

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ  
им. В. А. Белого НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

ЕРМАКОВ Сергей Федорович

УДК 538.9:547.922.5:621.892

**ТРИБОФИЗИКА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ В МЕТАЛЛО-  
И БИОПОЛИМЕРНЫХ СОПРЯЖЕНИЯХ**

01.04.07 - «Физика конденсированного состояния»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Гомель-2001

Работа выполнена в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого Национальной Академии наук Беларуси

Научные консультанты: член-корреспондент НАН Беларуси,  
доктор технических наук, профессор  
Б.И. Купчинов

член-корреспондент НАН Беларуси,  
доктор медицинских наук, профессор  
Е.Д. Белоенко

Официальные оппоненты: академик НАН Беларуси,  
доктор технических наук, профессор  
П.П. Прохоренко

доктор технических наук, профессор  
Л.С. Пинчук

доктор биологических наук, профессор  
В.М. Мажуль

Оппонирующая организация: – Гомельский государственный университет  
им. Ф. Скорины

Защита состоится 28.09.2001 г. в 14.00 часов на заседании специализированного совета по защите диссертаций Д 01.14.01 в Институте механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32а, тел. (0232) 77-52-12 факс (0232) 77-52-11

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси.

Автореферат разослан «21» августа 2001 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций

Н. Б. Ростанина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время все большее внимание специалистов в области физики конденсированного состояния привлекают проблемы реализации свойств структурированных слоев жидкости в контакте твердых тел. Хотя сама по себе эта проблема не нова, она все также актуальна в условиях как статического, так и динамического контакта твердых тел, когда наличие в их микрозазоре жидкости с особой структурой определяет степень диссипации энергии трения. Однако, несмотря на значительные успехи в изучении граничных слоев, возникающих в подвижных сопряжениях, ни один технический узел не может конкурировать по трибофизическим характеристикам с естественными суставами. Поэтому изучение биофизических механизмов работы синовиальных суставов представляет огромный интерес в настоящем и ближайшем будущем как проблема, находящаяся на стыке наук и имеющая прикладное значение. Следует отметить, что наиболее плодотворной в последние годы считается концепция, согласно которой аномально низкое трение суставов обеспечивается особой структурой хрящевой ткани и природой смазочного действия синовиальной жидкости. В этом плане весьма многообещающими представляются последние достижения в области физики жидких кристаллов (ЖК), свидетельствующие об уникальности их смазочных свойств. Было обнаружено, что ряду биологических тканей и сред присуще ЖК-состояние. Однако в отношении синовиальной среды подобные сведения отсутствовали.

Вместе с тем, анализ успехов биофизики и трибологии показывает, что на современном этапе идея реализации ЖК-состояния граничных слоев в зоне динамического контакта тел различной природы является актуальной, т.к. она может иметь весьма существенный практический выход, состоящий в использовании реологических и структурных моделей, разработанных в физике ЖК, для решения задач смазочного действия. Поэтому исследование ЖК и определение их роли в смазывании естественных суставов важно с точки зрения дальнейшего раскрытия биофизических закономерностей их динамического контакта. Следует ожидать создания на этой основе как уникальных лекарственных препаратов для лечения суставов, так и развития сложившихся представлений трибологии как основы для разработки новых методов и средств управления трибофизическими параметрами машин и механизмов посредством реализации в зоне контакта состояния смазки, присущего природным трущимся элементам.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа выполнена в соответствии с программами НАНБ по решению важнейших проблем в области естественных наук "Композиты" на 1981-1985 гг. (гос. рег. № 81012862), "Материал 12" на 1986-1988 гг. (гос. рег. № 01.86.0040119), "Медицина 27с" на 1986-1988 гг. (гос. рег. № 01.86.0116873), "Медицина 27т" на 1989-1990 гг. (гос. рег. № 01.89.0006146), "Регуляция-15" на 1991-1995 гг.

(гос. рег. № 19941926), "Материал 95" на 1997-2000 гг. (гос. рег. № 19971512); проектом Фонда фундаментальных исследований РБ (Б95-129) на 1996-1998 гг. (гос. рег. № 19961314); заданиями республиканских научно-технических программ 257/4.11 "Ресурсы и энергосбережение" на 1993-1995 гг. (гос. рег. № 19943064) и 6.05 "Материалы" на 1997-1998 гг. (гос. рег. № 19971517), а также постановлений СМ БССР № 271р от 06.06.89 г. и АН БССР № 383 от 20.06.89 г. на 191В9-1992 гг.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является установление биофизических механизмов аномально низкого трения естественных трущихся органов - суставов и разработка на базе выявленных закономерностей новых принципов управления трибофизическими параметрами биологических и технических диссипативных систем путем реализации в зоне динамического контакта твердых тел мезоморфного нематического состояния граничных слоев, моделирующих свойства, структурные особенности и смазочное действие природных ЖК-соединений.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- разработать методы и средства для прецизионных исследований динамического взаимодействия металло- и биополимерных пар, а также оценки структурно-механических свойств, фазового состояния и смазочного действия ЖК-материалов и содержащих их естественных и искусственных жидких сред;

- установить закономерности уникального динамического поведения синовиальных суставов, идентифицировать природу и ингредиентный состав ЖК-соединений, входящих в многокомпонентную систему естественной смазки суставов, и определить их роль в механизмах аномально низкого трения суставов и динамического взаимодействия искусственных подвижных сопряжении;

- исследовать смазочную способность ЖК-соединений, определить их влияние на трибофизические свойства естественных и искусственных жидких сред, установить связь параметров ЖК-материалов с техническими характеристиками смазываемых ими металло- и биополимерных сопряжении;

- разработать научно-обоснованную концепцию управления трибофизическими параметрами естественных и технических диссипативных систем путем реализации в зоне динамического контакта упорядоченного мезоморфного состояния граничных слоев и на этой основе создать универсальные по механизму действия препараты для лечения суставных заболеваний и высокоэффективные смазочные материалы для машин и механизмов.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются жидкокристаллические соединения холестерина (ЖКСХ), а также естественные и искусственные материалы на их основе. Предметом исследования являются закономерности влияния ЖК-присадок на структурное состояние и трибофизические характеристики природных и искусственных жидких сред,

а также на процессы динамического взаимодействия биологических и технических трибосистем.

Гипотеза. ЖК-компоненты входят в систему естественной смазки суставов, активно участвуя в реализации уникальных биологических механизмов внутрисуставного трения, существенно снижают диссипацию энергии при динамическом контактировании различных по химической природе материалов.

**Методология и методы проведенного исследования.** Разработанная методология исследования заключается в экспериментальном установлении природы и идентификации ингредиентного состава ЖК-компонентов в естественной смазке суставов - синовиальной жидкости, выяснении их роли в реализации мезоморфного состояния смазки и механизмов снижения трения биологических и технических трибосистем, а также в использовании полученных экспериментальных данных для выработки рекомендаций по созданию как искусственных смазочных сред и биологически активных препаратов, адекватно воспроизводящих свойства и характеристики суставной смазки, так и высокоэффективных энергосберегающих смазок для технических узлов трения.

Идентификацию ЖК-структур в синовиальной жидкости осуществляли методами тонкослойной и газовой хроматографии. Фазовое состояние и температуры фазовых переходов ЖК-структур оценивали методом поляризационной микроскопии с применением специально разработанного устройства, позволяющего визуально наблюдать и непрерывно контролировать изменения фазового состояния ЖК-препаратов в зависимости от температуры. Содержание холестерина и его ЖК-соединений в минеральных и синтетических смазочных материалах определяли методами инфракрасной спектроскопии и круговой поляриметрии. Прецизионные трибофизические измерения осуществляли посредством разработанного для этих целей интегрально-счетного метода оценки малых вариаций параметров оптико-электронных сигналов. Этот метод был реализован с помощью электронно-счетного маятникового трибометра, оборудованного системами реализующими микропроцессорную обработку и хранение экспериментальных данных.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** На основании комплексного изучения смазочного действия ЖКСХ, выявленных в природных трущихся органах - суставах, разработана концепция и предложены структурно-механические принципы управления трибофизическими параметрами естественных и технических диссипативных систем. В основу их положены: 1) реализация в зоне динамического контакта твердых тел нематического скольжения граничных слоев; 2) образование в зоне контакта смазочных слоев холестерической структуры, деформации сжатия которых малы, а напряжения сдвига приводят к течению; 3) влияние микробороздок субмикрорельефа опорных поверхностей на образование и планарную ориентацию граничных слоев из молекул ЖКСХ с низким сопротивлением сдвигу.

Впервые получены следующие результаты.

Установлено, что трибофизические и деформационные характеристики естественных суставов обусловлены присутствием в синовиальной среде ЖКСХ с планарно ориентированной структурой и анизотропией микрорельефа поверхностей хрящей. Предложена и обоснована принципиально новая концептуальная модель смазочного действия ЖКСХ при внутрисуставном трении. Ее суть состоит в реализации сильного сцепления молекул ЖКСХ, входящих в состав синовии, с хрящевой поверхностью при специфических параметрах субмикрорельефа последней. Молекулы ЖКСХ, размещаясь длинными осями вдоль ориентированных в направлении преимущественных перемещений микрорельефа на поверхности хрящей, образуют холестерически нематические граничные слои ЖК с низким сопротивлением сдвигу и высокой несущей способностью. Эта модель адекватно описывает смазку ЖК не только суставных, но любых пар трения, независимо от природы входящих в них твердых материалов.

Обнаружена способность ЖКСХ, введенных в смазочные жидкости, обеспечивать трибофизические параметры подвижных сопряжении, близкие к параметрам естественных суставов. Выявлено, что наименьшие значения коэффициента трения при динамическом контактировании твердых тел различной химической природы наблюдаются в области температур, соответствующих мезоморфному состоянию используемых в них ЖКСХ. Показано, что данная закономерность справедлива не только для индивидуальных ЖКСХ и их смесей, но и для растворов этих ЖК-веществ в минеральных и синтетических средах.

Изучены происходящие в процессе статического и динамического контактирования с различными материалами изменения концентрации минеральных и синтетических смазочных сред, содержащих ЖКСХ. Обнаружено, что адсорбция ЖК из их растворов в маслах происходит только на поверхностях трения, а при статическом контакте она отсутствует. Для пары сталь-сталь установлена прямая связь между наведенной при динамическом взаимодействии (трибоиндуцированной) адсорбцией молекул ЖКСХ и изменением коэффициента трения.

Экспериментально-расчетным путем подтверждена полимолекулярная организация адсорбированных слоев ЖКСХ на динамически контактирующих поверхностях. Вследствие реализации эффекта «гость-хозяин» и достаточно сильного ориентирующего действия ЖК на молекулы базового масла, последние также могут непосредственно участвовать в формировании указанных выше полимолекулярных слоев. Поэтому при наличии ЖК толщина граничных слоев может быть намного больше расчетной, если не учитывать участия в формировании полимолекулярных слоев молекул базового масла.

Показано, что продолжительность формирования равновесного микрорельефа динамически контактирующих поверхностей сокращается с ростом концентрации ЖКСХ в смазке. Установлено, что применение ЖК-добавок приводит к образованию специфической двухуровневой организации

профиля поверхностей трения. На плосковершинных выступах микрорельефа образуется регулярный субмикрорельеф с микронеровностями меньшего порядка, чем в случае использования смазок, не содержащих ЖКСХ. Такая топография поверхностей трения, несущих адсорбированную пленку ЖКСХ, обеспечивает наиболее равномерное распределение контактных давлений в зоне трения, а, следовательно, уменьшение диссипативных потерь при трении и повышение несущей способности пары.

Научная значимость работы обусловлена тем, что полученные результаты вносят коренные изменения в существующие представления о биофизических механизмах снижения внутрисуставного трения и являются реальной основой для создания не только эффективных методов терапии и трибокоррекции суставов, но и для разработки используемых в технике высокоэффективных смазочных и самосмазывающихся материалов, реализующих принципы и свойства, присущие естественной смазке суставов.

Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов. Впервые предложены принципы достоверной оценки малых изменений амплитудных характеристик колебательных процессов. Показано, что стробируемое интегрирование исследуемого сигнала и оценка его амплитудных значений посредством величин, пропорциональных площадям полуволн колебаний, с последующим определением их вариаций за период обеспечивают высокую точность цифрового усреднения экспериментальных данных. Разработан новый интегрально-счетный метод и аппаратное обеспечение для их практической реализации.

Разработан защищенный патентами комплекс методов и приборов для трибофизических исследований естественных и технических диссипативных систем, а также для непрерывного контроля фазового состояния и температур фазовых переходов ЖК-препаратов. В нем использованы прецизионные устройства и системы, базирующиеся на методах цифровой схемотехники. Это существенно снизило погрешность измерений и позволило получить высокую воспроизводимость экспериментальных данных.

Создан пакет изобретений на антифрикционные экологически чистые ЖК-присадки. Показано, что разработанные ЖК-присадки к смазочным маслам многофункциональны и обеспечивают увеличение ресурса двигателя внутреннего сгорания (ДВС), повышение его мощности и экономичности. Получено заключение Волжского автомобильного завода на применение ЖК-присадки «Моликристалл» в ДВС легковых автомобилей. На Гомельском заводе пластмассовых изделий выпущена опытно-промышленная партия такой присадки в количестве 50 тонн (160 тыс. упаковок).

Разработаны составы с ЖК-добавками, предназначенные для финишной обработки твердых и сверхтвердых материалов, эффективность которых подтверждена испытаниями в условиях производства изделий из алмазов на Гомельском заводе «Кристалл». Использование этих составов позволило в 4 раза снизить возвраты бриллиантов по причине качества обработки и исключить брак полировки, называемый «седина».

Созданы эффективные самосмазывающиеся материалы на основе древесины и ЖКСХ со стабильными антифрикционными характеристиками, предназначенные для длительной работы без смазки как в нормальных, так и в экстремальных условиях. Технический ресурс работы подшипников скольжения из таких материалов, эксплуатируемых в агрессивной среде при температуре 100°C, в 3-4 раза превышает ресурс работы стандартных подшипников качения.

Социальная значимость полученных результатов заключается в разработке принципиально новых методов и средств лечебной коррекции суставов, создании лекарственных препаратов, содержащих ЖКСХ и адекватно воспроизводящих биофизические свойства натуральной синовии. Завершены работы по постановке и организации их серийного производства на предприятии диагностических и лекарственных препаратов (г. Минск).

