

**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра фізичної реабілітації, спортивної медицини,  
фізичного виховання і здоров'я

**Біомеханіка і клінічна кінезіологія**

**Тема 4-5. РУХОВИЙ АПАРАТ ЛЮДИНИ**

Методичні рекомендації для самостійної роботи  
студентів III курсу медичних факультетів  
спеціальності «Фізична терапія, ерготерапія»

Запоріжжя

2019

***Затверджено:***

на засіданні кафедри фізичної реабілітації, спортивної медицини, фізичного виховання і здоров'я ЗДМУ протокол № 1 від 29.08.2019 р.

на ЦМР ЗДМУ протокол № від р.

***Автори:***

***Дорошенко Е.Ю.***, доктор наук з фізичного виховання та спорту, професор кафедри фізичної реабілітації, спортивної медицини, фізичного виховання і здоров'я ЗДМУ;

***Гурсьва А.М.***, кандидат наук з фізичного виховання та спорту, доцент кафедри фізичної реабілітації, спортивної медицини, фізичного виховання і здоров'я ЗДМУ;

***Черненко О.Є.***, кандидат наук з фізичного виховання та спорту, доцент кафедри фізичної реабілітації, спортивної медицини, фізичного виховання і здоров'я ЗДМУ

Методичні рекомендації призначені для студентів, які навчаються за спеціальністю 227 «Фізична терапія, ерготерапія» ЗВО МОЗ України для допомоги у вивченні окремих питань біомеханіки та клінічної кінезіології, які віднесено до самостійної роботи згідно типової та робочої програм, в рамках підготовки до практичних занять та кращого засвоєння навчального матеріалу.

**Актуальність теми.** Біомеханіка вивчає переважно ті особливості будови й функцій тіла людини та її опорно-рухового апарату, які мають найбільше значення для удосконалення рухових дій. Знання особливостей опорно-рухового апарату людини фізичному терапевту та ерготерапевту необхідні для використання здобутих знань у процесі розв'язання професійних задач, основи керування рухами, основи проведення біомеханічного аналізу, синтезу та моделювання фізичних вправ, основи біомеханіки рухових якостей.

### **Зміст**

1. Руховий апарат людини як біомеханічна система. Структурна схема опорно-рухового апарату людини. Біокінематичні пари та ланцюги біоланок.
2. Особливості визначення числа ступенів свободи біокінематичних ланцюгів.
3. Характеристика 15-ланкової моделі тіла людини.
4. Важіль як біомеханічна категорія.
5. Важелі I та II роду. Умови збереження положення ланцюгів та їх рухів як важелів.
6. «Золоте правило» механіки у рухах людини.
7. Механічні властивості кісток і суглобів.
8. Біомеханічні властивості м'язів.
9. Форми, типи та режими скорочення м'язових волокон.

### **Список рекомендованої літератури**

#### *Основна:*

1. Біомеханіка фізичних вправ: навчально-методичний посібник / О.С. Козубенко, Ю.В. Тупєєв. – Миколаїв, 2015. – 215 с.
2. Соколова О.В. Біомеханіка: навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Фізична культура і спорт» освітньо-професійних програм «Фізичне виховання» і

«Спорт» / О.В. Соколова, Г.А. Омеляненко, В.О. Тищенко. – Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2017. – 96 с.

*Допоміжна:*

1. Біомеханіка спорту / під загальною редакцією Лапутіна А.М. – К., Олімпійська література, 2005. – 310 с.
2. Біомеханіка фізичного виховання і спорту: навч. посіб. / М.О. Носко, О.В. Бріжаний, С.В. Гаркуша, І.А. Бріжата. – Київ, 2012. – 286 с.
3. Біомеханічні аспекти руховий якостей: вибрані лекції з кінезіології: метод. посіб. для студ. ЛДУФК / О.Ю. Рибак, Л.І. Рибак. – Львів: ЛДУФК, 2012. – Ч. 1. – 72 с.
4. Практическая биомеханика / А.Н.Лапутин, В.В.Гамалий, А.А.Архипов и др.; А.Н.Лапутин (общ. ред.). – К.: Науковий світ, 2002. – 298 с.

