

УДК 621.892:616.728.3

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНОВИАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Ю. М. ЧЕРНЯКОВА^а, Ж. В. КАДОЛИЧ^{б+}, Л. С. ПИНЧУК^б, Е. А. ЦВЕТКОВА^б, В. И. НИКОЛАЕВ^а

С помощью маятникового трибометра изучено трение в подвижных соединениях, моделирующих узлы трения эндопротеза суставов. Объектом исследования служили пары трения “сверхвысокомолекулярный полиэтилен — медицинская сталь”, смазываемые синовиальной жидкостью (СЖ) в электромагнитном поле (ЭМП). Выявлена зависимость коэффициента трения от вида заболевания суставов и его остроты. Обнаружено уменьшение коэффициента трения при воздействии ЭМП на смазочный слой СЖ при синовитах неиммунного характера. Выявленные закономерности изменения коэффициента трения при различных заболеваниях суставов идентифицировали с патологическими изменениями белковых молекул и пространственными изменениями надмолекулярных структур в синовии.

Ключевые слова: синовиальная жидкость, трение, коэффициент трения, маятниковый трибометр, электромагнитное поле.

Введение. Возможности передвижения и опоры, обуславливающие физическую активность человека, во многом определяются наличием подвижных соединений костей — суставов. Различают два типа суставов: синовиальные и хрящевые.

Синовиальные суставы (диартрозы) — подвижные сочленения, в которых суставные концы костей заключены в укрепленную связками фиброзную суставную капсулу, внутренняя поверхность которой выстлана синовиальной оболочкой, секретирующей в полость сустава синовиальную жидкость (СЖ) или синовию. СЖ является трансудатом крови и по составу имеет значительное сходство с плазмой, но отличается от нее меньшим содержанием белков и присутствием специфического протеогликана — гиалуроновой кислоты (ГУК) [1].

Благодаря необычным физико-химическим свойствам и композиционному составу, СЖ выполняет в суставах ряд функций: метаболическую (обменную), барьерную (защитную), протекторную (биомеханическую). Обеспечивая протекторную функцию, СЖ играет роль смазочного материала, снижая трение находящихся в подвижном контакте и покрытых хрящом суставных поверхностей костей. Низкое трение в суставе связывают с такими свойствами СЖ, как вязкость и псевдоупругость. Динамическая вязкость СЖ $\eta \approx 0,57$ Па·с в большой мере обусловлена содержанием ГУК, что подтверждено экспериментально [2]: с увеличением содержания фермента — гиалуронидазы — вязкость СЖ значительно уменьшается (до 0,1 Па·с). Упругие свойства синовии объясняют пространственной надмолекулярной структурой комплексов на основе ГУК и протеинов, образующих трехмерные сетки с консистенцией геля, благодаря чему при нагружении сустава создается амортизационный эффект [3]. В работе [4] предложена молекулярная модель смазки, согласно которой сеть молекул ГУК окружает сферические частицы протеина. Последние могут свободно перемещаться вокруг своей оси подобно вращающимся элементам шарикоподшипника.

Концептуальные модели смазки синовиальных суставов развиваются с 1959 г. К настоящему времени предложен ряд моделей, реализующих механизмы: “смазка выпотеванием”, “смазка сдавленной пленкой жидкости”, “бустерная смазка” [5–8].

а Гомельский государственный медицинский университет. Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Ланге, 5.

б Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ. Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

Обнаружено, что важную роль в снижении коэффициента трения в естественных суставах играют содержащиеся в СЖ сложные эфиры холестерина, являющиеся термотропными жидкокристаллическими соединениями в области физиологических температур (25—41 °С) [7, 8].

Воздействие агрессивных факторов (травма, заболевание) на анатомические структуры сустава приводит к ответной реакции последних в виде синовита (синовит — реактивное состояние тканей сустава, в основе которого лежит нарушение секреторной функции синовиальной оболочки, проявляющееся увеличением объема СЖ в полости сустава) [9]. При переходе сустава в такое состояние изменяется биохимический состав и структура СЖ, что в свою очередь отражается на ее смазочной способности.

