поверхностного натяжения в диапазоне концентраций $c = 1,0 - 1,5$ мас. % были выдвинуты следующие предположения. Молекулы Гц-соединений проявляют склонность к ассо-

циации: на границе раздела фаз адсорбируются не отдельные молекулы, а их ассоциаты. Ассоциаты молекул Гц-соединений могут располагаться двумя способами (рис. 9 (а, б)). В области концентраций $C = 1,0 - 1,5$ мас. % происходит согласованная переориентация ассоциатов, это приводит к скачку σ . Ассоциаты при ориентации по способу (рис. 9 (б)) располагаются более плотно, что позволяет адсорбировать дополнительное количество вещества на поверхности. Сделан вывод, что зависимость коэффициента трения от концентрации и молекулярной структуры присадки связана со структурными перестройками надмолекулярных ассоциатов (рис. 10).

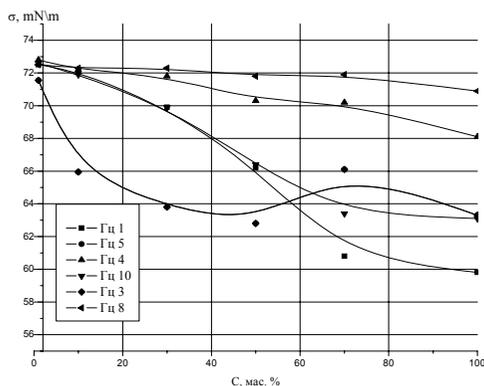


Рис. 8. Зависимости коэффициента поверхностного натяжения (σ) от концентрации (C) для водных растворов Гц-соединений

Молекулы Гц-соединений взаимодействуют по типу пло-кость-плоскость. В модельной системе, содержащей мезоморфный компонент,

надмолекулярный ансамбль (в виде столбца или типа стопки монет) за счет полярных заместителей располагается, вероятно, длинной осью молекул вдоль поверхности металла, обеспечивая скольжение столбцов один относительно другого.

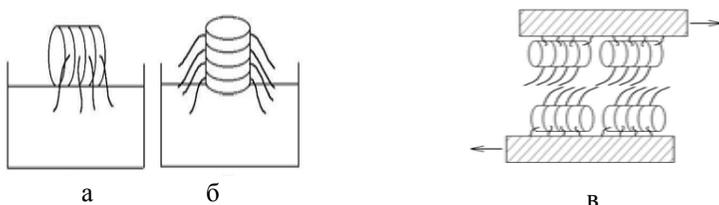


Рис. 9. а), б) — Модели расположения ассоциатов молекул дискотической присадки на поверхности раствора; в) — структура граничного слоя, формируемого Гц-присадкой на сопряженных поверхностях трения.

При повышении концентрации вероятно переориентация этих столбцов (рис. 11) Как правило, присадки, проявляющие в объеме мезоморфное

состояние, улучшают трибологические свойства СМ эффективнее, чем присадки, не обладающие мезоморфными свойствами.

Исследовались растворы выбранных Гц-соединений также и в сочетании с присадками неионогенных ПАВ каламитного (палочкообразного) типа, поскольку амфифилы различных типов в смесях могут проявлять синергизм по различным, в частности, трибологическим, параметрам. Гц-соединения в растворе формируют ассоциаты в объеме и на поверхностях раздела фаз, образуемые путем сближения плоскостей молекул, при этом появляется общая π -сопряженная система.

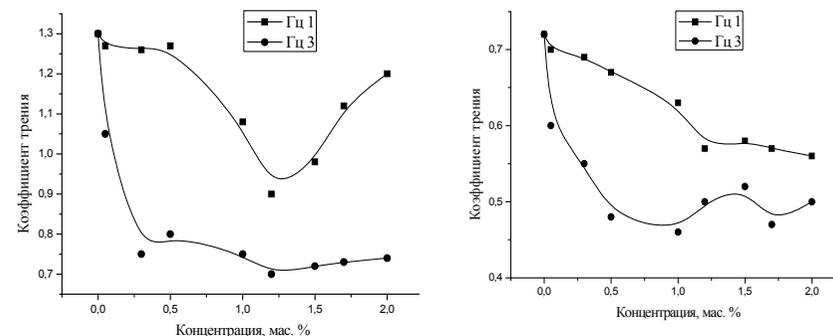


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения сталь - сталь от концентрации и нагрузки: а) нагрузка 10 г.; б) 45 г.

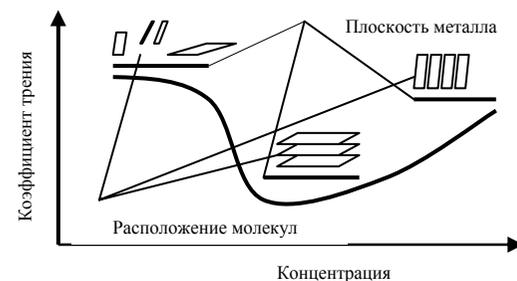


Рис. 11. Схема переориентации дискотических молекул в адсорбционном слое в зависимости от концентрации Гц-соединений

Образованные ассоциаты представляют собой «стопки монет»: при этом во взаимодействие вступают центральные макроциклические группы молекул (рис. 9. (б)). На изотермах поверхностного натяжения растворов Гц-соединений и тройных систем (неонол – вода – Гц-соединение) присутствуют два участка с различной поверхностной активностью. В целом зависимость $\sigma(C)$ напоминает аналогичную зависимость для классических ПАВ. Производные фталоцианина не только снижают поверх-

ностное натяжение, но и способствуют сдвигу концентрационной зависимости.