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- закономерности влияния ЖКСХ на структурное состояние и смазочное действие естественных и искусственных жидких сред, а также и механизмы динамического взаимодействия металло- и биополимерных подвижных сопряжений;
- концепция управления трибофизическими характеристиками естественных и технических диссипативных систем путем реализации в зоне динамического контакта упорядоченного мезоморфного состояния граничных слоев и регулирования с их помощью несущей способности природных и искусственных смазочных сред;
- определяющая роль динамического контактирования твердых тел в реализации механизма смазочного действия ЖКСХ, заключающегося в адсорбции молекул ЖКСХ на поверхностях трения, формировании полимолекулярных мезоморфных граничных слоев с участием молекул базовой смазки, а также плосковершинного микрорельефа контактирующих поверхностей;
- методология исследования динамического взаимодействия биополимерных пар, оригинальность которой заключается в учете структурной анизотропии микрорельефа поверхностей хрящей и его влияния на их трибофизические характеристики;
- высокоэффективные смазочные и самосмазывающиеся материалы, а также медикаментозные препараты и средства, содержащие ЖКСХ, и результаты их применения.

Личный вклад соискателя наиболее полно проявляется в работах, посвященных разработке методов и средств для прецизионных исследований динамического взаимодействия металло- и биополимерных пар, а также оценке характеристик и свойств ЖК-материалов и содержащих их природных и искусственных жидких сред [2, 7, 22, 31, 49, 54, 55, 59, 63], изучению закономерностей уникального динамического поведения биологических трущихся органов с учетом реализации в их зоне контакта мезоморфного состояния смазки [1, 2, 6, 13, 14, 15, 29, 31, 33, 34, 37, 38, 40, 45, 46, 50, 52,



73], выяснению взаимосвязи антифрикционных и структурно-механических свойств синовиальной среды суставов и роли в ней ЖКСХ [2, 5, 7, 16, 23, 32, 41, 43, 44, 47, 51], исследованию смазочной способности ЖК-соединений и определению их влияния на механизмы трения и свойства технических трибосистем [1, 4, 10, 11, 17, 19, 20, 25, 26, 28, 53], установлению особенностей влияния ЖКСХ на трибофизические свойства самосмазывающихся материалов на основе древесины [12, 27, 35, 39, 42, 57, 61], а также созданию универсальных по механизму действия и применения лекарственных препаратов для лечебной коррекции суставов и высокоэффективных смазочных материалов, содержащих ЖКСХ, [1, 2, 56, 60, 64-70, 72] и заключается в разработке методологии и определении основных направлений исследований, проведении экспериментов и обобщении их результатов, а также написании рукописей печатных работ. В остальных публикациях [3, 8, 9, 18, 21, 24, 30, 36, 48, 62, 71] личный вклад соискателя связан с участием в экспериментах, обсуждении результатов и совместном формулировании выводов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследований были доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях: Международной научной конференции «Трение, износ и смазочные материалы» (Ташкент, 1985), 16 и 17-ом симпозиумах Европейского Общества Ортоартрологов (Сочи, 1987; Будапешт, 1988), научно-технической конференции «Современные проблемы триботехнологии» (Николаев, 1988), 5-ом Международном конгрессе по трибологии «EUOTRIB-89» (Хельсинки, 1989), 28-ом конгрессе Польского Общества Ортопедов и Травматологов (Щецин, 1990), 3-ем Международном симпозиуме трибологических проблем элементов, работающих в контакте (Краков, 1990), Всесоюзной конференции «Модификация древесины» (Минск, 1990), Международных симпозиумах «Древесно-полимерные композиционные материалы» (Гомель, 1991) и «Modyfikacja Drewna '93» (Познаю, 1993), «INTERTRIB '93» (Братислава, 1993), 4-7-ой Международных конференциях по приложениям поверхностного и межповерхностного анализа ECASIA'91-97 (Будапешт, 1991; Катания, 1993; Монтро, 1995; Гетеборг, 1997), 5 и 6-ом съездах травматологов и ортопедов Беларуси (Гродно, 1991; Витебск, 1996), Международной конференции по трибологии «AUSTRIB'94» (Австралия, 1994), Международных научно-технических конференциях «Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии» (Гродно, 1994), «Совершенствование процессов финишной обработки в машино- и приборостроении, экология и защита окружающей среды» (Минск, 1995), «Поликом-2000» (Гомель, 2000), 1 и 2-ом съездах Белорусского общества фотобиологов и биофизиков (Минск, 1994; 1996), Международной конференции Ортопедов и Травматологов «SIROT'97» (Хайфа, 1997), 9-ом симпозиуме Польского Товарищества Ортоартрологов (Краков, 1997), 3-ей Республиканской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (Минск, 1998), Международных симпозиумах «Ин-

женерия, ортопедия и практика ИОР'97» (Белосток, 1997; 1999), Международном симпозиуме «Белтриб-99» (Гомель, 1999).

**Опубликованность результатов.** Основные результаты диссертации опубликованы в 73 работах, в том числе 2 монографиях, 21 статье в научных журналах, 12 статьях в сборниках, 19 тезисах докладов на конференциях, 18 авторских свидетельствах и патентах на изобретения и 1 дипломе на открытие «Свойство синовиальной среды обеспечивать высокую антифрикционную хрящей в суставах человека и животных», выданном международной ассоциацией авторов научных открытий. Общий объем опубликованных материалов составляет 755 стр.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 297 стр., включая 100 рис. на 42 стр., 30 табл. на 17 стр., приложения на 47 стр. и список использованных источников из 335 наименований на 25 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведены обзор и анализ современного уровня развития смазочных материалов и структурирующих присадок в трибофизике. Систематизированы данные о их пластифицирующем, диспергирующем и экранирующем действии на поверхности твердых тел в зоне динамического контакта. Проанализирована роль молекулярно-кинетических и структурно-механических факторов в реализации экранирующего действия смазочных материалов. Подробно рассмотрены закономерности и механизмы поверхностной активности естественных и искусственных смазок. Показано, что ни один из известных механизмов трения и изнашивания твердых тел в присутствии смазочных сред не дает исчерпывающего объяснения аномально низких антифрикционных характеристик суставов. Отмечено, что среди многообразия гипотез, объясняющих феномен динамического взаимодействия в естественных трущихся органах, не затронуты аспекты, касающиеся возможности образования при граничном трении межфазных слоев жидкокристаллической структуры, а также оценки участия ЖК-соединений в процессах функционирования суставов и трения твердых тел. С учетом особенностей строения ЖК-веществ рассмотрены наиболее вероятные предпосылки их эффективного использования в трибологии и артрологии.

На основании проведенного анализа работ в области исследования трения, изнашивания и смазки естественных и технических трибосистем с учетом уникальных с точки зрения трибофизики физико-химических и структурных свойств ЖК-соединений сформулированы цель и задачи исследования.

## ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ, ТЕХНИКА И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из поставленных задач, для исследования были выбраны различные по физико-механическим характеристикам, химическому составу и строению материалы. В экспериментах использовались ЖКСХ и их смеси с необходимыми диапазонами мезофазы. В качестве биологических объектов применяли: плечевой сустав (*articulatio humeri*) с обширным объемом движений; межсуставные хрящи или мениски - медиальный и латеральный (*menisci medialis et lateralis*) коленного сустава (*articulatio genus*) и синовиальную жидкость (*synovia*). Для выяснения особенностей трения и состояния поверхностей твердых тел, обусловленных различными видами смазок, исследовали образцы из меди М-1, стали 45, латуни Л-62, латуни ЛМЦС-58-2-2 и стекла, В качестве смазочных сред использовали минеральные и синтетические масла: МС-20 (ГОСТ 2174-76), веретенное (ГОСТ 1642-75), ПЭС-В-2 (ГОСТ 16480-70), ПЭС-5 (ГОСТ 13004-67), ПМС-200 - ПМС 400 (ГОСТ 13032-77). Инактивным смазочным материалом служило медицинское вазелиновое масло (ГОСТ 3164-72). Исследования адсорбции присадок из растворов смазок на твердых поверхностях проводили с использованием порошков меди, железа и стекла. Для разработки самосмазывающихся материалов применяли древесину березы. Модифицирование древесины осуществляли с помощью традиционных методов и разработанного нами СВЧ-метода пропитки капиллярно-пористых материалов.

Физико-механические свойства композиционных материалов определяли на стандартном оборудовании по соответствующим методикам.

Для осуществления прецизионных трибофизических измерений был создан пакет изобретений, защищающий интегрально-счетный метод регистрации малых вариаций амплитуды колебаний и схемотехнические принципы его осуществления, и разработан электронно-счетный маятниковый трибометр с микропроцессорной обработкой и хранением экспериментальных данных. Установлено, что с точки зрения трибометрии не менее информативной характеристикой, чем амплитуда колебания, является ее изменение или вариация за период. Показано, что:

1) изменение амплитуды за период или за цикл колебания маятника есть мера силы трения в опорном узле за тот же промежуток времени; 2) зависимость таких изменений или вариаций амплитуды колебаний от числа циклов адекватна зависимости силы трения от скорости скольжения в опорном узле. Проблема заключается в том, каким образом наиболее достоверно определять малые вариации амплитуды убывающих колебаний.

Анализ показывает, что это непростая задача. С одной стороны, значительно увеличиваются требования к точности измерения самой амплитуды колебаний. С другой - ввиду малости ее изменений, регистрируемых за цикл, возникает необходимость более тщательного учета и оценки помех и шумов, всегда присутствующих в полезном сигнале. Последние могут быть соизмеримы или превышать по величине оцениваемые вариации амплитуды коле-

баний (рис. 1). Очевидно, что известные методы измерения максимальных значений сигналов, например, устройства выборки с запоминанием или схемы пиковых детекторов, в данном случае неприменимы, т.к. из-за значительного разброса данных, получаемых при их использовании, может потеряться смысл предлагаемых для анализа зависимостей этих вариаций от числа циклов (рис. 2 кривая 3).

Разработанный метод и устройства позволяют исключить указанные выше недостатки и достичь высокой точности измерений амплитуды затухающих колебаний и ее вариаций (рис. 2, кривые 2 и 4). Суть его заключается в стробируемом интегрировании входного сигнала. Последнее осуществляют посредством преобразования аналогового сигнала в частоту следования последовательности импульсов, подсчета их количества за время, соответствующее длительности исследуемой полуволны колебания, и определения величин, пропорциональных площадям четных или нечетных полувольт колебаний. Далее, на основе полученных результатов, определяют амплитуды колебаний и их вариации за период. Отмечено, что посредством аналого-цифровых преобразований, заложенных в предлагаемом методе, выполняется практически идеальное цифровое усреднение получаемых экспериментальных данных,

чем обеспечивается их высокая точность и достоверность. Оценим преимущества предложенного метода определения амплитудных значений сигналов в сравнении с известными методами и средствами их регистрации. Для этого,

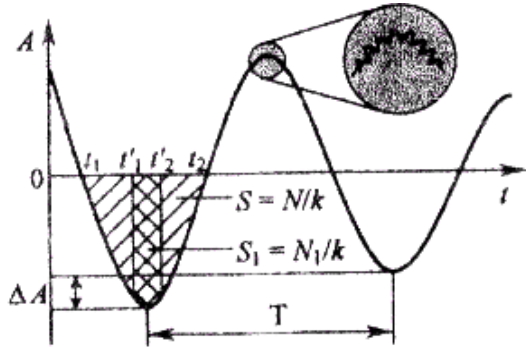


Рис. 1. Кривая затухания колебаний маятника и ее фрагмент с учетом помех и шумов, присутствующих в полезном сигнале (расшифровка величин, приведенных на рис., дана в тексте).

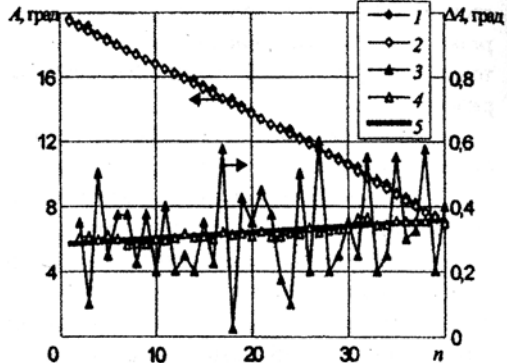


Рис. 2. Зависимости амплитуды углов колебаний маятника (1, 2) и ее вариаций за период (3, 4) при трении пары сталь-сталь (схема «вал-втулка»), при смазывании минеральным маслом МС-20, нагрузке 10 Н), полученные разными методами: 1, 3 - известным методом выборки сигнала в области его максимального значения; 2, 4 - разработанным методом; 5 - лилейная аппроксимация экспериментальных данных.

с учетом разработанного интегрирующего аналого-цифрового преобразования, по формуле (I) определим число импульсов  $N_1$ , соответствующее выборке сигнала в некоторой области, близкой к области его амплитуды  $A$  (рис. 1)

$$N_1 = \frac{Ak(\sin\omega t'_2 - \sin\omega t'_1)}{\omega} \quad (1)$$

где:  $\omega = 2\pi/T$  - круговая частота;  $T$  - период колебания в исследуемый момент времени;  $k$ - коэффициент преобразования.

Число импульсов, соответствующее этой же выборке сигнала с учетом известных методов аналого-цифрового преобразования, также может быть определено как

$$N'_1 = Ak(t'_2 - t'_1) \quad (2)$$

Тогда, используя формулы (1) и (2), а также то, что в обоих случаях используются одни и те же общие элементы аналого-цифрового преобразования, например, преобразования типа «напряжение - частота», и соблюдается условие  $N_1 = N'_1$ , получим выражение для амплитуды в области исследуемой выборки сигнала

$$A_1 = \frac{N'_1}{k(t'_2 - t'_1)} = \frac{A(\sin\omega t'_2 - \sin\omega t'_1)}{\omega(t'_2 - t'_1)} \quad (3)$$

Анализ этого выражения показывает, что значение амплитуды сигнала  $A_1$ , т.е. значение, получаемое с помощью известных аналого-цифровых приемов его выборки, будет всегда меньше его истинного значения  $A$  или значения, получаемого с помощью разработанного интегрально-счетного метода. В пределе при достаточно узких выборках  $A_1 \rightarrow A$ . Иначе говоря, с уменьшением длительности выборки погрешность в определении амплитудного значения сигнала уменьшается. Однако уменьшение длительности выборки приведет к уменьшению числа просчитываемых импульсов  $N_1$ , а, следовательно, к увеличению приведенной погрешности счета  $\sigma_{N_1}$ , оцениваемой как величина, обратная числу просчитываемых импульсов и выраженная в процентах. Следовательно,  $\sigma_{N_1} > \sigma_N$ . При этом с учетом выражения (1) и свойства симметрии тригонометрических функций следует, что приведенная погрешность счета предлагаемого интегрирующего аналого-цифрового метода определения амплитудных значений колебаний  $\sigma_N$  будет в  $1/\sin\omega t$  раз меньше аналогичной погрешности известных аналого-цифровых методов  $\sigma_{N_1}$ .