Известно [10—14], что все живые организмы генерируют физические поля, прежде всего — электромагнитные (ЭМП). Последние оказывают энергетическое воздействие на структуры и функции биосистемы, что приводит к ее биологически целесообразным изменениям и обуславливает основные процессы жизнедеятельности. Воздействие на биологические объекты электрическим током, сопоставимым по силе с естественными постоянными токами тканей [12, 13], вызывает изменения их жизнедеятельности. Динамика электрофизического поля человека характеризуется медленными аperiodическими колебаниями в спокойном состоянии и резкими изменениями величины, а иногда и знака биологических потенциалов при нарушении стабильности функционального состояния тканей [5, 14].

В здоровом суставе источниками биополя являются суставные ткани и СЖ. При замещении пораженного сустава, когда практически одновременно ликвидируется патологический очаг, образуется так называемая “немая зона”, не генерирующая биофизических сигналов. Таким образом, при хирургическом вмешательстве происходит нарушение не только целостности сустава, но и биологически целесообразного воздействия на пару трения сустава естественных электрических полей [10, 14].

Цель работы — экспериментально *in vitro* изучить структурные изменения и оценить влияние ЭМП, моделирующего биофизическое поле естественного сустава, на смазочные свойства СЖ при синовитах различной этиологии.

Материал и методы испытаний. Образцы СЖ получали из коленных суставов пациентов до начала лечения в асептических условиях путем забора в шприц при проведении лечебно-диагностических пункций или во время операций (артроскопия, артротомия). Таким образом получена СЖ от пациентов с острым синовитом, хроническим синовитом в стадии обострения на фоне деформирующего артроза коленного сустава III степени, хроническим синовитом вне обострения, ревматоидным артритом, болезнью Бехтерева, а также образцы из условно здоровых суставов (таблица). Образцы СЖ замораживали и хранили в пластмассовых герметично закрытых пробирках объемом по 1 мл при температуре –20 °С.

Сравнительная оценка физико-химических характеристик исследуемых образцов СЖ

№ образца СЖ	Заболевание	Характеристики СЖ				
		Прозрачность	Вязкость	Вид муцинового сгустка	Изменение содержания ГУК	Концентрация белка, г/л
1	Острый синовит	Прозрачная	Резко снижена	Рыхлый	Резко снижено	36
2	Хронический синовит в стадии обострения на фоне остеоартроза III степени	Прозрачная	Снижена	Рыхлый	Снижено	32
3	Хронический синовит вне обострения	Прозрачная	Вязкая	Плотный	Нормальное	24
4	Болезнь Бехтерева	Прозрачная	Снижена	Рыхлый	Снижено	35
5	Ревматоидный артрит	Мутная	Незначительно снижена	Рыхлый	Снижено	53
6	Без заболевания суставов	Прозрачная	Вязкая	Плотный	Нормальное	10
7	Без заболевания суставов	Прозрачная	Вязкая	Плотный	Нормальное	15

Для максимального приближения условий испытаний к естественным условиям трения суставов использовали хорошо зарекомендовавший себя трибометр маятникового типа [7, 8], содержащий единственную — исследуемую пару трения. Принцип действия прибора основан на оценке коэффициента трения по измеряемым параметрам затухающих колебаний маятника (метод измерения логарифмического декремента затухания). Значения коэффициента трения определяли путем компьютерной обработки экспериментальных данных.

Пара трения трибометра состояла из опоры, выполненной из сертифицированного для ортопедии сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), и несущей маятник треугольной призмы (сталь марки 12Х18Н9), опорная грань которой имела закругление с радиусом $r = 2,5$ мм. Испытания проводили при массе маятника $m = 2,0$ кг и скорости скольжения $v = 1,0$ м/с, что соответствует средней физиологической нагрузке на коленный сустав человека.