Была определена взаимосвязь между физико-химическими и триботехническими характеристиками исследуемых составов (рис. 8 и 12.). При первоначальном накоплении присадки в граничном слое, адсорбция происходит по механизму, аналогичному тому, который изображен на рис. 9. При адсорбции (рис. 9. в)) боковые заместители молекулы производного фталоцианина, с одной стороны, прочно удерживают ассоциаты на металлической поверхности. С другой стороны, они создают гибкий «ворс», обеспечивающий легкое скольжение, подобно классическим ПАВ. При больших концентрациях происходит перестройка структуры граничного слоя — плоскости молекул Гц-соединений в ассоциатах оказываются параллельны поверхностям трения.

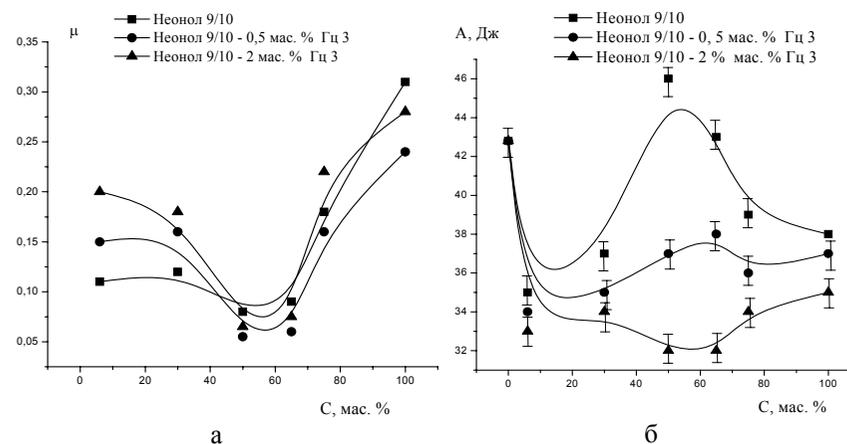


Рис. 12. Триботехнические исследования ПАВ с присадками: изменение коэффициента трения сталь – сталь (а) и работы резания при сверлении стали 45 (б) от концентрации присадок типа ПАВ и ГЦ

Была проведена серия экспериментов по измерению спектров поглощения исследуемых растворов в длинноволновой области. В спектрах Гц-соединений присутствуют две полосы поглощения. Пик первой полосы поглощения соответствует значению волнового числа $\nu = 14,88 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ (672 нм), второй — $\nu = 15,90 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ (629 нм). У производных фталоцианина в спектре поглощения присутствуют две характерные полосы поглощения, одна из которых (670 – 680 нм) соответствует мономолекуляр-

ному состоянию, вторая (610 – 635 нм) — ассоциированному состоянию молекул. Эти опыты подтверждают наличие ассоциативных процессов.

Минимальное поверхностное натяжение в виде плато кривой совпадает с районом нематической (хромонической) фазы (см. рис. 13). Возрастание поверхностного натяжения соответствует концентрационному интервалу гетерогенного района и постепенному переходу к двухфазной области «кристалл – изотропная фаза».

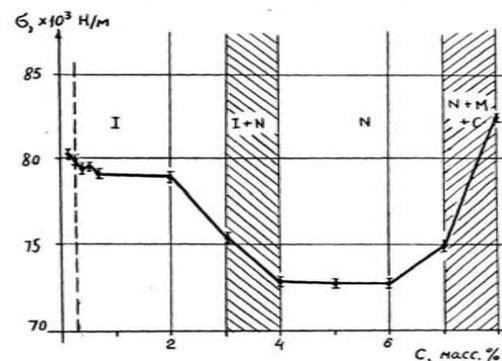


Рис. 13. Изотерма поверхностного натяжения водного раствора Гц 5: I — изотропный раствор; М — хромоническая М-фаза; N — хромоническая нематика; С — кристаллическая фаза

Для изучения ассоциации в растворах нами была использована методика «спектра мутности» растворов (случай, когда ослабление светового потока происходит вследствие рассеяния, а не поглощения). Установлено, что добавка Гц-присадок к растворам ПАВ по-разному влияет на изменение размеров коллоидных частиц в растворе в зависимости от природы ПАВ и присадки; при этом корреляция данных в системе $r(c)$ может быть как положительной, так и отрицательной. Обнаружен рост оптической плотности с увеличением концентрации Гц-присадок. Её зависимость от концентрации является линейной, в то время как зависимость работы резания от концентрации присадки — нелинейна.

