ТРИБОЛОГИЯ СИНОВИАЛЬНЫХ СУСТАВОВ: МЕХАНИЗМЫ ТРЕНИЯ, СМАЗКИ И ИЗНОСА ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИИ

(Обзор литературы)

Маматкулов О.Х.
PhD, заведующий кафедрой травматологии и ортопедии
Самаркандский государственный медицинский университет;
директор Самаркандского филиала Республиканского научно-практического медицинского центра травматологии и ортопедии
Бабакулова Г.К.
заведующая кафедрой «Сестринский уход в педиатрии»
Самаркандский техникум общественного здравоохранения имени Абу Али ибн Сино
Самарканд, Узбекистан.

Актуальность. Трибология — наука о трении, смазке и износе взаимодействующих поверхностей, находящихся в относительном движении, — традиционно ассоциируется с машиностроением: подшипниками, зубчатыми передачами, узлами трения механизмов. Между тем один из наиболее эффективных природных узлов трения — это синовиальный сустав человека, коэффициент трения в котором на один-два порядка ниже, чем у большинства искусственных инженерных пар трения. Раздел трибологии, изучающий подобные биологические системы, получил название биотрибологии. Актуальность темы обусловлена тем, что заболевания, связанные с разрушением суставного хряща — прежде всего остеоартроз, — по своей физической природе являются трибологическими: они представляют собой следствие нарушения режима смазки и последующего прогрессирующего износа фрикционной пары «хрящ — синовиальная жидкость — хрящ». Понимание механизмов трения и смазки сустава позволяет обоснованно подходить к выбору физических нагрузок, замедляющих износ, и избегать режимов нагружения, которые его ускоряют. Вместе с тем в научно-популярной и даже части методической литературы по лечебной физкультуре рекомендации по двигательной активности при заболеваниях суставов формулируются преимущественно эмпирически, без явной связи с трибологическими механизмами, что ограничивает их обоснованность и затрудняет перенос общих принципов на индивидуальные ситуации.

Цель работы. Систематизировать представления о трибологических механизмах, определяющих трение, смазку и износ синовиальных суставов, и на их основе обосновать практические рекомендации по физической активности, направленные на сохранение здоровья суставов.

Задачи исследования. 1. Рассмотреть синовиальный сустав как природную трибологическую пару и описать его основные фрикционные характеристики.

2. Охарактеризовать режимы смазки сустава (граничный, смешанный, гидродинамический) и условия перехода между ними.

3. Проанализировать механизм износа суставного хряща и его связь с развитием остеоартроза.

4. Систематизировать виды физической активности по их влиянию на трибологический режим работы сустава и сформулировать практические рекомендации.

Материалы и методы. Материалом для статьи послужили данные отечественной и зарубежной научно-методической литературы по биотрибологии синовиальных суставов, физиологии суставного хряща и синовиальной жидкости, а также материалы по лечебной физической культуре при заболеваниях суставов, включая обобщённые клинические рекомендации по выбору физических нагрузок при артрозе. Использованы методы теоретического анализа и систематизации литературных данных, а также сопоставление трибологических закономерностей (режимов смазки, зависимости износа от нагрузки) с клинически обоснованными видами физической активности.

Сустав как трибологическая пара. С точки зрения трибологии синовиальный сустав представляет собой закрытый узел трения, образованный двумя поверхностями суставного хряща, разделёнными тонким слоем синовиальной жидкости и заключённый в суставную капсулу (рис. 2). Такая конструкция по своему назначению полностью аналогична инженерному подшипнику скольжения, однако превосходит большинство технических аналогов по эффективности: коэффициент трения в здоровом суставе составляет порядка 0,001–0,03, тогда как для смазываемых металлических пар трения этот показатель обычно находится в диапазоне 0,05–0,15 (рис.1).



Медиальное изображение локтевого сустава

Рис. 1. Медиальное изображение локтевого сустава — пример анатомической структуры синовиального сустава, образующего природную трибологическую пару

(суставная капсула, кольцевидная и коллатеральные связки, венечный отросток локтевой кости).