В зоне трения исследуемой пары создавали магнитное поле, генерируемое соленоидом (количество витков $N = 600 \pm 2$, диаметр проволоки $d = 0,07$ мм, диаметр катушки $D = 21$ мм), установленным в опоре маятникового трибометра. Размороженную СЖ гомогенизировали перемешиванием в течение 5 мин., с помощью шприца помещали в зону трения (канавку) трибометра и воздействовали на нее ЭМП соленоида, направленным вдоль оси канавки в горизонтальной плоскости, в течение 40 мин. С помощью источника питания постоянного тока Б5-50 в соленоиде задавали силу тока $I = 0,06$ А и напряжение $U = 6$ В, что соответствовало напряженности магнитного поля в опоре трибометра $H = 1,2$ кА/м. Именно такие поля считают целесообразным применять при терапевтическом воздействии на синовиальные суставы [12, 13]. Для контроля задаваемых величин I и U использовали мультиметр DT-830В. Датчики трибометра были соединены с цифровым измерительным комплексом, что позволило осуществить автоматическую запись параметров трения.

Для качественной оценки влияния ЭМП на структурные изменения компонентов СЖ высушивали пробы СЖ — исходные и после воздействия ЭМП, применяемого в трибологическом эксперименте. Полученные таким образом текстуры анализировали с помощью оптического микроскопа.

Результаты исследования и обсуждение. Результаты исследования показали, что исходные величины коэффициента трения f_0 зависят от вида заболевания сустава.

Анализ кинетических зависимостей f при смазывании разными СЖ, подвергнутыми воздействию ЭМП, показал (рис. 1), что минимальные значения f_0 соответствуют СЖ условно “здоровой” и взятой из сустава, больного ревматоидным артритом. Обращает внимание взаимосвязь между “остротой” (давностью) синовита и величиной f_0 : чем острее протекает заболевание, тем выше f_0 .

На рис. 1 можно выделить три основных вида кинетических зависимостей f , для каждого из которых характерна однотипная реакция на воздействие ЭМП:

I — “нисходящая”; *II* — “восходящая”; *III* — пара трения не реагирует на электромагнитное воздействие.

При объяснении механизмов воздействия ЭМП на структурные компоненты СЖ мы использовали результаты изучения структурных превращений СЖ методом электрентермического анализа [5, 15], и серии новых экспериментов, результаты которых переданы в тематические журналы.

В образцах синовии, взятой из условно здоровых суставов (6, 7), пространственная структура ассоциатов ГУК и белка изначально упрямочена и уравновешена. По-видимому, по этой причине ЭМП практически не влияет на структуру и смазочные свойства СЖ при

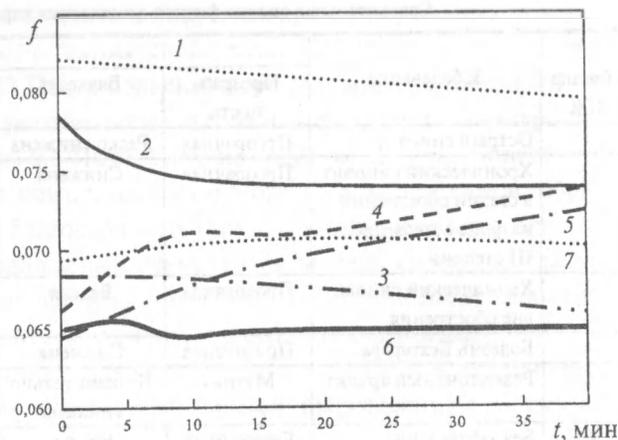


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения f от времени t обработки ЭМП образцов смазочной прослойки СЖ в опоре маятникового трибометра ($H = 1,2$ кА/м). Номера кривых соответствуют номерам образцов СЖ, указанным в таблице