Анализ показывает, что при значительном уменьшении длительности выборок с целью наибольшего приближения измеряемой величины (амплитуды сигнала) к его истинному значению функция  $\sin\omega t$  будет стремиться к нулю, а величина, обратная этой функции, - к бесконечности. Отсюда очевидно преимущество предлагаемого метода оценки амплитуды колебаний, а значит и их вариаций перед известными методами регистрации аналогичных параметров колебательных процессов.

Разработан новый способ исследования смазочных жидкостей для суставов и созданы прецизионные электронно-счетные маятниковые трибометры, реализующие данный способ и максимально приближающие условия испытаний к естественным условиям трения в природных суставах. Сущность способа заключается в том, что в предварительно расчлененный сустав животного вводят натуральную синовиальную жидкость, задают колебательные движения маятника и определяют амплитуды колебаний, по разности которых судят о величине трения в суставе с жидкостью, затем синовиальную жидкость удаляют, с последующим введением в этот же сустав исследуемой жидкости, и процедуру измерений повторяют, а о смазочной способности исследуемых жидкостей судят по разности полученных для них результатов и результатов для естественной синовиальной жидкости.

Создана оригинальная установка торцевого трения, в состав которой входят ряд устройств и систем, базирующихся на современных достижениях цифровой схемотехники. Установка позволяет измерять и автоматически контролировать в процессе испытаний силу трения, скорость скольжения, линейный износ, деформацию поверхностей трения при варьировании в широких пределах как скоростей вращения, так и приложенной нагрузки. Использование в установке прецизионных устройств и систем, отвечающих современным достижениям цифровой схемотехники, существенно повысило точность и достоверность определения триботехнических характеристик металлополимерных и биополимерных пар трения. Это, в конечном итоге, позволило добиться высокой воспроизводимости экспериментальных данных при изучении трения не только искусственных, но и естественных трущихся элементов, а также исследовании смазочной способности используемых в них лубрикантов и медикаментозных препаратов.

Предложены методики и оборудование для определения содержания ЖКСХ в смазочных составах на основе минеральных и синтетических масел. Показано, что зависимость величины угла вращения плоскости поляризации света от концентрации ЖК в маслах носит линейный характер, а разная интенсивность поляризации объясняется как различиями в строении молекул, так и различной молярной массой исследуемых ЖК-соединений.

Разработан метод и аппаратное обеспечение, позволяющие визуально наблюдать и непрерывно контролировать изменения фазового состояния ЖК-препаратов в зависимости от температуры. Их суть состоит в том, что по мере нагревания ЖКСХ, расположенных между скрещенными поляроидами микроскопа, при фазовых переходах происходит изменение светового потока, которое регистрируется с помощью встроенного в оптическую систему фотозлемента, и определяется зависимость интенсивности света, проходящего через образец ЖК, от температуры нагрева последнего. С применением данного метода экспериментально установлено, что для двухкомпонентных ЖКСХ (в отличие от многокомпонентных) в широком диапазоне концентраций наблюдается практически линейная зависимость температур перехода композиций в жидкокристаллическую фазу и фазу изотропной жидкости.

### ГЛАВА 3. РОЛЬ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ В СНИЖЕНИИ ВНУТРИСУСТАВНОГО ТРЕНИЯ

В настоящее время не существует теории, однозначно объясняющей механизм и природу низкого трения и изнашивания суставов живых существ. Несмотря на значительные достижения в области триботехники, природа намного опередила исследователей в создании энергосберегающих подвижных сочленений. Большинство исследователей считают, что этот феномен обусловлен особыми свойствами хрящевых поверхностей трения и взаимодействующей с ними синовиальной жидкости. При сближении хрящевых поверхностей низкомолекулярные компоненты синовии проникают в объем хряща. Последнее приводит к загущению прослойки жидкости в зоне контакта, вследствие чего распределение нагрузки в суставах определяется реологическими свойствами синовии.

В ряде последних работ показано, что изменение вязкости синовии и концентрации в ней кислотных компонентов не оказывает влияния на трение пары хрящ—хрящ. Следовательно, объяснить низкое трение в суставах только реологическими свойствами синовии не представляется возможным.

Для установления параметров, определяющих физико-химическую активность синовии, аналогично механизму действия ПАВ, нами исследованы процессы трения хрящей в паре с активным (медь, сталь 45) и неактивным (стекло) по отношению к жирным кислотам материалами в присутствии синовиальной жидкости, воды, вазелинового масла без добавок и с добавками олеиновой кислоты. Установлено, что добавка олеиновой кислоты в воду при трении хряща в паре с активным материалом приводит к увеличению коэффициента трения в 2-3 раза и исчезновению структурной анизотропии поверхностных слоев хряща. Добавка олеиновой кислоты в воду при трении хряща по неактивной поверхности не приводит к изменению коэффициента трения. Анизотропия поверхностных слоев не нарушается, однако в этом случае обнаружены сферические частицы продуктов износа. В то же время, в случае использования синовиальной жидкости для активных и неактивных контртел, коэффициент трения практически оставался неизменным и продукты износа не наблюдались.

На наш взгляд, уникальная смазочная способность синовиальной среды может быть обусловлена наличием в ней ЖК-веществ. Это утверждение базируется на следующих фактах: при нагружении смазочной прослойки деформации сжатия в ЖК очень малы, а напряжения сдвига приводят к течению прослойки; на поверхности твердых тел молекулы нематических и холестерических ЖК ориентируются длинными осями вдоль бороздок микрорельефа; молекулы ЖК способны ориентировать параллельно себе молекулы базового масла; поверхности хряща имеют бороздчатый микрорельеф; живые организмы содержат ЖК-соединения - сложные эфиры холестерина, способные при определенных условиях реализовывать холестерическую мезофазу; добавки ЖК-веществ в смазку снижают коэффициент трения твердых тел.

Химическим анализом по методу Илька установлено, что содержание холестерина в синовиальной жидкости животных достигает  $1,0 \pm 0,2$  ммоль/л, а человека -  $3,8 \pm 0,4$  ммоль/л. Методами тонкослойной и газожидкостной хроматографии определены жирнокислотный состав экстрагированной липидной фракции синовии и присутствие в ней эфиров холестерина (табл. 1).

Таблица 1  
Состав эфиров холестерина, идентифицированных в синовиальных жидкостях при артритах различной этиологии

Эфиры холестерина	Молекулярная масса, у.е.	Содержание эфиров холестерина при различных синовитах, %		
		пигментный ворсинчатоузелковый	ревматоидный	травматический
Холестерилпальмитат	624	$25,1 \pm 1,9$	$26,2 \pm 1,1$	$24,1 \pm 2,3$
Холестерилпальмитолсат	622	$1,5 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,9$
Холестерилстеарат	636	$10,5 \pm 2,6$	$9,1 \pm 0,3$	$8,7 \pm 0,8$
Холестерилолеат	650	$22,0 \pm 0,9$	$23,6 \pm 2,0$	$25,1 \pm 0,7$
Холестериллинолеат	649	$32,0 \pm 1,2$	$32,1 \pm 1,9$	$31,6 \pm 2,8$
Холестериларахвдонат	672	$8,9 \pm 0,7$	$6,9 \pm 0,3$	$7,1 \pm 1,9$

Таким образом показано, что естественная смазка суставов содержит смесь эфиров холестерина. Последние известны как термотропные ЖК-соединения с интервалами мезофазы в широком диапазоне температур и структурной организацией холестерического типа. Поэтому естественным было полагать, что при их определенном качественно-количественном соотношении образуется ЖК-смесь с интервалом мезофазы в области физиологических температур, а, следовательно, можно ожидать, что и сама суставная смазка имеет ЖК-состояние при тех же температурах.

Проверку данного предположения осуществляли экспериментально. Термополяризационные микроскопические исследования показали, что препараты высушенной синовиальной жидкости содержат оптически активные включения. При скрещенных поляроидах светящиеся точки или области изменяют свою окраску и интенсивность пропускания света при вращении препарата. Показано, что нагревание препаратов выше  $24-26^\circ\text{C}$  приводило к плавлению светящегося вещества, а выше  $40-43^\circ\text{C}$  - к исчезновению его свечения. Охлаждение препаратов ниже  $40-43^\circ\text{C}$  вызывало вновь появление светящихся точек и областей. Такое поведение вещества позволило сделать вывод, что в области температур  $25-41^\circ\text{C}$  оно ведет себя как термотропное жидкокристаллическое соединение.



Оценка температурного интервала мезофазы натуральной синовиальной экстрагированной липидной фракции и полученных из нее липосом, а также экстракта суммарного холестерина методами дифференциальной сканирующей микрокалориметрии и флуоресцентных зондов показала, что синовиальная жидкость и изолированные из нее компоненты существуют в ЖК-состоянии в области физиологических температур, что обусловлено преимущественно наличием в синовиальной жидкости сложных эфиров холестерина.

Анализ модельных систем (псевдосиновиальные жидкости), основу которых составляют водные растворы полимеров, содержащих ЖКСХ, термополяризационным микроскопическим методом позволил установить у них свойства, характерные для препаратов синовиальной жидкости. Показано, что структуры высушенных образцов синовиальной и псевдосиновиальной жидкостей аналогичны и представляют собой дендриты, равномерно расположенные на поверхности стекла.

Исследования трения пары хрящ-хрящ с помощью маятникового трибометра в присутствии псевдосиновиальной жидкости (водный раствор 0,8-4 масс.% Na-карбоксиметилцеллюлозы), синовиальной жидкости с содержанием холестерина 0,9 ммоль/л и псевдосиновиальной жидкости с 2%-ной добавкой эфира холестерина показали, что добавка в псевдосиновиальную жидкость ЖКСХ приводила к такому же снижению трения, как и синовиальная жидкость. Отмечено, что для синовиальной жидкости с увеличенным содержанием холестерина смазочная способность в условиях граничного трения повышается.

Это подтверждается результатами изучения трения пары хрящ-стекло при постоянных параметрах трения и смазочной среде. Так, последовательная замена образцов хряща новыми, не подвергавшимися испытаниям, приводит к снижению коэффициента трения. Этот эффект наблюдается при смазке синовиальной жидкостью, вазелиновым маслом и кремнийорганической жидкостью. Исследование дорожек трения на стекле методом поляризационной микроскопии показало присутствие на них оптически активных включений. Следовательно, можно полагать, что замена образцов хрящей увеличивает концентрацию ЖК-веществ в исследуемом объеме смазки, вследствие чего и происходит снижение коэффициента трения.

Исследование поверхностей трения хрящей методом растровой электронной микроскопии показало, что коллагеновые волокна и микробороздны между ними ориентированы в направлении преимущественных перемещений (локомоций) в суставе (рис. 3). Выявлено, что анизотропия микрорельефа в сильной степени определяет величину

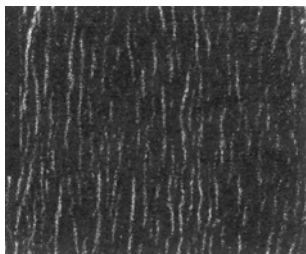


Рис. 3. Анизотропия микрорельефа поверхности хряща. Ориентация бороздок микрорельефа совпадает с направлением преимущественных локомоций в суставе. 300x375 мкм

коэффициента трения пары хрящ-стекло при смазке синовиальной жидкостью. Наименьшие значения коэффициента трения наблюдаются при перемещении вдоль коллагеновых волокон. Установлено ориентирующее действие микрорельефа поверхности хряща, которое приводит к преимущественной ориентации молекул ЖКСХ в направлении локомоций. В результате сдвиг локализуется в жидкокристаллической структуре смазки, а незначительное межмолекулярное взаимодействие ее слоев (как и в твердых кристаллах на плоскостях спайки) обеспечивает минимальную диссипацию энергии, а, следовательно, и низкое трение при относительном перемещении хрящей в суставе. Это подтверждается тем, что псевдосиновиальные жидкости, содержащие ЖКСХ, обеспечивают смазочное действие, характерное для натуральной синовии. Так, экспериментально показано, что введение в псевдосиновиальную жидкость ЖКСХ приводит не только к снижению коэффициента трения, но и к свойственному синовиальной жидкости характеру зависимости его от нагрузки (таблица 2).

Таблица 2

Зависимости коэффициента трения и деформации хряща при сжатии от нагрузки

$p$ , МПа	Синовия		Псевдосиновия +ЖКСХ		Кремнийорганическая жидкость	
	$f, 10^{-3}$	$\Delta l$ , мкм	$f, 10^{-3}$	$\Delta l$ , мкм	$f, 10^{-1}$	$\Delta l$ , мкм
0,2*	14	0	15	0	85	0
0,6	9	240	9	240	40	250
1,0	7	424	8	450	30	470
2,0	9	634	10	630	20	650
4,0	10	888	10	890	20	820
6,0	13	1117	13	1125	20	1100

\*Деформация хряща ( $\Delta l$ ) при  $p = 0,2$  МПа бралась за начало отсчета

Суставной хрящ в комплексе с синовиальной жидкостью проявляет лабильность, т. е. способность быстро и тонко реагировать на изменения, происходящие в суставе, в том числе изменения скорости и нагрузки. Показано, что при трении по стеклу в присутствии синовиальной жидкости и псевдосиновиальной с добавкой ЖКСХ для обоих случаев (в процессе трения при ступенчатом нагружении от 0,2 МПа до 6,0-9,0 МПа и затем быстрой разгрузке до 0,2 МПа) наблюдались одинаковые значения и характер изменения коэффициента трения (см. таблицы 2 и 3).