Показателем интенсивности адсорбционной пассивации поверхности трения может служить величина электродного потенциала. Непрерывное обновление (зачистка) поверхности металла под раствором представляет собой имитацию процесса возникновения при трении «ювенильных» поверхностей металла и взаимодействия с ними компонентов СМ. Во всем диапазоне концентраций Гц-присадок (предельная концентрация примерно совпадала с их предельной растворимостью) электродный потенциал изменялся в пределах: $-0.38 \dots -0.60 \text{ В}$ (рис. 14). При интерпретации дан-

ных исходили из того, что меньшая (по модулю) величина электродного потенциала соответствует большей пассивации поверхности. Анализ зависимостей показывает, что явно выражены два характерных порога концентраций, соответствующие примерно 0.6 и 8 мас. %. Полагаем, что наблюдаемые перепады потенциала соответствуют структурными перестройками в молекулярных слоях на границе металл – раствор.

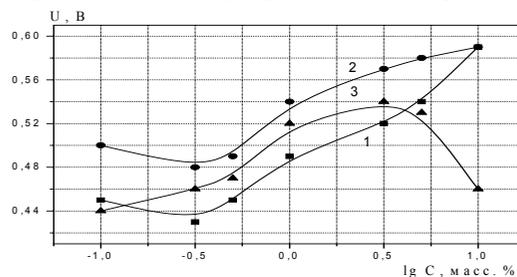


Рис. 14. Зависимость электродного потенциала ϕ образца из стали Ст. 3, непрерывно зачищаемого под раствором, от концентрации Гц-присадки

Дериватографические исследования дают информацию о структурных изменениях в СМ, происходящих при нагреве этих веществ в контактной зоне. Изменения в теплосодержании и потеря массы при нагреве Гц-присадок начинаются уже при относительно низких температурах (40...95°C), а разложение вещества присадки начинается в диапазоне 200...340°C, что свидетельствует о способности молекулы присадки и ее выделять фрагменты распада даже при относительно низкой температуре резания. Введение порошков Гц-соединений в ПСМ приводит к фазовому переходу внутри СМ при температуре 75°C, чего не наблюдается в базовом ПСМ и при добавлении присадки коллоидного графита, поэтому можно говорить о химических превращениях в составе ПСМ при введении Гц-соединений.

Исследовали форму и размер частиц присадок в составе масляных суспензий после ультразвукового диспергирования (рис. 15). Также получены электронные фотографии ПСМ с Гц-присадками (рис. 16). Исследуемые порошки имеют в своем составе частицы с размерами, лежащими в диапазоне от 100 до 300 нм. Ультразвуковое диспергирование суспензий способствует повышению их седиментационной устойчивости. По электронограммам частиц присадок рассчитаны периоды кристаллической решетки.

Исследования кривых течения служат в качестве средства выявления внутренней структуры СМ. Реологические свойства мезогенных соедине-

ний отличают их от изотропных жидкостей. Исследуемые нами системы можно отнести как к ньютоновским, так и к неньютоновским жидкостям (рис. 17).

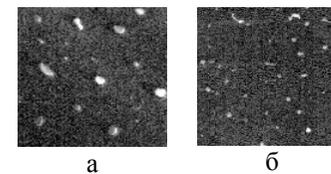


Рис. 15. Электронномикроскопические снимки дисперсий Гц-присадок в масле И-20 А до (а) и после 5 мин ультразвуковой обработки (б). (Увеличение $\times 7200$)

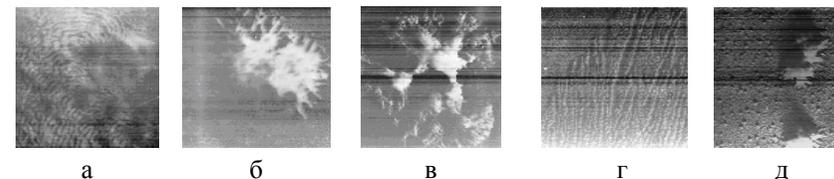


Рис. 16. Электронные фотографии базового ПСМ Литол-24 без присадок и с присадками различных порошков: а) Литол-24 ($\times 35000$) б) Литол – 2 мас. % Гц 1 ($\times 39000$); в) Литол – 2 мас. % Гц 2 ($\times 35000$); г) Литол – 2 мас. % Гц 4 ($\times 35000$); д) Литол-24 – 2 мас. % коллоидный графит ($\times 37500$).

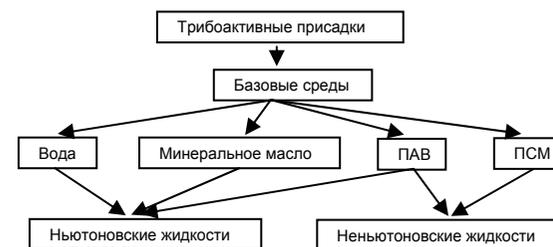


Рис. 17. Классификация исследуемых композиций по типу реологического поведения

Методика вискозиметрических экспериментов для разных СМ была различной: использовали ротационный вискозиметр Брукфилда и капиллярный вискозиметр. С ростом концентрации органического вещества в растворе вязкость монотонно возрастает. Эта зависимость близка к возрастающей экспоненте вида $\eta = A \exp(Bc)$. Добавка Гц-присадки к раствору ПАВ в отдельных случаях приводит к увеличению вязкости. Высокие значения вязкости растворов Гц-соединений отражают их склонность образовывать более крупные надмолекулярные ансамбли, обеспечивающие формирование лиомезофаз.