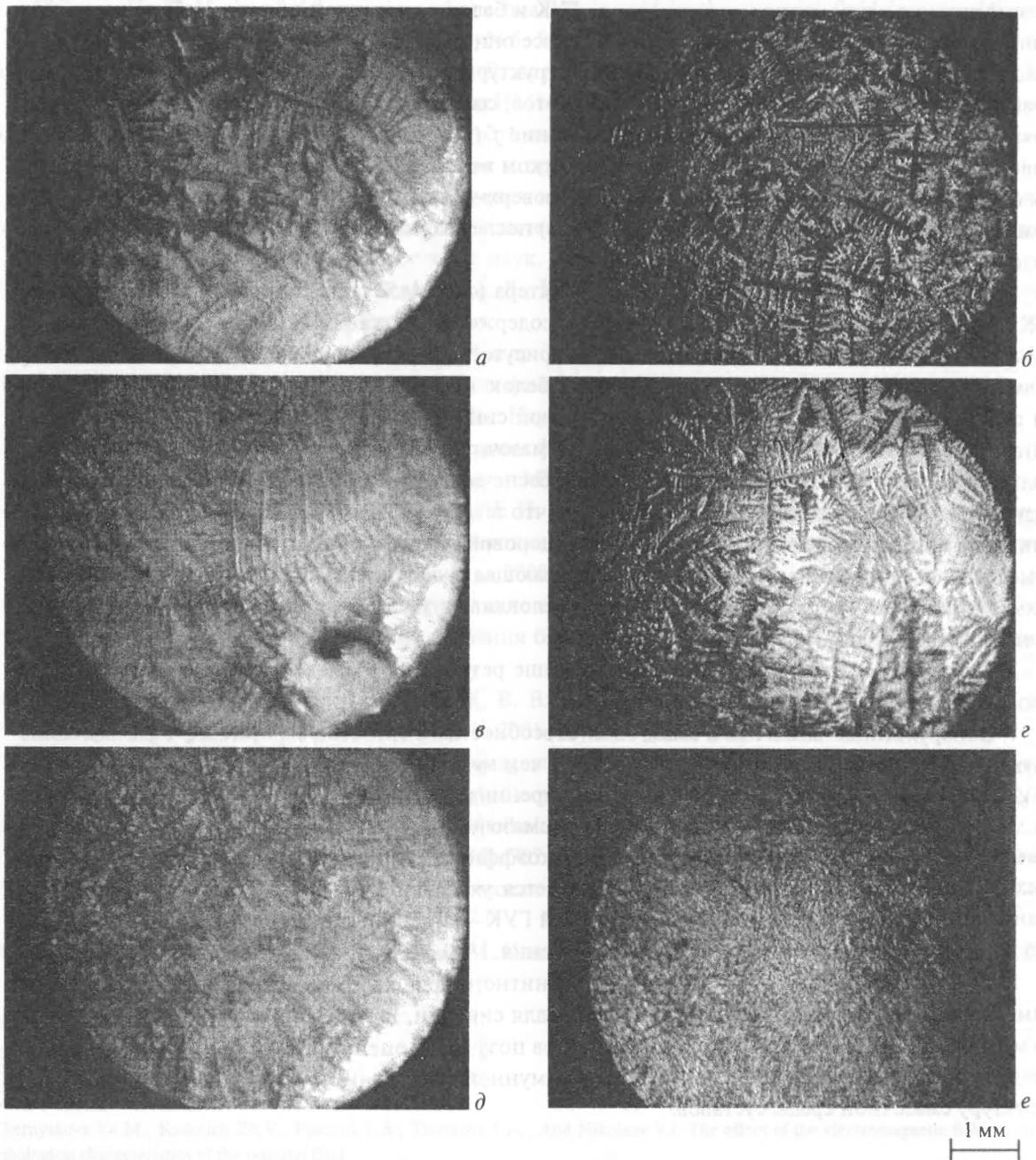


Рис. 2. Текстура проб СЖ, высушенных без воздействия ЭМП (*а, в, д*) и в поле напряженностью $H = 1, 2$ кА/м (*б, г, е*). Пробы *а* и *б* соответствуют образцам СЖ, взятой из условно здорового сустава (обр. 7 из таблицы); *в* и *г* — из сустава с острым синовитом (обр. 1); *д* и *е* — с ревматоидным артритом (обр. 5 из таблицы)

исследованных режимах трения. Результаты, представленные в работах [16–18], свидетельствуют о возможности снижения f при усиленных режимах воздействия поля (увеличении напряженности поля, времени воздействия и т. д.). Анализ текстур на рис. 2, *а, б* подтверждает гипотезу о том, что электромагнитное поле обуславливает структурную упорядоченность и более равномерное распределение компонентов в условно здоровой СЖ. Видно, что в пробе СЖ, высушенной в ЭМП (*б*), белковые структуры и дендриты, образующиеся при кристаллизации раствора ГУК в солевой фазе СЖ [1, 19], распределены более равномерно, чем в исходной пробе (*а*).