Зависимости коэффициента трения и деформации хряща от времени при снятии нагрузки ( $p = 0,2$  МПа)

$t$ , кс	Синовия		Псевдосиновия +ЖКСХ		Кремнийорганическая жидкость	
	$f$ , $10^{-3}$	$\Delta l$ , мкм	$f$ , $10^{-3}$	$\Delta l$ , мкм	$f$ , $10^{-1}$	$\Delta l$ , мкм
0	45	680	50	680	140	680
0,36	25	652	25	665	150	670
1,08	18	625	20	628	130	667
1,80	15	602	15	610	150	665
2,52	15	592	15	598	150	665
3,24	15	583	15	593	150	663
3,60	15	583	15	590	150	663

Это свидетельствует о том, что добавка ЖКСХ в модельные смазочные среды обеспечивает лабильность (функциональную подвижность), присущую системе хрящ-синовия. Установлена связь между лабильностью хряща и снижением коэффициента трения. При трении хрящей в смазочных средах, не содержащих ЖКСХ (например, в кремнийорганической жидкости), лабильность хрящей не наблюдается (таблица 3). Сделан вывод о том, что установленные структурно-деформационные закономерности поведения хрящей в условиях фрикционного взаимодействия при переменных нагрузках связаны с присутствием в исследуемых смазочных средах ЖКСХ.

На основании полученных экспериментальных данных и современных представлений теории упругости жидких кристаллов предложена концептуальная модель смазочного действия ЖКСХ при внутрисуставном трении. Высокая антифрикционность суставных поверхностей обусловлена тем, что при динамическом контакте молекулы ЖКСХ, входящие в состав синовии, размещаются длинными осями вдоль ориентированных в направлении преимущественных локомоций микробороздок на поверхности хрящей и образуют жидкокристаллическую нематическую фазу. Благодаря этому достигается снижение диссипации энергии при относительном перемещении последних в суставе. Поскольку данная концептуальная модель базируется на чисто физических, точнее энергетических представлениях, не учитывающих природу динамически контактирующих твердых тел, она является общей и поэтому справедлива не только для суставных, а вообще для любых пар трения.

В итоге установлено, что уникальная смазочная способность синовии связана с наличием в ней холестерических ЖК, реализующих ЖК-состояние смазки в зоне трения, в совокупности со специфической структурной организацией поверхностной зоны суставного хряща. Полученные результаты коренным образом изменяют существующие представления о природе низкого трения суставных хрящей, существенно расширяют знания о механизме их деструкции и являются реальной основой для создания не только эффектив-

ных методов терапии и коррекции трибологии суставов, но и для разработки используемых в технике высокоэффективных смазочных и самосмазывающихся материалов, реализующих принципы, заложенные в естественной смазке суставов.

#### ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ КОНТАКТИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В настоящее время наиболее изучены межфазные смазочные слои смектического типа, которые образуются в результате адсорбции молекул ПАВ удлиненной формы перпендикулярно поверхности трения. Прочность межфазных слоев смектического типа зависит от природы и концентрации ПАВ в смазочной жидкости, а также от шероховатости трущихся поверхностей и температуры в зоне контакта. Наиболее прочной связью с металлами обладают молекулы ПАВ с карбоксильной группой.

Однако такие межфазные слои имеют существенные недостатки, например, с повышением нагрузки полимолекулярные слои ПАВ преобразуются в мономолекулярные, что приводит к скачкообразному росту сопротивления сдвига. В случае соизмеримости размеров молекул ПАВ с микродефектами поверхностей трения такой переход оказывает отрицательное действие на изнашивание сопряженных деталей, т.к. приводит к реализации эффекта адсорбционного понижения прочности твердых тел. С физической точки зрения межфазные слои холестерической структуры устраняют вышеназванные недостатки, т.к. они образуют стопку нематических слоев, из которых верхний и нижний адгезионно связаны с поверхностями трения. В каждом нематическом слое молекулы могут свободно перемещаться, меняться местами. Если при сдвиге между поверхностями трения образуется монокристаллическая пленка, то ее молекулярные (холестерического типа) образования способны скользить друг относительно друга, как это имеет место в смектической фазе. Кроме того, отличительной особенностью холестерической граничной фазы является возможность ориентации ее молекул бороздками микрорельефа. Это приводит к заполнению бороздок и нивелированию поверхности трения.

Иными словами можно предположить, что в силу указанных выше свойств межфазные слои холестерической структуры в сравнении с межфазными слоями смектической структуры должны обладать более высоким экранирующим действием по отношению к поверхности трения, причем независимо от природы трущихся тел.

В связи с этим на первом этапе изучали влияние активных и неактивных к жирным кислотам твердых тел на их трение и износ в присутствии жидких смазок. В качестве последних были выбраны вазелиновое масло, инактивное к исследуемым материалам трения, а также его смеси с олеиновой кислотой и олеатом холестерина. Смеси подвергали гомогенизации с помощью ультразвукового диспергатора.

Нейтральные к жирным кислотам материалы трения (пара стекло по стеклу) в присутствии вазелинового масла и с добавкой олеиновой кислоты (3,0 мас. %) обуславливают снижение коэффициента трения в 2 раза. Установлено, что для обоих смазочных сред схватывание наступало при одной и той же нагрузке 0,9-1,2 МПа. Методами РЭМ и профилометрии показано, что характер разрушения поверхностей трения в этих случаях такой же, как и при трении без смазки, т.е. связан с глубинным выкрашиванием стекла (рис.4, о-в). Добавка ЖКСХ в инактивную смазочную среду при работе пар из нейтральных материалов приводит к снижению коэффициента трения и повышению нагрузочной способности. Так, например, добавка 3,0 мас.% олеата холестерина в вазелиновое масло при трении стекла по стеклу повышала нагрузочную способность пары в 6-7 раз по сравнению со средой, содержащей олеиновую кислоту.

Методом РЭМ установлено образование микробороздок на поверхностях трения при нагрузках свыше 4 МПа, которые незначительно влияют на характеристики трения. Методом поляризационной микроскопии в микробороздках обнаружены оптически активные вещества. Как показали исследования, образование таких микробороздок способствует увеличению адгезии молекул ЖКСХ с опорной поверхностью. Подтверждением этого является не только повышение нагрузочной способности пары, но и характер разрушения поверхностей трения.

Так, в смазочной среде с добавкой эфиров холестерина разрушения наблюдались лишь в отдельных участках поверхности стекол при нагрузках более 7 МПа (рис.4, г). В то же время в случае сред, не содержащих ЖКСХ, при нагрузках в 6-7 раз меньших наступало схватывание поверхностей трения стекол (рис.4, о-в). Это свидетельствует о более высоком смазочном действии ЖКСХ по сравнению с жирными кислотами в парах трения из нейтральных материалов.

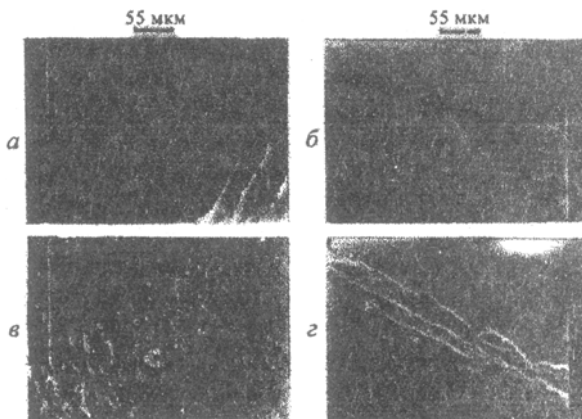


Рис. 4. Поверхности трения стеклянных образцов, работавших при разных условиях смазки: а) без смазки; б) со смазкой вазелиновым маслом; в) с добавкой 3 мас. % олеиновой кислоты; г) с добавкой 3 мас. % холестерилового эфира олеиновой кислоты; (а,б,в) -  $p=1,2$  МПа; (г) -  $p=7,0$  МПа;  $V=0,1$  м/с.

Аналогичные результаты получены при изучении кинетики изменения коэффициента трения пары сталь-сталь при смазке олеиновой кислотой и олеатом холестерина. В олеате холестерина интенсивность изнашивания

( $1,35 \cdot 10^{-11}$ ) на порядок ниже, чем в олеиновой кислоте ( $2,20 \cdot 10^{-10}$ ). В ИК-спектре олеиновой кислоты после трения зарегистрировано резкое уменьшение интенсивности полосы поглощения в области  $3012 \text{ см}^{-1}$ , соответствующей валентным колебаниям СН-групп возле двойных связей, и появление полос поглощения в областях  $970$  и  $1740 \text{ см}^{-1}$ , которые являются высокочастотным плечом к полосам поглощения в областях  $950$  и  $1712 \text{ см}^{-1}$ , соответственно. Появление дуплета  $950, 970 \text{ см}^{-1}$  в спектрах высших жирных кислот связано с изменением энергии водородных связей димеризованных молекул кислоты. Эти изменения дают основание полагать, что в процессе трения происходит раскрытие двойных связей в углеводородном радикале олеиновой кислоты и образование высокомолекулярных продуктов трибораспада. По-видимому, периодическое накопление их в зоне трения и инициирует резкое увеличение коэффициента трения. В случае олеата холестерина образование продуктов трибораспада не наблюдалось, что подтверждается ИК-спектроскопическими исследованиями и устойчивостью режима трения на протяжении всего периода испытаний.

Шероховатость сопряженных поверхностей при трении в ЖКСХ оказывает существенное влияние на количественные характеристики фрикционного взаимодействия. Так, уменьшение параметра  $R_a$  поверхности трения частичного вкладыша с  $4\text{-}5 \text{ мкм}$  до  $0,85 \text{ мкм}$  приводит к значительному снижению коэффициента трения и температуры в зоне трения. Дальнейшее повышение чистоты обработки динамически контактирующих поверхностей до  $R_a = 0,06 \text{ мкм}$  снова вызывает увеличение данных параметров фрикционного взаимодействия, особенно в начале эксперимента. Однако с течением времени (примерно через  $40\text{-}45 \text{ кс}$ ) эти различия исчезают. Характерно, что микро-рельеф поверхностей трения приобретает регулярный характер. По-видимому, для ЖКСХ существует оптимальная регулярная шероховатость сопрягаемых поверхностей, которой соответствуют наилучшие триботехнические характеристики пары трения.

Существенное возрастание коэффициента трения при смазке индивидуальными ЖКСХ и их смесями наблюдается в области температур выше температуры перехода их ЖК-фазы в изотропную жидкость. Показано, что при реализации в зоне трения мезоморфного состояния смазочной прослойки коэффициент трения пар, изготовленных из материалов различной химической природы, значительно ниже, чем при смазке их ЖК в фазе изотропной жидкости. Эта закономерность справедлива не только для холестерических, но и для нематических ЖК.

При смазке пары трения минеральным маслом с добавками ЖКСХ точка начала увеличения коэффициента трения на кривой его температурной зависимости смещается в область более низких температур по сравнению со смазкой индивидуальным ЖК и зависит от концентрации ЖК-добавок. По мере увеличения концентрации последних в смазке начало возрастания коэффициента трения смещается в область более высоких температур, прибли-

жающихся к температурам перехода индивидуальных ЖК в изотропную жидкость.

Установлено, что ЖК-вещества при температурах в зоне трения, не превышающих температур существования мезофазы, обеспечивают низкие значения коэффициента трения и износа в широком интервале нагрузок. Например, введение олеата холестерина (3,0-7,5 мас.%) в вазелиновое масло в 2 раза снижало коэффициент трения и в 2-3 раза повышало нагрузочную способность пары.

Кроме олеата холестерина, в качестве ЖКСХ исследовали капринат холестерина и ацетат холестерина. Установлена корреляция между антифрикционными характеристиками и температурой перехода в изотропную жидкость исследуемых ЖКСХ для пары трения латунь Л 63-сталь 45. Показано, что добавка 2 мас.% этих ЖКСХ в веретенное масло приводит к снижению коэффициента трения пары с 0,05 до 0,015-0,02 и повышению нагрузочной способности с 4,0 МПа до 8-11 МПа, соответственно. Введение таких ЖКСХ в полисилоксаны снижает коэффициент трения исследуемой пары в 4-12 раз, интенсивность изнашивания на порядок, температуру в зоне трения на 40-50°C и повышает нагрузочную способность с 3,0 МПа до 7,0-12 МПа.

Установлено, что при трении латуни в среде синтетических смазок происходит «намазывание» меди на поверхность стального контртела. Такие процессы не приводят к улучшению антифрикционных характеристик, но в то же время свидетельствуют о достаточно высокой поверхностной активности смазочной жидкости к латуни. Показано, что введение в такую смазку ЖКСХ исключает процесс образования пленок переноса меди при трении латуни по стали, что вероятно связано с появлением на поверхности трения пленок ЖКСХ, предотвращающих возникновение пленок переноса и выполняющих роль своеобразного экрана.

Экранирующее действие ЖКСХ на поверхности трения подтверждается результатами диспергирования порошков меди в смазках без добавки ЖКСХ и с их добавкой. Установлено, что исходная синтетическая смазка проявляет поверхностно-активные свойства по отношению к меди и способствует более интенсивному разрушению ее частиц при диспергировании в сравнении со смазкой, содержащей ЖКСХ. На наш взгляд, это связано с защитной, экранирующей функцией ЖКСХ по отношению к частицам порошка меди в процессе диспергирования.

Еще одним доказательством эффекта экранирующего действия холестерически-нематических ЖК-слоев на поверхности трения металлических деталей являются результаты исследования растворов в вазелиновом масле олеиновой кислоты и ее производной холестерического типа. Зарегистрировано понижение твердости меди, о чем свидетельствуют данные, представленные на рис. 5 и полученные методом маятниковой склерометрии (использовалась методика П.А. Ребиндера).

В отличие от смазочной среды с олеиновой кислотой для такой же среды, модифицированной холестерилловым эфиром олеиновой кислоты, эффект понижения твердости меди проявляется значительно меньше. Иными словами, жидкокристаллические слои анизометрических молекул ЖКСХ сильнее препятствуют внедрению инденторов в исследуемый материал, а, следовательно, обеспечивают более высокое экранирующее действие, чем слои полярных молекул олеиновой кислоты. Анализ экспериментальных данных показывает, что такое поведение характерно и для нематических ЖК. Это свидетельствует о том, что мезогены на поверхностях трения металлов образуют защитные жидкокристаллические слои, препятствующие сближению динамически контактирующих деталей.