Столь низкое трение обеспечивается сочетанием нескольких факторов:

1. Структурой суставного хряща — многослойной, анизотропной тканью с высоким содержанием воды (до 70–80%), способной перераспределять нагрузку и обратимо деформироваться;

2. Составом синовиальной жидкости — вязкоупругой среды, содержащей гиалуроновую кислоту и белок лубрицин, которые формируют граничный смазочный слой на поверхности хряща;

3. Биомеханикой сустава — геометрическим соответствием сочленяющихся поверхностей и распределением нагрузки по площади контакта.

Режимы смазки сустава. Поведение трибологической пары «хрящ — синовиальная жидкость — хрящ» при различных условиях нагружения описывается обобщённой зависимостью, аналогичной классической кривой Штрибека, используемой в инженерной трибологии для описания перехода между режимами смазки (рис. 2).

Рис. 1. Обобщённая кривая Штрибека для трибологической пары «суставной хрящ — синовиальная жидкость — суставной хрящ»

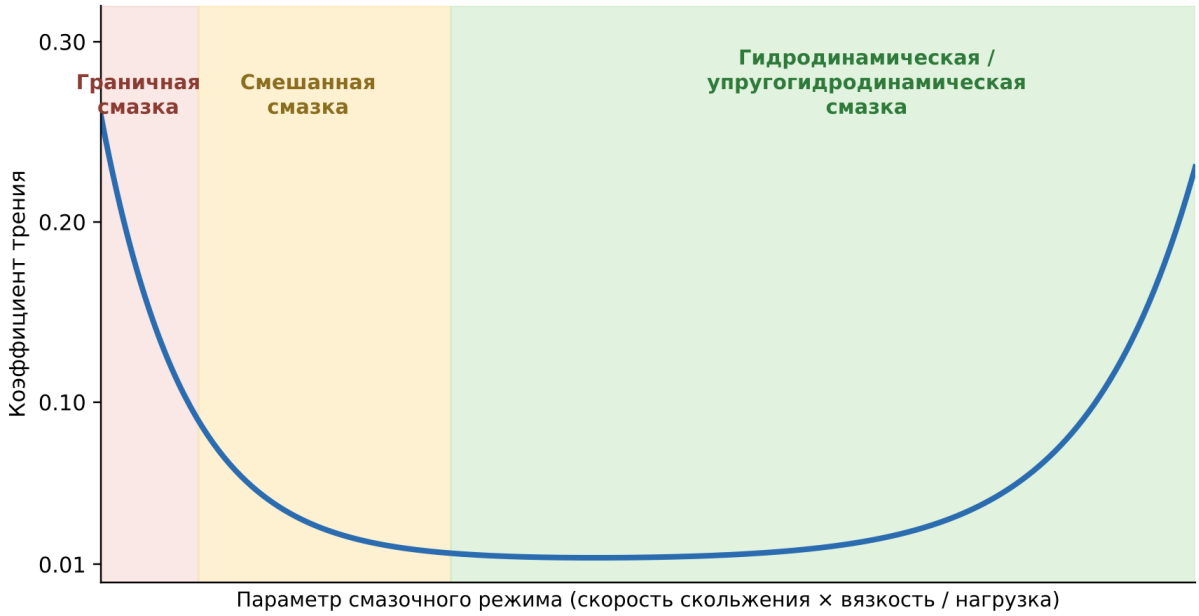

Рис. 2. Обобщённая кривая Штрибека для трибологической пары «суставной хрящ — синовиальная жидкость — суставной хрящ».

Граничная смазка реализуется при малых скоростях скольжения и высоких нагрузках — например, в статической позе или при начале движения после покоя. В этом режиме несущая способность смазочного слоя обеспечивается преимущественно адсорбированной на поверхности хряща плёнкой лубрицина и гиалуроновой кислоты толщиной порядка нескольких нанометров. Трение в этом режиме выше, чем в последующих, но по-прежнему на порядки ниже, чем у большинства инженерных материалов без смазки.

Смешанная смазка возникает при умеренных скоростях и нагрузках, когда часть нагрузки воспринимается тонким слоем жидкости, а часть — непосредственным контактом микронеровностей поверхностей.

Гидродинамическая (упругогидродинамическая) смазка формируется при достаточной скорости относительного движения поверхностей и характеризуется практически полным разделением сочленяющихся поверхностей слоем синовиальной жидкости. Дополнительный вклад в этот режим вносит так называемый эффект «выпотевания» (weeping lubrication): под действием нагрузки межклеточная жидкость хряща временно выдавливается в зону контакта, создавая дополнительную несущую плёнку и временно разгружая твёрдый матрикс хряща.