Исследование зависимости вязкости от концентрации присадки и толщины зазора показало, что при уменьшении зазора с $4,43 \text{ мм}$ до $0,15 \text{ мм}$ значение вязкости в тонком слое больше, чем в объеме, ее рост при повышении концентрации происходит по экспоненте, по сравнению с линейной зависимостью вязкости от концентрации в объемном образце (неньютоновское течение в тонком слое). Для большинства исследованных образцов на измеренных кривых течения (зависимостях вязкости от скорости сдвига) (см. рис. 18) наблюдался спад (т.е. неньютоновское поведение), указывающий на присутствие протяженных надмолекулярных структур, разрушаемых при увеличении механической нагрузки.

Анализ реологических кривых для Гц – соединений показывает, что в различных областях напряжения сдвига композиции ведут себя либо как псевдопластичные жидкости, либо как ньютоновская жидкость — это характерно для низких концентраций при малом напряжении сдвига. В неподвижной среде частицы системы расположены хаотично, а под действием сдвигающих напряжений происходит все большая ориентация Гц-присадки в направлении течения, Установлена корреляция между параметрами мезоморфизма и смазочной эффективностью водных растворов исследуемых веществ. Лучшие из испытанных смазочных составов показывали 30 %-е уменьшение работы сверления (рис. 19).

Сопоставлялись результаты испытаний присадок в двойных и тройных системах (в присутствии ПАВ типа «неонол», проведенных при двух существенно различающихся режимах испытаний (трение на трибометре, и при сверлении). Это позволило оценить особенности поведения присадок в широком диапазоне условий трения и проследить роль молекулярной структуры трибоактивного компонента. При анализе экспериментальных результатов было выявлено аномальное поведение некоторых Гц-присадок в режиме трения скольжения (см. рис. 19.). Нужно отметить, что такие негативные эффекты отсутствуют при малых концентрациях присадки, когда фактор самоорганизации проявляет себя в менее концентрированных адсорбционных слоях. Обращает на себя внимание и то, что подобные эффекты не были обнаружены на операции резания, поскольку в этом случае смазочный слой также обеднен присадкой в силу ограниченности доступа внешней среды в контактную зону.

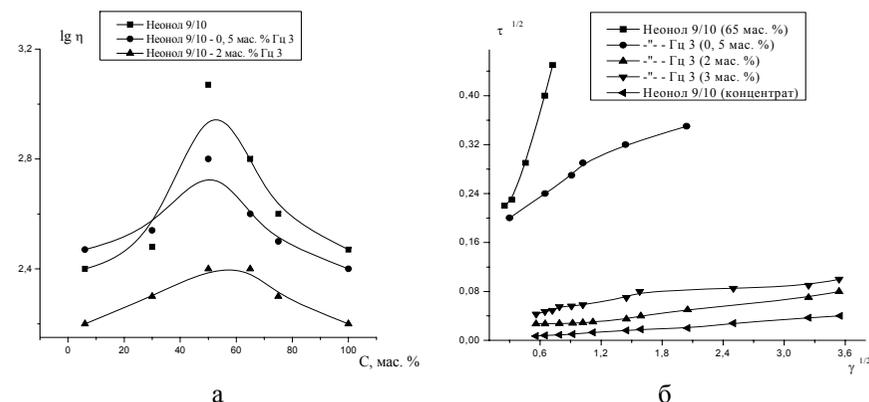


Рис. 18. а) зависимость вязкости от концентрации для неонола с присадками; б) кривые течения в «кассоновских координатах» для неонола с присадками (γ — скорость сдвига, с^{-1} ; τ — напряжение сдвига, Па·с).

При трении в режиме гидродинамической смазки коэффициент трения μ определяется вязкостью, поскольку он отражает сдвиговое напряжение. Область неньютоновского состояния соответствует наибольшей трибологической эффективности для режима гидродинамического трения. В процессе же резания характер течения играет важную роль на этапе жидкофазного проникновения смазочного материала в зону резания: избыточная вязкость ограничивает доступ смазочной среды. При трении скольжения оказывается более эффективным Гц 3, что мы объясняем формированием смешанных надмолекулярных агрегатов, обладающих характером эпитропной мезофазы. Добавка Гц-соединения в значительной мере нивелирует скачок вязкости в зоне гелеобразования ПАВ, что благоприятно сказывается на смазочном эффекте при резании. Пик увеличения вязкости гелеобразного неонола связан с возникновением мезофазы. При сохранении общего структурного мотива, в объеме возникают неоднородности, причинами которых могут являться молекулы Гц-соединения. Добавка данных молекул этот пик сглаживает, но текстура мезофазы меняется вместе с реологическими свойствами; смазочное действие в этом диапазоне концентрации улучшается при резании.

Восьмая глава посвящена компьютерному моделированию смазочного действия СМ. Разработка обобщенной математической модели смазочного действия затруднена сложностью и многоступенчатостью этого процесса. Поэтому одним из эффективных способов предсказания эффективности СМ может служить нейросетевое программирование.