Подтверждением образования в зоне трения жидкокристаллического состояния смазочного слоя является установленная взаимосвязь температур второго фазового перехода использованных ЖКСХ и температур, соответствующих существенному возрастанию коэффициента трения пар, смазываемых исследуемыми составами. Наличие такой корреляции позволяет предположить, что повышение коэффициента трения при этом обусловлено разрушением жидкокристаллической структуры и образованием изотропной жидкости, для которой, как было показано выше, характерны большие диссипации энергии в зоне трения. Этот фазовый переход аналогичен процессу дезориентации граничных смазочных слоев, наблюдавшемуся при исследовании их температурной стойкости.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о более высоких смазочных свойствах ЖКСХ по сравнению с жирными кислотами. Межфазные слои из ЖК-соединений, имеющих спирально-закрученную структуру молекул, обеспечивают коэффициент трения 0,005-0,02, интенсивность изнашивания порядка  $10^{-11}$  и температуру в зоне трения 303-313К в парах трения, выполненных не только из обладающих физико-химической активностью (сталь, латунь), но и из нейтральных материалов (стекло). Это создает широкие возможности для управления фрикционным взаимодействием твердых тел.

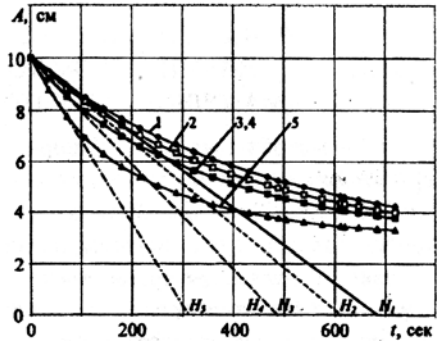


Рис. 5. Затухание амплитуды (А) колебаний маятника, опирающегося двумя стальными инденторами ( $r = 0,5$  мм) на поверхность медной опоры и величина пропорциональная ее твердости (Н): 1 - на воздухе ( $H_1 = 685$  сек); 2 - в вазелиновом масле ( $H_2 = 620$  сек); 3 - в вазелиновом масле с добавкой нематического ЖК ( $H_3 = 489$  сек); 4 - в вазелиновом масле с добавкой ЖКСХ ( $H_4 = 490$  сек); 5 - в вазелиновом масле с добавкой олеиновой кислоты ( $H_5 = 322$  сек)



## ГЛАВА 5. РОЛЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ, В МЕХАНИЗМЕ СМАЗОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Несмотря на довольно обширный объем экспериментальных данных, раскрывающих механизм смазочного действия ЖК, остаются не достаточно ясными закономерности адсорбции молекул ЖКСХ из растворов на поверхностях трения твердых тел и влияние на них статических и динамических условий контакта. В настоящее время можно считать доказанным, что устойчивое понижение коэффициента трения под влиянием смазки в основном определяется адсорбционным или химическим взаимодействием смазочной прослойки с поверхностями трения. Вопрос заключается в том, какие компоненты смазки более активно участвуют при трении в адсорбционных процессах? Это могут быть и ЖК и молекулы жидкой смазочной основы. С такой же степенью вероятности возможен и другой вариант, при котором адсорбционный процесс может носить аддитивный характер. В специфических условиях трения не исключается и тот случай, когда превалирующее действие тех или иных компонентов смазки в конкурирующем процессе может меняться при фрикционном взаимодействии трущихся тел с течением времени. Ниже описываются эксперименты, с помощью которых сделана попытка ответить на поставленные вопросы и разрешить отмеченные противоречия.

Адсорбционные свойства ЖК-смазок в условиях статического контакта. Эксперименты по выяснению адсорбции ЖК из растворов на поверхностях твердых тел в статических условиях основывались на оценке концентрации исследуемой присадки в базовых смазочных составах до и после взаимодействия их с порошками меди, железа и стекла. Концентрацию ЖКСХ в смазочной среде оценивали по интенсивности поглощения линии спектра  $1740 \text{ см}^{-1}$ , а олеиновой кислоты -  $1712 \text{ см}^{-1}$ . Предполагалось, что изменения концентрации исследуемых растворов свидетельствуют об адсорбции компонентов среды на поверхностях трения, а неизменность концентрации — о равной активности компонентов смазки.

Установлено, что растворы олеиновой кислоты в вазелиновом масле, как и следовало ожидать, активно взаимодействуют с медью и гораздо меньше с железом и стеклом. Показано, что с течением времени для всех исследуемых материалов наблюдается тенденция к уменьшению содержания олеиновой кислоты в смазочной среде (рис. 6, кривая 2, т. В). Последнее указывает на то, что при взаимодействии с поверхностями частиц меди, железа и стекла молекулы олеиновой кислоты имеют более высокую адсорбционную способность, чем молекулы вазелинового масла. Такая закономерность характерна для растворов олеиновой кислоты в других базовых составах, например, в кремнийорганической жидкости.

Опыты с растворами холестерических ЖК в смазочных жидкостях продемонстрировали совсем иной результат. Установлено, что концентрация ЖКСХ в вазелиновом масле после контактирования с порошками указанных материалов во всех случаях повышалась (рис. 6, кривая 1, т. D). Аналогичная

картина, наблюдается и для растворов ЖКСХ в кремнийорганических смазках. Это дает основание утверждать, что при контакте растворов ЖКСХ с порошками меди, железа и стекла в статических условиях взаимодействия адсорбционная способность молекул ЖКСХ гораздо меньше, чем адсорбционная способность молекул базовых составов. Иначе говоря, проведенные исследования не подтверждают предположение об адсорбции молекул ЖКСХ из растворов смазочных сред на поверхностях твердых тел из различных материалов при статических условиях контакта. Адсорбция ЖК, трибоиндуцированная в процессе динамического контакта. Показано, что в условиях динамического контакта адсорбционные процессы для растворов ЖК в вазелиновом масле имеют принципиально иной характер. Экспериментально установлено, что при работе пары сталь-сталь наблюдается не увеличение, как было отмечено ранее при статическом контакте, а, наоборот, понижение содержания ЖК в отработанной смазке. Таким образом, в ходе проведенных исследований обнаружен неизвестный ранее эффект повышения адсорбционной способности молекул ЖК в смазке под воздействием процессов трения сопряженных тел. Установлено, что наведенная или трибоиндуцированная при фрикционном взаимодействии трущихся пар адсорбция молекул ЖКСХ явно коррелирует с повышением, а затем и стабилизацией их трибологических характеристик (рис. 7).

С учетом экспериментально обнаруженных изменений концентрации смазки, а также оценки площади поверхности трения толщина слоя молекул ЖКСХ, адсорбирующихся в зоне динамического контакта, может составлять 20 нм. Последнее, с учетом размеров молекул эфиров холестерина (длина  $\approx 1,5$  нм; диаметр  $\approx 0,5$  нм), убедительно свидетельствует в пользу полимолекулярной организации адсорбирован-

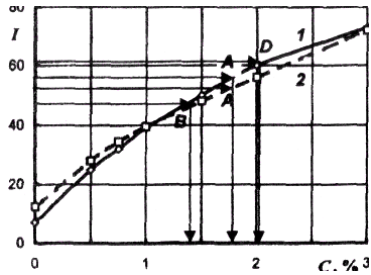


Рис. 6. Интенсивности поглощения характерных линий ИК-спектров и концентрации растворов ЖК (1) и олеиновой кислоты (2) в вазелиновом масле: А - исходных растворов после фильтрация; В, D - после пребывания порошков меди в течение 1 часа соответственно, в растворе олеиновой кислоты и растворе ЖК в вазелиновом масле

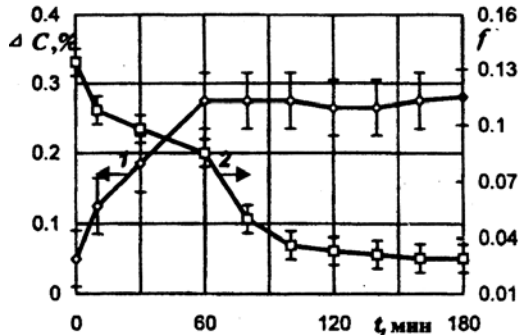


Рис. 7. Изменение концентрации жидкокристаллической присадки (1) в смазке и коэффициента трения (2) пары сталь 45 — сталь 45 с течением времени.

ных слоев ЖКСХ на поверхностях трения. Отмечено, что вследствие реализации эффекта «гость-хозяин» и достаточно сильного ориентирующего действия ЖК на молекулы базовой смазочной жидкости последние также могут непосредственно участвовать в формировании указанных выше полимолекулярных слоев. Очевидно, что толщина смазочных слоев, содержащих ЖКСХ, может быть намного больше, чем рассчитанная без учета влияния, а, следовательно, и участия в формировании полимолекулярных слоев молекул базовой смазочной жидкости.

Таким образом, можно утверждать, что в процессе фрикционного взаимодействия происходит активация адсорбционной способности ЖКСХ, позволяющая им адсорбироваться на поверхностях трения. Рассматривая возможные причины повышения адсорбционной активности ЖК-присадки, можно предположить, что, вероятнее всего, к этому эффекту приводит «обновление» (удаление оксидов, пластическая деформация металлов и т.д.) поверхности трения в процессе работы пары и непосредственный контакт компонентов смазки со свежееобразованными ее участками. Повышение свободной поверхностной энергии локальных ювенильных областей динамически контактирующих поверхностей может быть источником аддитивного увеличения взаимодействия молекул смазочной жидкости и поверхностей трения. Не последнюю роль в этих процессах может играть и возникновение при трении в смазочной прослойке двойного электрического слоя. Последний, оказывая поляризующее и ориентирующее действие на химически инактивные молекулы ЖК, также может влиять на их адсорбционную способность при фрикционном взаимодействии. Поэтому, на наш взгляд, именно суперпозицией всех этих факторов можно объяснить увеличение адсорбционной способности ЖКСХ, наблюдаемое при данных условиях трения.

Влияние ЖК-добавок на коэффициент трения и механизм смазки твердых тел. Экспериментально доказано, что концентрация ЖК в смазке определяет время достижения и значения оптимальных равновесных параметров микрошероховатости, при которых реализуются значительно более низкие, чем в начальный период динамического контакта, диссипативные потери от трения. Показано, что длительность формирования равновесного микрорельефа сокращается с ростом концентрации эфиров холестерина в смазочной жидкости. Зависимость параметров микрорельефа от концентрации ЖКСХ при динамическом контакте имеет минимум при содержании эфиров холестерина в смазочном материале 0,3-0,5 мас.%. Введение индивидуальных ЖКСХ практически сразу же после начала фрикционного взаимодействия обеспечивает низкие трение и износ трущихся тел.

Установлено, что введение ЖК-добавок в смазочные среды приводит к образованию такой двухуровневой регулярной организации профиля поверхностей трения, когда отдельные выступы плосковершинного микрорельефа приобретают специфический субмикрорельеф, с микронеровностями меньшего порядка, чем в случае использования других смазок (рис. 8).

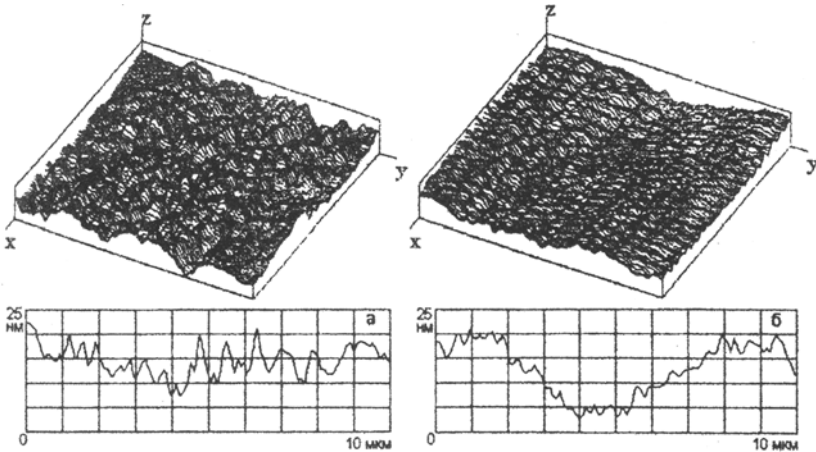


Рис. 8. СТМ-изображения (10x10 мкм) (вверху) и СТМ-профиль (внизу) поверхностей трения стальных образцов после работы в среде вазелинового масла без добавки (а) и с добавкой (б) ЖКСХ

Отмечено, что такая топография поверхностей трения, несущих адсорбированную на них пленку ЖКСХ, наиболее благоприятна для снижения локальных контактных напряжений в зоне трения и, как следствие, уменьшения тепловыделения и деформационных потерь при фрикционном взаимодействии, что и наблюдается экспериментально.

Изучены закономерности изнашивания металлов в присутствии ЖКСХ. Показано, что интенсивность изнашивания с ростом концентрации присадок снижается и при содержании эфиров холестерина в смазочной жидкости более 5-7 мас.% имеет порядок  $10^{-11}$ . Предложен механизм смазки ЖКСХ, согласно которому в результате постепенного (дозированного и регулируемого действием входящих в смазку ЖКСХ) изнашивания поверхности трения образуется плосковершинный микрорельеф. На нем происходит характерное для данной концентрации ЖКСХ формирование их молекулами сплошной смазочной пленки, приводящей к экранированию поверхностей и снижению трения в паре.

## ГЛАВА 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Экспериментально в производственных условиях установлено, что небольшие добавки (0,1-1,5 мас.%) ЖКСХ в топливную смесь позволяют сократить продолжительность обкатки ЛВС на 20-25%. Образование на сопрягаемых поверхностях трущихся деталей плосковершинного микрорельефа обеспечивает аккумуляцию смазки на поверхностях трения, уменьшение износа двигателей и энергетических потерь на трение при их эксплуатации. Так, например, согласно экспертному заключению ВАЗа (технический отчет № 0692/ВАЗ-00

от 17.05.89 г.) показано, что добавление 1,0-1,5 мас.% ЖК-присадки «Моликристалл» в смазку автомобильного двигателя снижает в нем на 4,5-5% расход топлива и механические потери, уменьшает износ кулачков распределительного вала на 60%, рычагов привода клапанов на 50%, поршневых колец на 8-10%. Отмечено, что действие ЖК-присадки сохраняется после замены масла еще, как минимум, при пробеге автомобилем 15 тыс. км.