Переход между этими режимами определяется произведением скорости скольжения и вязкости синовиальной жидкости, отнесённым к приложенной нагрузке. Именно поэтому характер движения в суставе — медленное статическое нагружение или плавное ритмичное движение с умеренной амплитудой — напрямую определяет, в каком трибологическом режиме работает сустав в конкретный момент времени.

Износ хряща и остеоартроз как трибологическое заболевание. С трибологической точки зрения остеоартроз представляет собой результат прогрессирующего износа фрикционной пары, аналогичного износу инженерного узла трения при нарушении режима смазки. Качественно этот процесс можно описать по аналогии с законом Арчарда, связывающим объём изнашиваемого материала с приложенной нагрузкой, пройденным путём скольжения и твёрдостью (износостойкостью) материала: чем выше контактное давление и чем ниже качество смазочного слоя, тем быстрее прогрессирует разрушение поверхности. Применительно к суставу это означает, что скорость износа хряща возрастает при:

1. Увеличении контактного давления — вследствие избыточной массы тела, ударных нагрузок (бег по твёрдой поверхности, прыжки) или нарушения оси конечности;
2. Ухудшении качества синовиальной жидкости — снижении концентрации гиалуроновой кислоты и лубрицина, что характерно для возрастных и дегенеративных изменений и смещает режим работы сустава из гидродинамического в граничный, с более высоким трением;
3. Недостаточной или, напротив, чрезмерной двигательной активности — в обоих случаях нарушается нормальное распределение и обновление синовиальной жидкости в полости сустава.

Результатом износа становится истончение и фибрилляция хрящевой поверхности, обнажение подлежащей кости, рост коэффициента трения и дальнейшее ускорение разрушения — процесс приобретает самоподдерживающийся, лавинообразный характер, типичный для инженерных узлов трения при выходе из строя системы смазки.

Влияние физической активности на трибологический режим сустава. Поскольку режим смазки сустава определяется характером движения,

обоснованный выбор физической активности является одним из ключевых факторов, позволяющих поддерживать сустав в благоприятном, низкофрикционном режиме работы и минимизировать износ.



Низкоударные циклические нагрузки — ходьба в умеренном темпе, занятия на велотренажёре, плавание — обеспечивают плавное, ритмичное нагружение сустава с умеренной скоростью скольжения суставных поверхностей (рис. 3). Такой характер движения способствует переходу сустава в смешанный и гидродинамический режим смазки, при котором нагрузка воспринимается преимущественно жидкой плёнкой, а не непосредственным контактом хрящевых поверхностей (рис.3).

Рис. 3. Упражнения в водной среде снижают эффективную контактную нагрузку в суставе за счёт выталкивающей силы воды.

Упражнения в водной среде (аквааэробика, плавание) дополнительно снижают эффективную нагрузку на сустав за счёт выталкивающей силы воды, что уменьшает контактное давление в суставе и позволяет выполнять движения в более широком диапазоне без перехода в неблагоприятный граничный режим смазки.

Упражнения на растяжку и гибкость (йога, пилатес, статическая растяжка) способствуют равномерному распределению синовиальной жидкости по всей площади суставных поверхностей, включая периферические зоны хряща, которые при ограниченной амплитуде движений получают меньше питательных веществ за счёт диффузии через смазочный слой (рис. 4).



Рис. 4. Статическая растяжка способствует равномерному распределению синовиальной жидкости по поверхности суставного хряща

Силовые упражнения с умеренным отягощением укрепляют мышцы, окружающие сустав, что способствует более равномерному распределению нагрузки по площади контакта и снижает локальные пиковые давления, ускоряющие износ отдельных участков хряща. Напротив, высокоударные нагрузки (бег по твёрдому покрытию, прыжки, силовые упражнения с предельными весами) создают кратковременные пики контактного давления, которые могут превышать несущую способность смазочного слоя и переводить сустав в режим граничной смазки с повышенным трением даже при в целом достаточной скорости движения — это один из механизмов, посредством которого чрезмерная ударная нагрузка ускоряет износ хряща у лиц с уже имеющимися дегенеративными изменениями (рис.5).