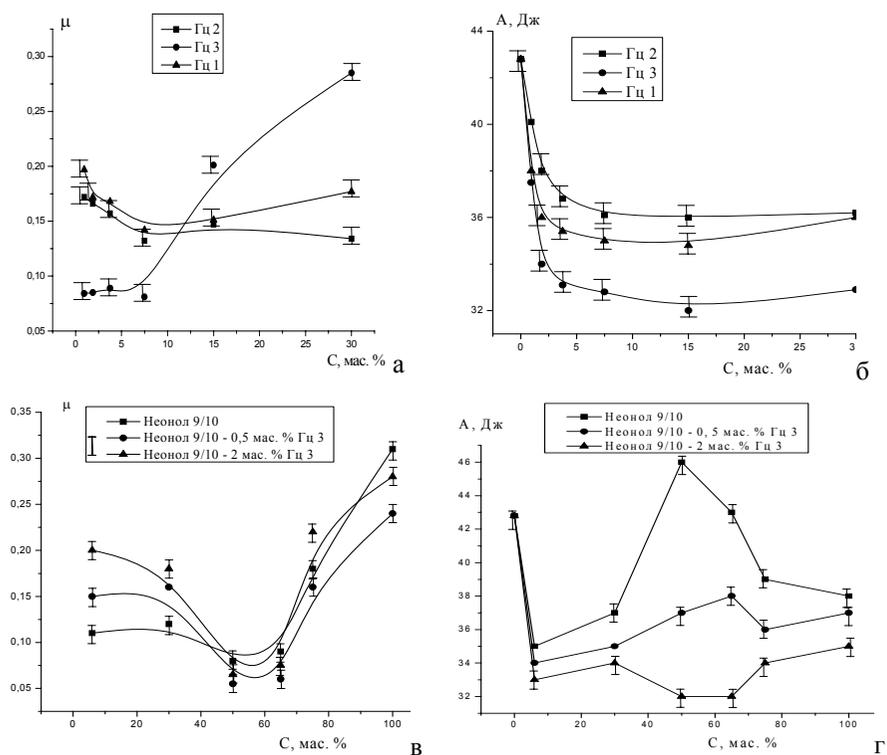


Рис. 19. Триботехнические исследования бинарных и тройных систем Гц-присадок: а) зависимость коэффициента трения μ от концентрации C при максимальной нормальной нагрузке $P = 1,5$ Н; б) зависимость работы резания A (Дж) от концентрации C ; в) изменение коэффициента трения для неонولا с присадками от концентрации; г) изменение работы резания для неонولا с присадками от концентрации

Предложено создать комбинированную (гибридную) модель, в которой обучаемая нейронная сеть была бы включена в финальную стадию расчетного процесса, а на начальной стадии рассчитывался бы относительно небольшой, но достаточный для реализации модели набор обобщенных параметров. На входе сети должен был быть набор физико-химических свойств СМ, параметр адсорбционной активности, элементы режима трения, а выходным параметром должен был быть один из показателей триботехнической эффективности.

Для решения задачи моделирования адсорбционного процесса был использован пакет программ NupurChem v. 6.03 Pro, с помощью которого

был смоделирован плоский кластер, составленных из частиц, образующих поверхность трения. Далее моделировалась адсорбируемая молекула присадки. После этого вычислялась по отдельности полная энергия кластера и данной молекулы. Происходило виртуальное «объединение» кластера и молекулы с помощью алгоритма оптимизации Полака-Рибьера и вычисление энергии этого объединенного кластера. Разность суммы энергий молекулы и кластера по отдельности с энергией адсорбционного комплекса дает оценку энергии адсорбции. Для «обучения» нейронной сети нами был взят ряд модельных веществ — органические соединения различной природы. Помимо индивидуальных органических веществ, использовали и их смеси в различных пропорциях.

Моделирование кластера твердого тела, объединенного со смазочным слоем, состоящем из исследуемых соединений показало, что имеется существенное отличие в расположении молекул различных веществ на поверхности.

Для того, чтобы оценить взаимосвязь расчетной энергии адсорбции ряда Гц-соединений и ее триботехнической эффективности, были проведены измерения коэффициента трения пары сталь — твердый сплав ВК8 в среде водных растворов на трибометре ТAU-1, в результате чего была обнаружена тесная корреляционная связь ($R = 0,96$) между исследуемыми двумя величинами.

Было проведено «обучение» нейронной сети в экспериментах по определению работы резания при сверлении стали 45 сверлами из Р6М5 в модельных средах. (Испытаны 160 модельных составов СОТС.) Обученная нейронная сеть продемонстрировала возможность достаточно точного предсказания триботехнической эффективности произвольного смазочного состава на основании его физико-химических характеристик и параметра адсорбционной активности.

В 4-х приложениях к диссертации приведены дополнительные экспериментальные данные, информация о практическом использовании результатов работы, компьютерные программы, расчет экономической эффективности.

Выводы

1. Создана микрокапиллярная модель формирования граничного смазочного нанослоя при трении скольжения, содержащая описание надмолекулярной самоорганизации присадки и позволяющая рассчитывать характерное время возникновения слоя.