Установлено, что результатом использования при полировке алмазов пасты с добавлением ЖК является более высокое по сравнению с исходным составом качество финишной обработки изделий. На исследованных участках поверхностей алмазов зарегистрированы меньшая амплитуда высот микровыступов и меньшие среднее арифметическое и среднее квадратичное отклонения профиля. Подобное сочетание величин субмикроразмерных характеристик указывает на то, что образцы алмазов, обработанные с использованием модифицированных ЖК-паст, имеют более гладкую поверхность с меньшим количеством нерегулярностей и значительно менее выраженными следами от обрабатывающего инструмента по сравнению с результатами применения исходных паст. На базе этих исследований разработан и запатентован состав для полировки.

Установлено, что модифицирование древесины жидкостями, содержащими ЖК-соединения, приводит к снижению коэффициента трения новых древесных подшипников в 1,4-1,6 раза и температуры в зоне трения на 20-30°C в сравнении с материалами на основе древесины с традиционными модификаторами. Показано, что СВЧ-обработка модификаторов, содержащих ЖК-соединения, приводит к снижению коэффициента трения подшипников на основе самосмазывающейся древесины до 0,015-0,02 и интенсивности изнашивания до значений  $1,1-1,4 \times 10^{-10}$ . На основании этих исследований разработан новый способ получения антифрикционных самосмазывающихся материалов, сущность которого заключается в том, что древесину модифицируют составом, содержащим ЖКСХ, который перед введением в капиллярно-пористую систему древесины облучают в СВЧ-поле.

Оптимизацию концентрации ЖКСХ в модификаторе, степени наполнения им древесины и времени облучения СВЧ-полем, обеспечивающих получение антифрикционного самосмазывающегося материала с минимальным значением коэффициента трения, осуществляли методом центрального композиционного ротатбельного планирования второго порядка. В результате установлено, что коэффициент трения существенно зависит от концентрации ЖКСХ в составе и степени пропитки им древесины. Определены оптимальные значения концентрации ЖКСХ в составе и степени пропитки древесины, которые равны 3,0 мас.% и 33%, соответственно.

Показано, что по эффективности разработанные материалы превосходят в 3-4 раза известные на основе модифицированной древесины. Так, для древесины, содержащей жидкие модификаторы без добавок ЖКСХ, через 120-200 ч работы при  $P = 6,0$  МПа и  $v = 0,5$  м/с наблюдается рост коэффициента трения и температуры в зоне трения. Древесина, модифицированной

составами, содержащими ЖКСХ, имеет стабильные параметры и после 600 ч работы.

Таким образом, на базе проведенных исследований разработаны новые принципы создания самосмазывающихся материалов на основе древесины. Суть их заключается в следующем: 1) введении в модификаторы ЖК-компонентов с мезофазой в области температур эксплуатации древесных самосмазывающихся материалов; 2) обработке модификаторов в СВЧ-электромагнитном поле перед введением в капиллярно-пористую систему древесины; 3) пропитке древесных материалов смазочными средами с ЖК-добавками под воздействием СВЧ-излучения. При этом экспериментально в реальных условиях трения (скольжение деревянных лыж по снегу, работа деталей из модифицированной древесины в узлах трения формовочных машин ЧНФ-90 и ширителях отделочных машин МО-180 на Гомельской чулочной-трикотажной фабрике им. 8 Марта) показано, что из исследуемых ЖКСХ наибольший эффект в снижении трения и износа древесины обеспечивают те ЖК-соединения, диапазон мезофазы которых совпадает с температурами эксплуатации узлов трения.

Разработанная концепция биологических механизмов снижения внутрисуставного трения позволила создать новые методы и лекарственные препараты для лечения заболеваний суставов, а также способы их получения, в которых воспроизведение реологических, трибологических и структурных свойств натуральной синовиальной жидкости осуществляется за счет введения ЖКСХ с мезофазой в области температур, включающих физиологические температуры. Их вводят в растворы натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ), в гемодез, в поливинилпирролидон (ПВП) и их комбинации.

Установлено, что созданные препараты проявляют свойства, присущие синовиальной жидкости: аналогичную структуру высушенных образцов при исследовании методом термополяризационной микроскопии; близкие температуры фазовых переходов в области 20-47°С; статистически неразличимые коэффициенты трения пары хрящ-хрящ; аналогичный характер трения хряща по стеклу; идентичные реологические характеристики, когда основой служит водный раствор Na-КМЦ.

В трибологическом эксперименте показано, что смазочные препараты, содержащие ЖКСХ, эффективно защищают хрящ от дальнейшей деструкции при частичном износе с сохранением структурной организации его поверхности. Радиоизотопным методом выявлена диффузионная способность ЖКСХ проникать через кожные покровы и обнаружен феномен их внутрисуставного транспорта. Установлено, что максимум накопления радиоактивного ЖКСХ в суставных хрящах коленного сустава экспериментальных животных наблюдается после 5-7 ежедневных накожных аппликаций. Выявлено, что препараты, содержащие ЖКСХ, при интраартикулярном введении способны накапливаться на суставных поверхностях и находиться там в повышенных концентрациях до 12-14 суток, что регламентирует кратность их применения.

Патоморфологическими и биохимическими методами установлена высокая хондропротекторная эффективность препаратов, содержащих ЖКСХ, при интраартикулярном введении в коленные суставы животных в острой и хронической стадиях экспериментального остеоартрита. По хондропротекторному действию созданные препараты значительно превосходят 15% раствор ПВП. Разработанная искусственная синовиальная жидкость, в состав которой входит ПВП, обладает наряду с высокими антифрикционными свойствами выраженным противовоспалительным действием. Получены доказательства повышения репаративной функции хряща под действием препаратов, содержащих ЖКСХ, при травмах суставов.

На предприятии диагностических и лекарственных препаратов Белбиофарма (г. Минск) в эксперименте на животных установлено, что созданные ЖК-препараты не обладают мутагенным, аллергенным и кумулятивным действием, острой и хронической токсичностью. Там же организовано их производство. В соответствии с решением Фармкомитета МЗ РБ в четырех ведущих клиниках республики проведены клинические испытания наружной формы разработанного лекарственного препарата «Диасиноп», содержащего ЖКСХ. Они показали, что наибольшая эффективность препарата «Диасиноп» наблюдается у больных остеоартрозом коленных суставов I-II степени, включая последствия спортивных травм. Максимальный эффект от применения препарата обнаружен после 7-10 аппликаций. По представлению материалов клинической апробации Фармкомитетом МЗ РБ в 1998 году дано разрешение (ВФС-42Б-208-98) на широкое применение препарата «Диасиноп» в практической медицине.

Таким образом, результаты исследований показывают, что лекарственные препараты для лечения суставов на основе ЖКСХ идентичны натуральной синовиальной жидкости по основным физико-химическим и антифрикционным показателям и по высокому хондропротекторному действию. Последний факт является еще одним убедительным подтверждением значительной биологической роли ЖКСХ в снижении внутрисуставного трения и защите хряща от механодеструкции при суставной патологии.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В области физики конденсированного состояния решена актуальная научно-техническая проблема - разработана концепция и предложены структурно-механические принципы управления трибофизическими характеристиками естественных и технических диссипативных систем, основанные на реализации в зоне динамического контакта твердых тел упорядоченного мезоморфного состояния граничных слоев с присущими природным ЖКСХ деформационными свойствами, структурными особенностями и смазочным действием. Развита трибофизическая представления о ЖК-состоянии веществ и установлены новые закономерности их влияния на работоспособность металло- и биополимерных подвижных сопряжений.

1. Изучены происходящие в процессе динамического контактирования изменения трибофизических характеристик металло- и биополимерных пар в зависимости от природы и типа межфазных слоев. Установлено, что наиболее эффективными являются граничные слои холестерической структуры. Методами трибометрии и маятниковой склерометрии показано, что в отличие от ПАВ, оказывающих в динамическом контакте преимущественно пластифицирующее и диспергирующее действие, молекулы ЖКСХ защищают контактирующие поверхности от повреждений, обеспечивая экранирующий эффект. Более высокая смазочная и несущая способность ЖКСХ в сравнении с жирными кислотами обусловлена локализацией процесса сдвига при динамическом контактировании не в пластифицированных поверхностных слоях твердых тел, что характерно для ПАВ, а в граничных слоях ЖК-вещества, разделяющего сопряженные поверхности [1, 4, 6, 10, 11, 18, 20, 30].

2. Экспериментально показано, что в условиях динамического контакта твердых тел введение ЖК в смазочную прослойку увеличивает несущую способность последней, особенно при использовании ЖКСХ с более высокой температурой второго фазового перехода. Установлено, что смазка гомогенных и гетерогенных пар из металлов ЖКСХ при температурах в зоне динамического контакта, не превышающих температур существования мезофазы, обеспечивает высокие трибофизические характеристики в широком интервале шероховатостей динамически контактирующих поверхностей [1, 2, 4, 10, 25, 26, 56, 60].

3. Установлено, что в статическом контакте твердых тел физико-химическое взаимодействие последних и жидких сред, содержащих ПАВ и ЖК, не одинаково. При длительном контактировании порошков меди, железа и стекла с растворами олеиновой кислоты концентрация кислоты уменьшалась, а в аналогичном контакте с растворами ЖКСХ концентрация последних в базовых маслах увеличивалась. При динамическом контактировании адсорбционные процессы с участием растворов ЖК протекают по иным механизмам. Обнаружен неизвестный ранее эффект увеличения адсорбции молекул ЖК на динамически контактирующих поверхностях твердых тел. Установлено, что наведенная при динамическом взаимодействии (трибоиндуцированная) адсорбция молекул ЖК коррелирует с кинетическим изменением - повышением, а затем стабилизацией трибофизических характеристик исследуемых пар [17, 19, 20, 28].

4. Показано, что интенсивность изнашивания металлов в присутствии ЖКСХ снижается с ростом концентрации присадок, а при содержании ЖКСХ в смазочной среде более 5-7 мас.% имеет порядок  $10^{-11}$ . Экспериментально доказано, что концентрация ЖК в смазочной среде определяет время достижения параметров равновесной микрошероховатости контактных поверхностей, при которых реализуются значительно более низкие, чем в начальный период динамического контакта, диссипативные потери от трения. Предложен механизм смазки ЖКСХ, согласно которому в результате изнашивания, дозированного действием ЖКСХ, входящих в смазочную среду, изменяется топография и образуется плосковершинный микрорельеф поверхностей тре-



ния. Это обуславливает формирование на них сплошных граничных слоев из молекул ЖКСХ, которые экранируют динамически контактирующие поверхности, снижая диссипацию энергии [1, 10, 19, 26, 30, 53, 58, 62].

5. Изучены возможности улучшения трибофизических характеристик самосмазывающихся материалов на основе древесины путем наполнения ее капиллярно-пористой структуры модификаторами, содержащими ЖКСХ. Установлено, что из исследуемых мезогенных веществ наибольший эффект в повышении трибофизических характеристик древесины в паре с металлами обеспечивают те ЖК-соединения, диапазон мезофазы которых совпадает с температурами их эксплуатации. На базе проведенных исследований разработан новый способ формирования самосмазывающихся материалов на основе древесины путем ее пропитки модификаторами, содержащими ЖКСХ, под воздействием СВЧ-излучения. Показано, что предложенный способ позволяет существенно повысить нагрузочный и скоростной диапазоны работоспособности самосмазывающихся древесных материалов в узлах трения [12, 24, 27, 35, 39, 42, 57, 61].

6. Создан пакет изобретений на антифрикционные экологически чистые ЖК-присадки для смазочных жидкостей машиностроения. Показано, что разработанные ЖК-присадки многофункциональны и предназначены для использования в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) на стадиях приработки и эксплуатации, при обработке металлов, а также твердых и сверхтвердых материалов. ЖК-присадка «Моликристалл» рекомендована Волжским автомобильным заводом к применению в ДВС легковых автомобилей [1, 24, 58, 62, 64, 71, 72].

7. Предложены и апробированы оригинальные методы и средства исследования процессов контактного взаимодействия твердых тел в жидких средах, содержащих ПАВ и ЖКСХ, повысившие информативность результатов экспериментального изучения динамически контактирующих металло- и биополимерных сопряжений. Использование в них прецизионных систем, базирующихся на современных достижениях цифровой схемотехники, существенно повысило точность измерений и позволило получить высокую воспроизводимость экспериментальных данных [1, 2, 6, 7, 22, 32, 54, 55, 59, 63].

8. Установлено, что синовиальная жидкость является жидкокристаллической биологической средой. Показано, что биофизические механизмы снижения внутрисуставного трения в значительной мере определяются ЖКСХ, обеспечивающими высокую антифрикционность хрящей в суставе посредством реализации в зоне трения мезоморфного нематического состояния смазки с планарноориентированной структурой. С использованием современных независимых физико-химических методов исследования идентифицированы ЖКСХ, входящие в синовиальную жидкость, и определен их количественный состав. Приведены доказательства участия последних в реализации мезоморфного состояния естественной смазки суставов в области температур, включающих физиологические температуры [2, 3, 13-16, 21, 23, 29, 31, 33, 34, 38, 43, 45, 46, 50, 52, 73].

9. Обнаружена взаимосвязь между структурно-механическими и трибофизическими характеристиками синовиальной среды суставов. Показано, что минимальные диссипативные потери при динамическом контактировании суставных хрящей в синовиальной жидкости имеют место при совпадении направления ориентации микрорельефа на поверхностях трения хрящей с направлением скольжения. На основании полученных экспериментальных данных и современных представлений теории упругости ЖК предложена концептуальная модель смазочного действия ЖКСХ, согласно которой высокая антифрикционность суставных поверхностей обусловлена мезогенностью эфиров холестерина, входящих в синовию, и анизотропией микрорельефа трущихся поверхностей хрящей. Эта модель базируется на чисто физических (точнее - энергетических) представлениях независимо от химической природы динамически контактирующих твердых тел, поэтому она справедлива не только для суставных, а вообще для любых пар трения [2, 5, 7, 8, 16, 32, 36, 37, 40, 41, 44, 47-49, 51].