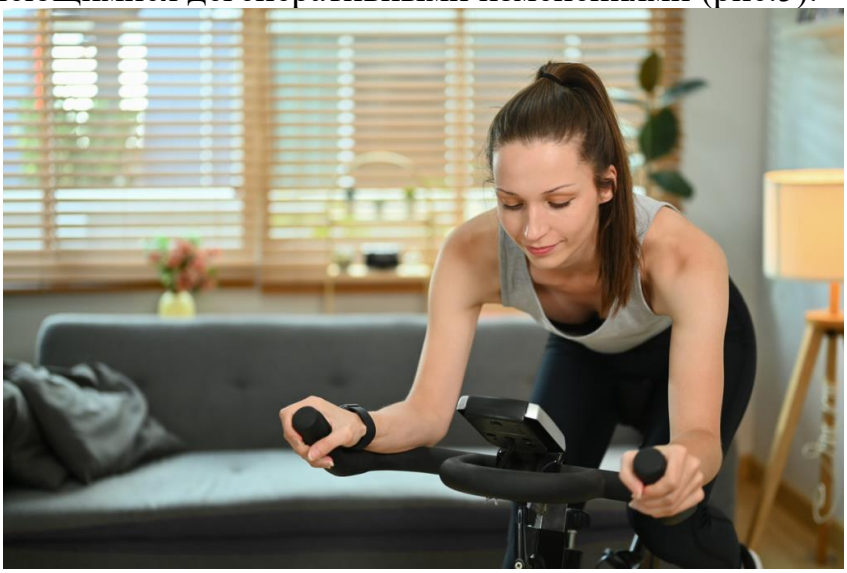

Рис. 5. Занятия на велотренажёре — пример низкоударной циклической нагрузки, способствующей гидродинамическому режиму смазки сустава

Биотрибология синовиальных суставов в педиатрии изучает процессы трения, смазки и износа хрящевых тканей у детей и подростков с учетом высокой гидрофильности неокостеневшего матрикса и интенсивного созревания опорно-двигательного аппарата. В отличие от взрослых, детские

суставы обладают уникальной регенеративной способностью, однако подвержены специфическим рискам износа при чрезмерных спортивных нагрузках.

1. Механизмы трения: особенности детского возраста - Коэффициент трения (μ) в здоровом синовиальном суставе ребенка чрезвычайно мал (0,001–0,02), что превосходит любые искусственные пары трения. **Хрящевой матрикс:** у детей суставной хрящ толще, содержит больше воды (до 85%) и имеет меньшую плотность коллагеновых волокон, что делает его более податливым под механической нагрузкой. **Трение при активности:** при низких скоростях движений (фаза опоры, статический упор) преобладает адгезионное трение, минимизируемое за счет молекул лубрицина. При быстрых циклических движениях (бег, прыжки) трение переходит в деформационную фазу, где хрящ работает как упруго-гидродинамический демпфер.

2. Режимы смазки в растущем суставе

Для защиты сустава при физической активности активируется **мультимодальная система смазки**:

Режим смазки	Механизм действия	Роль при физической активности у детей
Гидродинамическая	Жидкостная пленка полностью разделяет поверхности при высокой скорости скольжения.	Эффективна при быстрых циклических движениях (плавание, езда на велосипеде).
Граничная (пограничная)	Молекулы смазки связываются непосредственно с рецепторами хряща, предотвращая контакт «хрящ–хрящ».	Активируется при высоких точечных нагрузках (приземление после прыжка, тяжелая атлетика).
«Выжимающая» (Squeeze-film)	Синовиальная жидкость медленно выжимается из хрящевых пор в зону контакта под давлением.	Обеспечивает временную защиту при статических и ударных нагрузках.

Ключевые компоненты детской синовии:

1. **Гиалуроновая кислота (ГК):** обеспечивает вязкоупругие свойства. У детей оборот ГК происходит быстрее, что способствует оперативному восстановлению реологических свойств синовии.
2. **Лубрицин (PRG4):** Специализированный гликопротеин, «прилипающий» к поверхности хряща. Создает защитный гидрофильный барьер, снижающий граничное трение.
3. **Поверхностно-активные фосфолипиды (SAPL):** формируют олигомолекулярные слои, работающие как «твердая смазка».