При протекании в суставе воспалительного процесса неиммунного характера (обр. 1–3) в комплексных соединениях синовиальной жидкости изменяется соотношение ГУК и белка. Содержание ГУК в СЖ снижается, а молекулы ГУК становятся более короткими. Количество белка значительно возрастает (до 24–36 г/л), хотя его фракции по химическому составу остаются неизменными [19]. Анализ текстур, приведенных на рис. 2, *в, г* свидетельствует, что воздействие ЭМП на такую синовию ин-

тенсифицирует равномерное распределение ГУК и белка в смазочной пленке. Избыточное содержание белковых молекул приводит к тому, что все они не могут быть связаны в комплексы ГУК—белок и образуют белковые надмолекулярные структуры [1]. Присутствие в смазочной пленке белковых надмолекулярных образований и ассоциатов, содержащих ГУК, обуславливает уменьшение коэффициента трения. Незначительное снижение f (в пределах 0,002—0,004) можно объяснить малой концентрацией таких ассоциатов и избытком не связанных с ГУК белковых надмолекулярных структур, образующих вязкую пленку на поверхности трения. Неоднородное распределение компонент в высушенных пробах СЖ (рис. 2, *в*) после воздействия ЭМП становится более упорядоченным (*г*), приближаясь к нормальному (*б*).

Воспалительные процессы иммунного характера (обр. 4, 5) также обуславливают снижение в СЖ концентрации ГУК и повышение общего содержания белка [20]. Однако среди молекул последнего преобладают патологические (т. е. не присутствующие в здоровой СЖ) формы, например, ревматоидный фактор (Ig M), С — реактивный белок, фибриноген, серомукоид и др. Они образуют с ГУК структуры, не характерные для здоровой синовии. Можно представить, что агрегаты патологически измененных белков образуют смазочную пленку, в которой концентрация нормальных ассоциатов ГУК и белка мала и не обеспечивает должный смазочный эффект. Анализ структур, приведенных на рис. 2, *д*, показывает, что текстура СЖ из сустава, пораженного ревматоидным артритом, более мелкая, чем текстура здоровой синовии (*а*). Под воздействием ЭМП она измельчается еще больше. По-видимому, смазывающая способность СЖ с такой структурой значительно ниже, чем у здоровой синовии, что обуславливает увеличение трения в исследуемой паре (рис. 1, кривые 4, 5).

Заключение. На основании приведенных выше результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. Обнаруженные различия в смазочной способности СЖ, взятой из суставов с разной степенью патологии, связаны с “остротой” синовита: чем меньше содержание в СЖ главного смазочного компонента — ГУК, тем выше коэффициент трения исследованных пар.

2. Воздействие электромагнитного поля на смазочные слои СЖ позволило выявить характерные ~~кинети~~ закономерности изменения коэффициента трения в моделях металлополимерных эндопротезов суставов. Их причиной является ухудшение смазочной способности СЖ, вызванное перестройкой комплексных соединений ГУК—белок и белковых надмолекулярных структур в синовии, имеющей патологические нарушения.

3. Уменьшение при воздействии электромагнитного поля коэффициента трения в металлополимерных парах, смазываемых СЖ, характерно для синовии, взятой из суставов с синовитами не иммунного характера. Результаты экспериментов позволяют оценить влияние электромагнитного поля на смазочный слой СЖ, не имеющей иммунной патологии, как фактор, нормализующий структуру смазочной среды суставов.

Обозначения

I — сила тока; U — напряжение; L — индуктивность; f — коэффициент трения; N — количество витков соленоида; t — время обработки смазочной прослойки; H — напряженность ЭМП; v — скорость скольжения; d — диаметр проволоки; D — диаметр катушки; m — масса маятника; r — радиус опорной грани трибометра; η — динамическая вязкость.