2. Адсорбционно-активные присадки гетероциклической природы проявляют эффективность при различных режимах трения. Испытанные соединения дискотического типа являются перспективными в качестве трибоактивных присадок в составе водных, масляных и пластичных СМ для узлов трения машин и процесса резания.

3. Механизм действия макрогетероциклических присадок связан с их способностью формировать на твердой поверхности упорядоченные слои. Ряд Гц-присадок проявляют лиотропный мезоморфизм в водных системах.

4. У исследуемых ПСМ способность к образованию мезофазы наблюдается и без приложения нагрузки

5. У водных растворов исследуемых неионогенных ПАВ выявлен диапазон концентраций, соответствующий переходу системы в гелеобразное состояние, проявляющее мезоморфные свойства. Диапазон гелеобразования совпадает с наибольшей трибологической активностью в системах ПАВ – Гц-присадки. Выявленные экстремумы на изотермах поверхностного натяжения соответствуют перестройкам надмолекулярных ансамблей дискотического компонента.

6. По данным спектральных исследований растворов изученных в диссертации Гц-соединений, они обладают высокой склонностью к ассоциативным процессам, что влечет за собой повышение полислоевой адсорбционной активности и самоорганизации граничного смазочного слоя.

7. Добавка Гц-соединения в ПСМ ведет к уменьшению вязкости, что связано с внедрением молекул в каркас ПСМ и его разупорядочением. В свою очередь, увеличение напряжения и скорости сдвига также уменьшает значение вязкости, что, по нашему мнению, улучшает проникновение СК в зону контакта согласно микрокапиллярной модели. При введении в ПСМ присадок порошков Гц-соединений выявлено повышение их термической стойкости.

8. В основном область неньютоновского состояния СМ соответствует наибольшей трибологической эффективности для гидродинамического режима трения скольжения. В процессе обработки резанием характер течения играет важную роль на этапе жидкофазного проникновения смазочного материала в контактную зону.

9. Введение гетероциклических присадок в ПСМ при сверлении и нарезании резьбы уменьшает работу резания до 30 % и повышает стойкость инструмента до 2 раз.

10. Гц-присадки, образующие суспензию в минеральном масле, обеспечивают повышение предельной нагрузки задира до 2-х раз.

11. Решена задача расчетной оценки адсорбционной активности трибоактивных компонентов СОТС на основе молекулярного моделирования процесса адсорбции. В основе расчета положено оптимизированное силовое взаимодействие между моделью молекулы исследованного смазочного компонента и моделью кластера кристаллической плоскости, отражающей участок поверхности трения.

12. Построена модельная экспертная система с использованием метода нейросетевого программирования, позволяющая предсказывать трибологические характеристики трибоактивных компонентов на основе их молекулярного строения и физико-химических характеристик.

Содержание диссертации опубликовано в следующих основных работах

1. Берёзина Е.В., Годлевский В.А. Об использовании водных растворов фталоцианинов в качестве трибоактивных присадок к технологическим средам для резания металлов // Изв. АН СССР. Сер. физ. наук. – 1991. – Т. 55. – № 9. – С. 1757–1759.
2. Berezina E.V., Latyshev V.N., Godlevski V.A., Egorov S.A., Zhukova L. To the mechanism of lubrication action of phthalocyanine derivatives solutions in process of metal machining // Molecular Materials (USA). – 1995. – № 5. – P. 57–62.
3. Берёзина Е.В., Латышев В.Н., Коротков В.Б., Годлевский В.А. Исследование механизма действия и разработка эффективных составов СОЖ при резании: отчет по НИР. – Иваново, 1989. Деп. в ВИНТИ. Гос. рег. № 0189.00407553, инв. № 0291.0017820. – 69 с.
4. Латышев В.Н., Ворович И.В., Оношин Н.М., Наумов А.Г., Берёзина Е.В. Исследования трибологических явлений в зоне контакта твердых тел и внешней среды: отчет по НИР. – Иваново, 1990. Деп. в ВИНТИ. Гос. рег. № 0189.0040755, инв. № 0291.0015381. – 41 с.
5. Берёзина Е.В., Латышев В.Н., Годлевский В.А., Егоров С.А., Жукова Л.А. К механизму смазочного действия растворов производных фталоцианина в процессах металлообработки // Изв. АН РФ. Сер. физ. – 1995. – Т. 59. – № 3. – С. 161–165.
6. Латышев В.Н., Волков А.В., Годлевский В.А., Берёзина Е.В. Исследование влияния технологических сред на процессы деформации и разрушения при механической обработке материалов: отчет по НИР. – Иваново, 1994. Деп. в ВИНТИ. Гос. рег. № 01.9.50003933, инв. № 02.9.50003183. – 25 с.
7. Berezina E.V., Godlevski V.A., Latyshev V.N., Usoltseva N.V. The application of the phthalocyanine derivatives as discotical triboactive additives // Tribologia. – 1994. – Vol. 137, № 5. – P. 528–538.