3. Биомеханика износа и риски при физической активности. Износ (усталость и деструкция хряща) в педиатрической практике редко связан с дегенеративными процессами, чаще он обусловлен **микротравматизацией и дисбалансом нагрузок**: 1. **Усталостный износ (Fatigue wear):** возникает при

многократных циклических перегрузках (например, юношеский спорт высоких достижений). Коллагеновый каркас теряет прочность, хрящ начинает терять протеогликаны. 2. **Абразивный износ:** вроисходит, если синовиальная жидкость теряет вязкость (например, при реактивном или ювенильном артрите). Хрящевые поверхности соприкасаются напрямую, вызывая микроотслоения. **Фактор зон роста:** Неокостеневшие зоны эпифизов у детей менее устойчивы к сдвиговым трибологическим нагрузкам, что при нерациональной активности может привести к остеохондропатиям (болезнь Шляттера, болезнь Пертеса). [1]

Клинико-профилактические выводы.

1. **Адаптация хряща:** Умеренная физическая активность необходима для «питания» хряща, так как суставной хрящ авенозен, и обмен веществ в нем происходит исключительно за счет диффузии при трибологическом сжатии и расслаблении («эффект губки»).
2. **Опасность гипернагрузок:** Отсутствие полноценного отдыха между тренировками истощает «выжимающий» (squeeze-film) механизм смазки, переводя сустав в режим постоянного граничного трения и ускоренного износа.

Практические рекомендации. Исходя из рассмотренных трибологических закономерностей, можно сформулировать следующие практические принципы выбора физической нагрузки для суставов, особенно при наличии признаков остеоартроза:

1. Отдавать предпочтение низкоударным циклическим нагрузкам — ходьбе, плаванию, велотренировкам — продолжительностью 150–300 минут в неделю.

2. Включать упражнения в водной среде, минимизирующие контактное давление в суставе при сохранении полноценного объёма движений.

3. Регулярно выполнять упражнения на растяжку и гибкость для равномерного распределения синовиальной жидкости по поверхности хряща.

4. Укреплять мышцы, окружающие сустав, умеренными силовыми упражнениями 2–3 раза в неделю.

5. Избегать высокоударных нагрузок и резких, рывковых движений, создающих пики контактного давления.

6. Контролировать массу тела, поскольку снижение избыточного веса прямо пропорционально уменьшает контактное давление в несущих суставах.

7. Прекращать нагрузку при появлении боли, отёка или хруста с дискомфортом — эти симптомы могут свидетельствовать о переходе сустава в неблагоприятный трибологический режим и ускоренном износе.

Заключение. Рассмотрение синовиального сустава как природной трибологической пары позволяет обоснованно объяснить, почему одни виды физической активности способствуют сохранению здоровья суставов, а другие — ускоряют их разрушение. Низкий коэффициент трения в здоровом суставе обеспечивается переходом между граничным, смешанным и гидродинамическим режимами смазки в зависимости от характера движения,

а прогрессирующий износ хряща при остеоартрозе представляет собой типичный трибологический процесс разрушения узла трения при нарушении режима смазки. Практические рекомендации по выбору физической активности — предпочтение низкоударных и водных нагрузок, регулярная растяжка, укрепление околосуставных мышц и контроль массы тела — находят прямое физическое обоснование в закономерностях биотрибологии и могут быть использованы как теоретическая основа при разработке программ лечебной физкультуры для пациентов с заболеваниями суставов.

Литература

1. Епифанов В. А. Лечебная физическая культура и массаж: учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. — 528 с. — ISBN 978-5-9704-2645-6.
2. Лечебная физическая культура: учебное пособие / под ред. ведущих специалистов. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. — 656 с. — ISBN 978-5-9704-4257-9.
3. Реабилитация при повреждениях локтевого сустава и их последствиях: клинические рекомендации. — 2015 [Электронный ресурс]. — URL: https://diseases.medelement.com/disease/15364 (дата обращения: 14.10.2026).
4. Чичинадзе А. В. (ред.) Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2001. — 664 с. — ISBN 5-217-02981-X.
5. Биотрибология суставного хряща: обзор современных представлений [Электронный ресурс]. — Дата обращения: 14.10.2026.