10. Созданы средства и медикаментозные препараты для лечебной коррекции суставов, а также способы их получения, в которых воспроизведение структурных, реологических и трибофизических свойств натуральной синовии осуществляется посредством применения ЖКСХ с мезофазой в области температур, включающих физиологические температуры. Такие медикаментозные препараты имеют универсальные формы применения, могут использоваться как в виде инъекций, так и в виде аппликаций и обладают повышенной хондропротекторной эффективностью. Получено разрешение Фармкомитета Республики Беларусь на широкое применение в клинической практике наружной формы лекарственного препарата «Диасинопл» для лечения суставных заболеваний. На предприятии диагностических и лекарственных препаратов (г. Минск) выпущена опытно-промышленная партия этого препарата и освоено его серийное производство [9,52,65-70].

В диссертации содержатся новые экспериментальные основы и теоретические положения методологии управления трибофизическими характеристиками естественных и технических диссипативных систем, отличающейся предложенной физической моделью смазочного действия ЖКСХ при внутрисуставном трении и обоснованием ее применимости не только к биологическим, но и к техническим диссипативным системам; разработкой оригинальных методов и средств исследования процессов динамического взаимодействия твердых тел в жидких средах с ПАВ и ЖКСХ, повысивших информативность экспериментального изучения закономерностей фрикционного поведения металло- и биополимерных материалов; развитием представлений о реализации в зоне динамического контакта упорядоченного мезоморфного неэтичного состояния граничных слоев, моделирующих свойства, структурные особенности и механизмы смазочного действия природных ЖКСХ, что в совокупности может считаться крупным достижением в развитии трибофизики и биофизики ЖК-вещств, а также материалов и препаратов на их основе.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Купчинов Б. И., Родненков В.Г., Ермаков С. Ф. Введение в трибологию жидких кристаллов. - Гомель: Инфотрибо, 1993. -155 с.
2. Купчинов Б. И., Ермаков С. Ф., Белоенко Е.Д. Биотрибология синовиальных суставов. - Минск: Веды, 1997. - 272 с.
3. Купчинов Б.И., Родненков В.Г., Бобрышева С.Н., Ермаков С.Ф., Белый В.А. К вопросу о механизме функционирования сустава как трущегося органа // Доклады АН БССР. - 1985. - Т. 29, № 5. - С.463-465.
4. Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Паркалов В.П., Родненков В.Г., Бобрышева С.Н. Исследование влияния жидкокристаллических соединений на трение твердых тел // Трение и износ. - 1987. - Т. 8, № 4. - С. 614-620.
4. Kupchinov B.I., Ermakov S.F., Parkalov V.P., Rodnenkov V.G., Bobrysheva S.N. Study of Influence of Liquid Crystals on the Friction of Solids // Soviet Journal of Friction and Wear - 1987. - V. 8, N 4. - P. 29-32.
5. Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Белоенко Е.Д. К вопросу исследования трибологических свойств хрящей // Трение и износ. — 1988. - Т. 9, №4.-С. 671-676.
5. Kupchinov B.I., Ermakov S.F., Rodnenkov V.G., Beloenko E.D. Study of Cartilage Tribological Properties // Soviet Journal of Friction and Wear. - 1988. - V. 9, N4.-P. 73-77.
6. Ермаков С.Ф. Влияние природы контртела и смазочной среды на трение суставных хрящей // Трение и износ. - 1988. - Т. 9, № 2. - С. 322-327.
6. Ermakov S.F. Influence of Nature of Counterbody and Lubricant on Articular Cartilage Friction // Soviet Journal of Friction and Wear. - 1988. - V. 9, N 2. - P. 101-105.
7. Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Белоенко Е.Д. Взаимосвязь структурно-механических и антифрикционных свойств синовиальной среды суставов // Механика композитных материалов. - 1988. - № 2. - С. 240-246.
7. Kupchinov B.I., Ermakov S.F., Rodnenkov V.G., Beloenko E.D. Structure-Mechanical and Antifriction Properties Relationship in Synovial Fluid of Joints // Mechanics of Composite Materials. - 1988. - № 2. - P. 240-246.
8. Купчинов Б.И, Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Белоенко Е.Д. Биологическая роль структурно-деформационных свойств хряща и синовиальной жидкости в снижении внутрисуставного трения // Ортопедия, травматология и протезирование. - 1989. - № 10. - С. 7-11.
9. Белоенко Е.Д., Гончарова Н.В., Родненков В.Г., Ермаков С.Ф., Эйсмонт О.Л. О путях внутрисуставного транспорта эфиров холестерина // Ортопедия, травматология и протезирование. - 1989. - № 8. - С. 24-27. 10 Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Паркалов В.П., Родненков В.Г. Исследование влияния мезогенных добавок в смазку на кинетику коэффициента трения // Доклады АН БССР. - 1989. - Т. 33, № 4. - С. 340-343.

11. Kupchinov B.I., Rodnenkov V.G., Ermakov S.F., Parkalov V.P. A Study of Lubrication by Liquid Crystals // Tribology International. - 1991. - V. 24, № 1. -P.25-28.

12. Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Пирназаров Р.Я. Влияние кремний-органических модификаторов на самосмазывающиеся свойства древеснополимерных материалов // Трение и износ. - 1991. - Т. 12, № 1. - С. 63-71.

12. Kupchinov B.I., Ermakov S.F., Pirnazarov R.Y. The Influence of Silicon-Organic Modifiers on Self-Lubricating Properties of Wood Polymer Materials // Soviet Journal of Friction and Wear- 1991.-V. 12, № 1.-P. 52-58.

13. Ермаков С.Ф. Современные представления о биомеханике синовиальной среды суставов // Механика композитных материалов. - 1992. - № 4. - С.539-556.

13. Ennakov S.F. Modern Conceptions on Biomechanics of Human Synovial Joints // Mechanics of Composite Materials. - 1992. - №4. - P. 539-556.

14. Kupchinov B., Ermakov S., Rodnenkov V., Bobrysheva S., Beloenko E. Role of Liquid Crystals in the Lubrication of Living Joints // Smart Materials and Structure. - 1993. - № 2. - P. 7-12.

15. Ермаков С.Ф. Биомеханика синовиальной среды суставов. 1. Современные концепции трения изнашивания и смазки суставов // Трение и износ. -1993.-Т. 14, №6.-С. 1092-1110.

15. Ennakov, S.F. Biomechanics of synovia in living joints. 1. Modern concepts of living joints friction, wear and lubrication // Soviet Journal of Friction and Wear-1993.-V. 14, №6.-P. 97-109.

16. Kupchinov B., Ermakov S., Rodnenkov V., Bobrycheva S., Beloenko E. The effect of liquid crystals on joints lubrication // Wear. - 1994. - V. 171. -P. 7-12.

17. Купчинов Б. И., Ермаков С. Ф., Суслов А. А. Исследование адсорбционных свойств жидкокристаллической присадки // Трение и износ. - 1994. - Т. 15, №1.-С. 57-61.

18. Суслов А. А., Ермаков С. Ф., Чижик С. А., Купчинов Б. И. Влияние жидкокристаллической присадки на микрорельеф поверхности трения стали // Трение и износ. - 1996 -Т. 17, №1. - С. 67-73.

18. Suslov A.A., Ermakov S.F., Chizhik S.A., Kupchinov B.I. Effect of Liquid Crystalline Additive on Microrelief of Steel Surface at Friction // Soviet Journal of Friction and Wear. - 1996. - V. 17, № 1. - P. 60-66.

19. Суслов А. А., Ермаков С. Ф., Овчинников В. М. Жидкие кристаллы - переворот в области смазок // Локомотив. - 1996. - № 11 (479). - С. 25-27.

20. Суслов А. А., Ермаков С. Ф. Жидкие кристаллы в триботехнике (обзор) // Материалы, технологии, инструменты.-1997.-№1,-С. 5-11.

21. Белоенко Е.Д., Ермаков С.Ф., Купчинов Б.И. Синовиальная жидкость как жидкокристаллическая биологическая среда // Ортопедия, травматология и протезирование. - 1997. - № 3. - С.40-41

22. Ермаков С.Ф. Интегрально-счетный метод оценки малых вариаций параметров циклических сигналов в трибометрии // *Материалы, технологии, инструменты*. - 1999. - № 2. - С. 92-98.

23. Белоенко Е.Д., Воронович И.Р., Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Эйсмонт О.Л., Родненков В.Г. Модификаторы свойств синовиальной жидкости на основе жидких кристаллов // *Ортопедия, травматология и протезирование*. - 1999. - №3. - С. 60-66.

24. Купчинов Б.И., Родненков В.Г., Ермаков С.Ф., Бобрышева С.Н. Триболо-гические принципы создания подшипниковых материалов на основе древесины // *Трение, износ и смазочные материалы: Труды междуна. науч. конф. / Ташкентский политехнический ин-т им. А.Р. Беруни*. - Ташкент, 1985. - Т.1. - С. 124-129.

25. Kupchinov B., Rodnenkov V., Ermakov S., Parkalov V. A Study on Mesogen Lubrication // "Eurotrib-89": Proceedings 5th International Congress on Tribology. - Helsinki, 1989. - V. 4. - P. 219-225.

26. Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Паркалов В.П. Разработка и исследование экологически чистых антифрикционных присадок на основе жидких кристаллов // *3th International Symposium Tribological Problems of Elements Operating in Contact: Proceedings of the conf.* - Krakov, 1990. - P.657-666.

27. Ермаков С. Ф., Суслов А. А. Роль жидкокристаллических модификаторов в механизме трения древесных материалов // "Modyfikacja Drewna' 93": Труды междуна. симпозиума. - Poznan, 1993. - с. 67-72.

28. Kupchinov B. I., Ermakov S. P., Suslov A. A., Kestelman V. N.. The Effect of Friction on Adsorption of Liquid Crystal // *AUSTRIB '94: Proc. 4th Int. Tribology Conf.* - Vol. II, - Perth, Australia, 1994 - P. 67-69.

29. Ермаков С.Ф., Купчинов Б.И., Суслов А.А., Бобрышева С.Н., Белоенко Е.Д., Ивченко Е.И. Получение из отходов мясокомбинатов холестеринных лекарственных препаратов // *Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Труды научно-технической конференции. Часть I. /Изд. Гродненского отделения БИТА*. - Гродно, 1995. - С. 230-237.

30. Suslov A. A., Ermakov S. F., Chizhik S. A., Kupchinov B. I. The effect of the liquid crystalline additive on microrelief of the steel friction surface // *ECA-SIA'95: Proc. 6th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, TW2. Montreux, 1995 / Ed by H. J. Mathieu, B. Reihl and D. Briggs*. - John Wiley & Sons Ltd., Chichester New-York Brisbane Toronto Singapore, 1996. -P. 1049-1052.

31. Ermakov S.F., Kupchinov B. I., Beloyenko E. D., Suslov A. A. Liquid crystalline components of synovia and their role in the joint tribology // *Inzynieria Or-topedyczna i Protetyczna - IOP 97: Proc. of the sympozjum*. - Bialystok, 1997. - P.125-131.

32. Ermakov S.F., Kupchinov B., Beloyenko E., Suslov A., Eismont O. The Effect of Liquid Crystals on Tribomechanical Properties of Cartilages // *Inzynieria*

Ortopedyczna i Protetyczna - IOP 99: Proc. of the sympozjum. - Bialystok, 1999.- P. 93-99.

33. Beloyenko E., Suslov A., Eismont O., Pashkevich L., Ermakov S.F. Synthetic Lubricants based on Liquid Crystals to Modify Synovial Fluid-Properties // In-zynieria Ortopedyczna i Protetyczna - IOP 99: Proc. of the sympozjum. - Bialystok.1999.-P. 19-26.

34. Белый В.А., Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Бобрышева С.Н., Белоенко Е.Д., Воронович И.Р., Плескачевский Ю.М. Свойство синовиальной среды обеспечивать высокую антифрикционность хрящей в суставах человека и животных (Диплом № 65) // Научные открытия: Сб. <р. опис.; Сост. В.В. Потоцкий. - М.-Н. Новгород: Изд-во Нижегородск. гос. ун-та, 1999.-С. 14-16.

35. Ермаков С.Ф. Применение СВЧ-излучения как эффективного фактора в энергосберегающих технологиях ускоренной пропитки древесины и материалов на ее основе // ПОЛИКОМ-2000: Сборник трудов междунар. науч.-технич. конф. - Гомель, 2000. - С. 139-142.

36. Beyloenko E.D., Yermakov S.F., Bobrysheva S.N., Kupchinov B.I. Influence of the synovial medium on the destruction of joints // Abstr. 16th Symp. ESOA. -Sochy.1987.-P. 5/22

37. Beloyenko E.D., Kupchinov B.I., Yermakov S.F., Rodnenkov V.G., Bobrysheva S.N. On the interconnection of biomechanical and lubricating properties of the synovial medium of joint // Abstr. 17th Symp. ESOA. - Budapest, 1988. - P.4.

38. Beloyenko E., Yermakov S., Eismont O., Kupchinov B. The role of the synovial medium in the development of articular pathology // Abstr. XXVIII Congress of Polish Orthopaedic and Traumatologic Society. - Szczecin, 1990. - P. 51-53.

39. Ермаков С.Ф. Влияние жидких кристаллов на механизм самосмазывания модифицированной древесины // Модификация древесины: Материалы всесоюзн. конф. - Минск, 1990. - С. 29.

40. Белоенко Е.Д., Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Купчинов Б.И. Роль структурно-деформационных особенностей хряща в патогенезе деструкции суставов // Материалы V съезда травматологов и ортопедов БССР. - Гродно, 1991.-С.46.

41. Ermakov S.F., Kupchinov B.I., Beloenko E.D. A Study on structure of cartilage surfaces rubbed in different lubricants // ECASIA-91; Abstr. 4th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis. - Budapest, 1991. -BI-03.

42. Ермаков С.Ф., Сулов А.А. Исследование влияния жидкокристаллических соединений на свойства модифицированной древесины. // Древесно-полимерные композиционные материалы: Тезисы докладов симпозиума. - Гомель, 1991.-С. 57-58.