8. Латышев В.Н., Годлевский В.А., Берёзина Е.В., Волков А.В. Физико-химические исследования трибологических процессов при трении и резании металлов: отчет по НИР. – Иваново, 1992. Деп. в ВИНТИ. Гос. рег. № 01.92.0002465, Инв. № 02.95.0003184. – 45 с.
9. Berezina E.V., Latyshev V.N., Usoltseva N.V., Godlevski V.A. Vykova V.V. Tribological properties aqueous solution of the phthalocyanine derivatives // Proc. I-st. Balkan Conf. on Tribology Balkantrib-93, 1–3 October 1993, Sofia, Bulgaria. Vol. 1. – P. 457–464.
10. Berezina E.V., Latyshev V.N., Usoltseva N.V., Godlevski V.A. Vykova V.V. Surface tension and tribological properties of the phthalocyanine copper complex derivatives // Proc. I-st. Int. Symp. on Surfactants. Rovinj, Croatia. May 25–27.
11. Латышев В.Н., Волков А.В., Годлевский В.А., Берёзина Е.В., Егоров С.А., Оношин Н.М. Исследование влияния технологических сред на процессы деформации и разрушения при механической обработке металлов: отчет по НИР. – Иваново, 1995 г. Деп. в ВИНТИ. Гос. рег. № 01.95.0003933; инв. № 02.95.0003183. – 55 с.
12. Berezina E.V., Tararov A.G., Latyshev V.N., Godlevski V.A. Stoichiometry of lubrication films as cutting fluids efficiency factor // Proc. of 1st Int. Conf. «Eurometalworking-94». Udine, Italy, 28–30 Sept. – 1994. – P. 054-1–054-8.
13. Berezina E.V. Godlevski V.A., Latyshev V.N., Usoltseva N.V. The application of the phthalocyanine derivatives as discotical triboactive additives // Tribologia, – 1994. Vol. 137, № 5. – P. 528–538.
14. Berezina E.V., Godlevski V.A., Lazjuk Ju.N., Latyshev V.N., Tararov A.G. The influence of structure building in boundary lubricate layers on the process of machining // Proc. of ICSTFC Conf. 10–11 Oct. 1994. Sofia, Bulgaria. – P. 51–58.
15. Berezina E.V. Latyshev V.N., Godlevski V.A. The cutting lubricants for the materials of low machinability: a new approach // Proc. of 4-th Yugoslav Conf. on Tribology «Yutrib'95». 27–29 Sept. 1995, Herzeg Novi, Yugoslavia. – P. 227–228.
16. Berezina E.V., Latyshev V.N., Godlevski V.A. The new type of surface active additives to cutting fluids — discotical mesogens // Proc. of 10th Int. Colloquium on Tribology 09–11 Jan. 1996. Esslingen, Germany. Vol. 2. – P. 1231-1236.
17. Berezina E.V. Godlevski V.A. Klujev M.V., Tarasova O.V. Comparative investigation of metal-polymer complexes and heterocyclic substances tribological properties // Problemy eksploataci. – 1998. Vol. 30, № 3. – P. 9–28.
18. Berezina E.V., Godlevski V.A. Usoltseva N.V. Molecular self-organization of some disc-like mesogen additives in lubrication layer dur-

- ing friction // Proc. 1st Int. Symp. «Self-Assembly of Amphiphilic Systems». Dresden, Sept. 13 – 16. – 1998. – P. C. 46.
19. Берёзина Е.В. Годлевский В.А. Клюев М.В., Шигорин С.А. Сравнительные исследования трибологических характеристик присадок — металлополимерных комплексов и производных фталоцианина // Изв. вузов. «Серия химия и химическая технология». – 2003, – Т. 44, вып. 8. – С. 34–42.
20. Берёзина Е.В. Годлевский В.А. Усольцева Н.В. Исследование органических пигментов в качестве компонентов СОТС для обработки металлов резанием // Безызносность и триботехнологии. – 2004, № 1. – С. 57–61.
21. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Усольцева Н.В., Быкова В.В., Фомичев Д.С. Трибологическая активность присадок-красителей — мезогенов дискотического типа // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 4. – С. 402-405.
22. Берёзина Е.В. Повышение обрабатываемости сталей и сплавов путем применения синтетических водных СОТС с новыми трибоактивными присадками: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 20.01.93: утв. 09.04.93. – Иваново, 1992, – 190 с.
23. Берёзина Е.В. Годлевский В.А., Усольцева Н.В., Фомичев Д.С., Хрунов А.А. Новые пластичные смазки и смазочно-охлаждающие технологические средства для резания металлов с трибоактивными присадками гетероциклического типа. Московский международный салон инноваций и инвестиций. Москва, ВВЦ. 15 – 18 февраля 2005 г.
24. Берёзина Е.В. Годлевский В.А., Усольцева Н.В., Быкова В.В. Взаимосвязь реологических и трибологических характеристик некоторых дискотических мезогенов, применяемых в качестве трибоактивных присадок // Тез. докл. междунар. конф. «Поликомтриб – 2005». Гомель, Беларусь. 18 – 21 июля 2005. – С. 73.
25. Берёзина Е.В. Годлевский В.А. Усольцева Н.В., Быкова В.В., Хрунов А.А. Трибологическая активность присадок-красителей // Мат-лы междунар. научн. симп. «Славянтрибо – 6», С-Пб. – 2004. – Т. 2. – С. 277 – 282.
26. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Усольцева Н.В., Фомичев Д.С. Исследование присадок-красителей к пластичной СОТС при сверлении стали и в зоне трибоконтакта // Жидкие кристаллы и их практическое использование. Журнал межд. жидкокристал. Общества. – 2004. – Вып. 3/4 (9/10). – С. 54 – 63.
27. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Хрунов А.А., Усольцева Н.В. Изучение концентрационных зависимостей вязкости водных растворов красителей // Жидкие кристаллы и их практическое использование. Журнал межд. жидкокристал. Общества. – 2004. – Вып. 3/4 (9/10). – Иваново. – С. 63 – 72.

28. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Манашов А.А., Ключев М.В. Построение алгоритма расчетной оценки трибологической активности компонентов СОТС при лезвийном резании металлов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. Журнал межд. жидкокристалл. Общества. – 2004. – Вып. 3/4 (9/10). – Иваново. – С. 51 – 54.
29. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Усольцева Н.В., Фомичев Д.С. Исследование взаимосвязи реологических и трибологических характеристик некоторых дискотических мезогенов, применяемых в качестве трибоактивных присадок // Жидкие кристаллы и их практическое использование. Журнал межд. жидкокристалл. Общества. – 2005. – Вып. 3/4. – Иваново. – С. 75 – 85.
30. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Фомичев Д.С. Исследование некоторых гетероциклических соединений в качестве трибоактивных присадок к пластичным СОТС // Физика, химия и механика трибосистем: Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 5. – Иваново. – Изд-во ИвГУ. – 2005. – С. 94 – 97.
31. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Жуковский С.А., Павлов А.С. Молекулярное моделирование процесса формирования граничного смазочного слоя. // Мат.-лы междунар. научно-практич. школы-конференции. «Славянтрибо-7а». – С-Пб–Пушкин. – 2006. – Т. 2. – С. 112–116.
32. Берёзина Е.В. Надмолекулярное строение граничного смазочного слоя, образованного мезогенными присадками. // Мат.-лы междунар. научно-практич. школы-конференции. «Славянтрибо – 7а». – С-Пб–Пушкин. – 2006. – Т. 3. – С. 28 – 37.
33. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Усольцева Н.В., Быкова В.В., Фомичев Д.С. Композиционные смазочные материалы на основе ПАВ с гетероциклическими присадками // VI Московский международный салон инноваций и инвестиций. М., ВВЦ, 7 – 10 февраля 2006 г.
34. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Усольцева Н.В. Явления надмолекулярной организации в граничном смазочном слое // Труды Межд. научно-практич. конф.-выставки «Трибология – машиностроению». М., «Крокус-Экспо». 19 – 22 сентября 2006 г. – 5 с. Электронный ресурс.
35. Berezina E., Godlevskiy V., Manashov A. Neural-Network modeling of lubrication action of cutting fluids// «Insycont'06». 14 – 16 Sept. Krasow, Poland. – 2006. – P. 31 – 36.
36. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Усольцева Н.В. Взаимосвязь триботехнических и реологических характеристик водных растворов дискотических мезогенов // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 3. – С. 337 – 342.
37. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Волков А.В. Процесс формирования физически адсорбционного граничного смазочного полимолекулярного слоя. «Техника и технология трибологических исследований». Иваново. – 2006. – С. 37 – 42.
38. Берёзина Е.В. Мезогенные соединения в качестве трибоактивных присадок // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2006. – № 2. – С. 43 – 46.
39. Берёзина Е.В., Фомичев Д.С. Реологические кривые течения пластичных смазочных материалов // Мат.-лы I-й Междунар. науч.-практич. семина. «Техника и технология трибологич. исслед-й». – Иваново, 5 – 6 окт. 2006 г.
40. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Манашов А.Г. Программа для предсказания триботехнических свойств смазочно-охлаждающих технологических средств на основе данных молекулярной структуры и физико-химических характеристик. ФИПС (Рег. № 2006613662).
41. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Манашов А.Г. Программа расчета и визуализации капиллярной модели и смазочного действия внешней среды при резании металлов. ФИПС (Рег. № 2006613661).
42. Фомичёв Д.С., Берёзина Е.В., Годлевский В.А. Некоторые аспекты возможности повышения срока эксплуатации пожарной техники с точки зрения трибологии // Пожарная и аварийная безопасность объектов: Мат.-лы Второй междунар. научно-практ. конф. – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС РФ. – 2006. – С. 163 – 166.
43. Берёзина Е.В. Производные фталоцианина как присадки к смазочным материалам. Иваново: Изд-во «Ивановский государственный университет». 2007. – 239 с.
44. Берёзина Е.В., Волков А.В., Годлевский В.А. Кинетика формирования адсорбционного граничного смазочного слоя в условиях ограниченного доступа смазочного материала // Трение и износ. – Январь-февраль 2007. – Т. 28, № 1. – С. 6 – 13.

Подписано в печать 28.02.07 г.
Формат 60x84 1/16. Печать плоская. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 120 экз.

Издательство «Ивановский государственный университет»
153025 Иваново, ул. Ермака, 39
(4932) 35-63-81 E-mail: publisher@ivanovo.ac.ru