Литература

1. Павлова В. Н. Синовияльная среда суставов. — М.: Медицина. — 1980
2. Редин В. А., Мазаева Г. П. Система гиалуронидаза-гиалуроновая кислота при травматических артритах коленного сустава // Сб. метод. матер. ЦИТО. — М.: Медицина. — 1972, 17—19
3. Unsworth A., Dowson D., Wright V. The frictional behavior of human synovial joints. Part 1. Natural joints // Trans ASME. — 1975, (F 97), N 3, 369—376

4. **Chikama H.** The role of the protein and the hualuronic acid in the synovial fluid in animal joint lubrication // J. Jpn. Orthop. Ass. — 1985 (59), N 5, 559—572
5. **Пинчук Л. С., Николаев В. И., Цветкова Е. А.** Эндопротезирование суставов: технические и медико-биологические аспекты. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2003
6. **Николаев В. И.** Асептическая нестабильность ацетабулярного компонента эндопротезов: биофизические аспекты, диагностика, лечение и профилактика (клиническое и экспериментальное исследование): Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. — Минск. — 2000
7. **Ермаков С. Ф.** Трибофизика жидкокристаллических материалов в металло-и биополимерных сопряжениях: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. — Гомель. — 2001
8. **Ермаков С. Ф., Родненков В. Г., Белоенко Е. Д., Купчинов Б. И.** Жидкие кристаллы в технике и медицине. — Мн.: Асар, М.: ЧеРо. — 2002
9. **Павлова В. Н., Копьева Т. Н., Слуцкий А. И. и др.** Хрящ. — М.: Медицина. — 1988
10. **Ремизов А. А.** Медицинская и биологическая физика. — М.: Высшая школа. — 1999
11. **Кулин Е. Т.** Биоэлектретный эффект. — Мн.: Наука и техника. — 1980
12. **Улащик В. С.** Введение в теоретические основы физической терапии. — Мн.: Наука. — 1981
13. **Улащик В. С.** Очерки общей физиотерапии. — Мн.: Выш. школа. — 1994
14. **Барабаш И. В., Барабаш А. П., Арсентьева Н. И.** Изменение биоэлектрической активности головного мозга при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава // Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова. — 2000, № 1, 36—41
15. **Кадолич Ж. В.** Физическое модифицирование сопряжений полимер–металл для повышения их износостойкости на основе моделирования биофизических свойств естественных суставов. — Дис. ... к. т. н. — Гомель. — 2002
16. **Пинчук Л. С., Цветкова Е. А., Кадолич Ж. В.** Влияние электромагнитных полей на трение в эндопротезах суставов // Трение и износ. — 2001 (22), № 5, 550—554
17. **Pinchuk L., Tsvetkova E., Kadolich Z.** Electromagnetic and electret fields as means of improving endoprosthesis joint lubricity // 2nd World Tribology Congress: abstracts of papers. — Vienna. — 2001, 759
18. **Pinchuk L. S., Kadolich Z. V.** On the control of tribological parameters of hip joint endoprosthesis // Acta of bioengineering and biomechanics. — 2002 (4), 707
19. **Герасимов А. М., Фурцева Л. Н.** Биохимическая диагностика в травматологии и ортопедии. — М.: Медицина. — 1986
20. **Шуцяну Шт., Ионеску-Блажа В., Моангэ М.** Клиника и лечение ревматических заболеваний. — Бухарест: Мед. изд. — 1983

Поступила в редакцию 30.11.03.

Chernyakova Yu.M., Kadolich Zh.V., Pinchuk L.S., Tsvetkova E.A., And Nikolaev V.I. **The effect of the electromagnetic field on the tribological characteristics of the synovial fluid.**

A pendulum tribometer served to study friction of mobile couples simulating friction in a joint endoprosthesis. Friction couples, such as superhigh molecular polyethylene and medical steel lubricated with the synovial fluid in the electromagnetic field were studied. A relation is revealed between the friction coefficient, the type of a disease of joints and its graveness. The friction coefficient diminishes under the effect of the electromagnetic field on the lubricating layer of the synovial fluid in case of the non-immunity synovitis. Regularities are revealed how the friction coefficient changes in friction in response to different diseases of joints identified by pathological changes in protein molecules and three-dimensional changes in supramolecular structures in the synovia.