43. Ermakov S., Kupchinov B., Suslov A., Beloenko E., Eismont O. Synthetic Synovial Fluids for Correction of Living Joints Tribology // Tribological Problems Exposed Friction Systems: Proceedings of the 6-th International Symposium "INTERTRIBO 93":. - Bratislava, 1993. - P. 30.

44. Ermakov S., Kupchinov B., Bobrysheva S., Suslov A., Eismont O, Be-loenko E. The role of joint cartilage surface layers structure in mechanism of their fric-tional interaction // ECASIA 93: Abstr. 5th European Conference on Applica-tions of Surface and Interface Analysis. - Catania, 1993. - P. 35.

45. Белоенко Е.Д., Ермаков С.Ф. Биофизические характеристики ис-кусственных лубрикантов, содержащих жидкокристаллические соединения // Тез. докл. I съезда Белорусского общества фотобиологов и биофизиков. - Минск, 1994.-С. 14.

46. Белоенко Е.Д., Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф. Искусственные луб-риканты в терапии деструкции суставов // Актуальные проблемы современ-ной медицины. - Витебск, 1994. - С. 60-61.

47. Ермаков С.Ф., Белоенко Е.Д. Влияние жидких кристаллов и морфо-логии поверхностей хрящей на внутрисуставное трение // Тез. докл. I съезда Белорусского общества фотобиологов и биофизиков. - Минск, 1994. - С. 53.

48. Белоенко Е.Д., Ермаков С.Ф., Эйсмонт О.Л. Искусственные сино-виальные жидкости на основе жидкокристаллических соединений и их свой-ства // Материалы VI съезда травматологов-ортопедов Беларуси. —Витебск, 1996. -С.48-50.

49. Белоенко Е. Д., Ермаков С.Ф. О взаимосвязи деформационных и антифрикционных свойств хряща и искусственных синовиальных жидкостей (ИСЖ), содержащих жидкокристаллические соединения холестерина (ЖКСХ) // Молекулярно-клеточные основы функционирования биосистем: Материалы II съезда Белорусского общества фотобиологов и биофизиков. - Минск, 1996. - С. 148.

50. Beloyenko E., Ermakov S., Eismont O. Cholesterol liquid crystals (ChLC) effect on cartilage matrix structures and cells // Abstr. Symposium SIROT. - Haifa, 1997.-P.93.

51. Suslov A. A., Ermakov S. F., Chizhik S. A. Investigation of cartilage matrix mechanical properties using probe microscope // ECASIA '97: Abstr. of 7th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis. - Goteborg, Sweden, 1997. -TW-12.

52. Beloenko E., Ermakov S., Eismont O. Chondroprotective Effect of Cho-lesterol Liquid Crystals (ChLC) // IX Sympozjum Polskiego Towarzystwa Osteoar-thrologii i Polskiej Fundacji Osteoporozy. ПI Krakowskie Sympozjum Osteo-poro-zy "Streszczenia Prac". - 1997. - P. 204.

53. Суслов А. А., Ермаков С. Ф. Жидкокристаллические присадки в финишной обработке материалов // Материалы, технологии, инструменты. - 1998. -№2.-С. 87-58.

54. Ермаков С.Ф. Интегрально-счетный метод регистрации малых вари-аций амплитуды колебаний и его применение в прецизионной трибомет-рии // О природе трения твердых тел. Тез. докл. международн. симпозиума "БЕЛ-ТРИБ-99". - Гомель, 1999. - С. 76-77.

55. А.с. 1055247 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 P 3/48. Устройство для измерения скорости вращения / С.Ф. Ермаков, Б.И. Купчинов (СССР). - № 3384094/18-10; Заявл. 11.01.82; Оpubл. 15.07.83.

56. А.с. 1094341 СССР, МКИ<sup>3</sup> С 10 М 3/14. Смазочный состав / Б.И. Купчинов, В.С. Харитонов, В.Г. Родненков, С.Ф. Ермаков, Б.П. Батаев (СССР). -№ 3537510/23-04; Заявл. 15.10.82; Оpubл. 22.01.84.

57. А.с. 1205429 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 27 К 5/06. Способ получения антифрикционного материала / Б.И. Купчинов, С.Ф. Ермаков, В.Н. Савицкий, В.Г. Род-ненков (СССР). -№3724893/29-15; Заявл. 10.04.84; Оpubл. 15.09.85.

58. А.с. 1361991 СССР, МКИ<sup>4</sup> С 10 L 1/18. Присадка для обкатки двигателей внутреннего сгорания / Б.И. Купчинов, С.И. Прокопенко, В.П. Паркалов, С.Ф. Ермаков, В.Г. Родненков, Б.С. Кабаев, А.В. Малявко (СССР). -№ 4093498/23-04; Заявл. 09.07.86; Оpubл. 22.08.87.

59. А.с. 1420480 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01 N 19/02. Электронно-счетный маятниковый трибометр / С.Ф. Ермаков, Б.И. Купчинов (СССР). - № 4195328/25-28; Заявл. 16.02.87; Оpubл. 30.08.88, Бюл. № 32 // Открытия. Изобретения. -1988.-№32.-С.202.

60. А.с. 1408799 СССР, МКИ<sup>4</sup> С 10 М 107/50. Смазочный состав / Б.И. Купчинов, С.Ф. Ермаков, В.П. Паркалов, В.Г. Родненков, В.А. Белый (СССР). -№ 4105915/31-04; Заявл. 08.08.86; Оpubл. 08.03.88.

61. А.с. 1496147 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 27 К 3/52. Антифрикционный материал / Б.И. Купчинов, С.Ф. Ермаков, В.П. Паркалов, О.А. Андриенко (СССР). - № 4286517/29-15; Заявл. 20.07.87; Оpubл. 22.03.89.

62. А.с. 1492710 СССР, МКИ<sup>4</sup> С 10 L 1/18. Прирабочная присадка к топливу / Б.И. Купчинов, В.П. Паркалов, В.Г. Родненков, С.Ф. Ермаков, С.И. Прокопенко, Б.С. Кабаев, Е.И. Рыбаков (СССР). - № 4277474/23-04; Заявл. 06.07.87; Оpubл. 08.03.89.

63. А.с. 1630033 СССР, МКИ<sup>5</sup> А 61 F 2/76. Способ исследования смазочных жидкостей для суставов и устройство для его осуществления/ С.Ф. Ермаков, Б.И. Купчинов, Е.Д. Белоенко (СССР). - № 4455100/14; Заявл. 05.07.88; Оpubл. 22.10.90.

64. Пат. 1711480 A1 SU, С 10 М 159/08. Способ получения присадки к смазочным материалам / Купчинов Б.И., Паркалов В.П., Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Тищенко В.Г., Саркисов Л.А., Лебединец Т.И., Гуляев Ф.Я. - № 4793483/04; Заявл. 21.02.90. Оpubл. 08.10.91.

65. Пат. 5,238,929 US, А 61 К 31/56. Correction of tribology of arthritis-affected joints and medicine for its implementation / Кoupchinov B.I., Ermakov S.F., Belojenko E.D., Rodnenkov V.G., Kcstelman V.N. - № 779,490; Заявл. 22.10.91; Оpubл. 24.08.93; НКИ 514/182. - 11 с.

66. Пат. 1809759 C1 SU, А 61 В 17/56. Способ лечения дегенеративно-дистрофических заболеваний суставов / Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Белоенко Е.Д., Родиенков В.Г., Кестельман В.Н., Браун Р.Д., Хесс Дж. -№ 4891288/14; Заявл. 22.10.90; Оpubл. 15.04.93 // Изобретения. - 1993. -№14.-С. 219.



67. Пат. 2007173 C1 RU, А 61 К 35/24. Способ получения искусственной синовиальной жидкости / Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Белоенко Е.Д., Родненков В.Г., Бобрышева С.Н. - № 4761774/14; Заявл. 23.11.89; Оpubл. 15.02.94 // Изобретения. - 1994. - № 3. - С. 24.

68. Пат. 2008855 C1 RU, А61К 31/79. Способ лечения артроза / Купчинов Б.И., Родиенков В.Г., Ермаков С.Ф., Бобрышева С.Н., Белоенко Е.Д., Козловский С.П., Воронович И.Р., Белый В.А. - № 3876526/14; Заявл. 04.04.85; Оpubл. 15.03.94 // Изобретения. - 1994. - № 5. - С. 68.

69. Пат. 897 C1 BY, А 61 К 31/00. Смазочная жидкость для суставов / Купчинов Б.И., Родненков В.Г., Ермаков С.Ф., Бобрышева С.Н., Лебедев А.П., Белый В.А. - № 3701881/14; Заявл. 16.02.84; Оpubл. 15.12.95. // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 1995. - № 4. -С. 71.

70. Пат. 898 C1 BY, А 61 К 31/79. Искусственная синовиальная жидкость / Б.И. Купчинов, И.Р. Воронович, Е.Д. Белоенко, С.Н. Бобрышева, В.Г. Родненков, С.Ф. Ермаков, В.А. Белый. - № 4138329/14; Заявл. 18.07.86; Оpubл. 15.12.95. // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. -1995.-№4.-С. 71.

71. Pat. 5,399,730 US, C 07 C 51/02. Method of Obtaining an Purified Wool Fat and Use as an Additive to Lubricants / Koupchinov B.L, Parkalov V.P., Rodnenkov V.G., Ermakov S.F., Tischenco V.G., Sarkisov L.A., Gulijaev F.E., Kestelman V.N., Sviridenok A.I. - №739,762; Заявл. 01.08.91; Оpubл. 21.03.95; НКИ 554/167. - 8 с.

72. Пат. 2210 C1 BY, C 09 G 1/02. Состав для полировки / Суслов А. А., Купчинов Б. И., Ермаков С. Ф., Барановский А. А., Козловский А. Т. - №950789; Заявл. 21. 07. 95; Оpubл. 30. 06. 98. // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 1998. - № 2. - С. 125.

73. Диплом № 65 на открытие. Свойство синовиальной среды обеспечивать высокую антифрикционность хрящей в суставах человека и животных / Купчинов Б.И., Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Бобрышева С.Н., Белоенко Е.Д., Воронович И.Р., Плескачевский Ю.М., Белый В.А. - № А-083; заявл. 16.02.84; Оpubл. 19.01.98. - 4 с.

**РЕЗЮМЕ**  
**Ермаков Сергей Федорович**  
**ТРИБОФИЗИКА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**  
**В МЕТАЛЛО- И БИОПОЛИМЕРНЫХ СОПРЯЖЕНИЯХ**

Ключевые слова: жидкокристаллические соединения холестерина (ЖКСХ), жидкокристаллическое состояние, естественные и искусственные среды, концептуальная модель, адсорбционная способность, лекарственный препарат.

Объект исследования: жидкокристаллические соединения холестерина, а также естественные и искусственные материалы на их основе.

Предмет исследования: Предметом исследования являются закономерности влияния жидкокристаллических (ЖК) присадок на структурное состояние и трибофизические характеристики природных и искусственных жидких сред.

Цель работы: установление биофизических механизмов низкого трения естественных суставов и разработка на базе выявленных закономерностей новых принципов управления трибофизическими параметрами биологических и технических диссипативных систем путем реализации в зоне динамического контакта мезоморфного состояния граничных слоев, моделирующих свойства природных ЖКСХ.

В работе использованы: современные методы идентификации ЖК-структур и фазового состояния - тонкослойная и газовая хроматография, поляризационная микроскопия, метод флуоресцентных зондов, дифференциальная сканирующая микрокалориметрия; методы исследования содержания жидких кристаллов в базовых маслах; триботехнические измерения осуществляли посредством разработанного для этих целей интегрально-счетного метода оценки малых вариаций амплитуд колебаний и электронно-счетных маятниковых трибометров с микропроцессорной обработкой и хранением экспериментальных данных.

Решена научно-техническая проблема создания концепции и структурно-механических принципов управления трибофизическими характеристиками естественных и технических диссипативных систем путем реализации в зоне динамического контакта мезоморфного нематического состояния граничных слоев с учетом деформационных свойств, структурных особенностей и смазочного действия природных ЖКСХ. Получены новые доказательства и развиты трибофизические представления о ЖК-состоянии веществ и их влиянии на работоспособность металло- и биополимерных сопряжениях.

Результаты исследований использованы при создании новых лекарственных препаратов для лечения суставных заболеваний и экологически чистых смазочных и самосмазывающихся материалов, содержащих ЖКСХ с температурой мезофазы в области температур эксплуатации исследуемых диссипативных систем.

**SUMMARY**  
**Ermakov Sergei Fedorovich**  
**TRIBOPHYSICS OF LIQUID-CRYSTALLINE MATERIALS**  
**IN METAL-BIOPOLYMER JOINTS**

Key words: liquid-crystalline cholesterol compounds (LCCC), liquid-crystalline state, natural and artificial media, conceptual model, adsorptivity, medicine preparation.

Object of investigations: liquid-crystalline cholesterol compounds, natural and artificial materials on their base.

Subject of investigations: subjects of investigation are regularities of liquid-crystalline (LC) additive effect on structural state and tribophysical characteristics of natural and artificial liquid media.

Objective of the work: determination of biophysical mechanisms of low friction in natural joints and development of new principles to govern tribophysical parameters in biological and technical dissipative systems based on established regularities through realizing a mesomorphous state of boundary layers which simulate properties of natural LCCC.

The work employed modern methods of identifying LC structures and phase state, including fine-layer and gas chromatography, polarizing microscopy, method of fluorescent probes; differential scanning microcalorimetry; methods of investigation of liquid crystal content in base oils; tribological measurements using developed with this aim integral-register method for estimation negligible variations in oscillation amplitudes and electronic register pendulum tribometers with micro-processing and storage of experimental data.

A scientific and technical problem has been solved of devising a concept and structural-mechanical principles of controlling tribophysical characteristics of natural and technical dissipative systems through formation of an ordered mesomorphous state in the boundary layers of the dynamic contact zone taking into account deformation properties, structural peculiarities and lubricity of natural LCCC. Tribophysical representations on LC state of substances and their effect on serviceability of metal and bio-polymer joints have been developed and new proofs to their unique properties have been obtained.

Investigation results have been adopted at creation of new medicines to cure joint diseases. Ecologically safe lubricating and self-lubricating materials have been developed which contain LCCC with mesophase temperature within the range of operation temperatures of dissipative systems under investigation.