***Основні терміни теми:***

**Ланкою** називається частина тіла, розташована між двома сусідніми суглобами чи між суглобом і дистальним кінцем. Наприклад, ланками тіла є кисть, передпліччя, плече, голова і т.д.

**Біомеханічна система** – це сукупність живих об'єктів (органів, тканин), які характеризуються загальними особливостями при проявах законів механічного руху, а також загальними особливостями способів управління ними, участі в цих рухах або в їх використанні.

**Біокінематична пара** – це рухоме (кінематичне) з'єднання двох біоланок у суглобі, будова якого і керуючі дії м'язів визначають можливі варіанти взаємного механічного переміщення з'єднаних ним частин тіла.

**Біокінематичний ланцюг** – це послідовне або розгалужене з'єднання ряду біокінематичних пар.

**Число ступенів свободи** в біокінематичних ланцюгах визначається числом біокінематичних пар, що входять у ланцюг, його будовою та переважним впливом м'язів.

**Важіль першого роду** (важіль *рівноваги*) характеризується тим, що жорстке, тобто негнучке тіло (наприклад, кістка чи кілька кісток, які беруть участь в будові цілісного кістковогоутворення – череп, таз) в одній своїй точці має місце опори, по боках від якої прикладено дві сили, що діють в одному напрямку – сила м'язової тяги й сила тяжіння.

**Важіль другого роду** (важіль *сили* та важіль *швидкості*) – це таке жорстке тіло (наприклад, кістка або система кісток), яке в одній своїй точці має місце опори, а до двох інших його точок, що знаходяться з одного боку від місця опори, прикладені сили в різних напрямках.

**Важіль сили** (наприклад, стопа) – сила м'язової тяги прикладена далі від місця опори, ніж інша сила – сила тяжіння, тобто плече сили м'язової тяги більше від плеча сили тяжіння.

**Важіль швидкості** (наприклад, плече або передпліччя) – сила м'язової тяги прикладена ближче до місця опори, ніж сила тяжіння, тобто плече сили м'язової тяги менше від плеча сили тяжіння.

## **1. Руховий апарат людини як біомеханічна система Структурна схема опорно-рухового апарату людини. Біокінематичні пари та ланцюги біоланок.**

**Руховий апарат людини** – це саморушійний механізм, що складається з 600 м'язів, 200 кісток, декількох сотень сухожиль. Ці цифри приблизні, оскільки деякі кістки (наприклад, кістки хребетного стовпа, грудної клітки) зрослися, а багато м'язів мають декілька голівок (наприклад, двоголовий м'яз плеча, чотириголовий м'яз стегна) або поділяються на безліч пучків (дельтоподібний, великий грудний, прямий м'яз живота, найширший м'яз спини і багато інших). Вважається, що рухову діяльність людини за складністю можна порівняти з людським мозком – найбільш довершеним утворенням природи. І подібно до того, як вивчення мозку починають з дослідження його елементів

(нейронів), так і в біомеханіці насамперед вивчають властивості елементів рухового апарата.

Руховий апарат складається з ланок.

**Ланкою** називається частина тіла, розташована між двома сусідніми суглобами чи між суглобом і дистальним кінцем. Наприклад, ланками тіла є кисть, передпліччя, плече, голова і т.д.

У людському тілі близько 70 ланок. Для вирішення більшості практичних завдань достатньо 15-ланкової моделі людського тіла. Зрозуміло, що в 15-ланковій моделі деякі ланки складаються з декількох елементарних ланок. Тому такі укрупнені ланки доцільно називати **сегментами**.

Знаючи, які маси й моменти інерції ланок тіла і де розташовані їх центри мас, можна вирішити багато важливих практичних завдань, зокрема визначити кількість руху; визначити кінетичний момент; оцінити, наскільки легко/важко керувати швидкістю тіла або окремої ланки; визначити ступінь стійкості тіла тощо.

Біомеханіка вивчає переважно ті особливості будови і функцій тіла людини та її опорно-рухового апарату, які мають найбільше значення для удосконалення рухових дій.

Відволікаючись від деталей анатомічної будови і фізіологічних механізмів рухового апарату, розглядають спрощену модель тіла людини – **біомеханічну систему**. Вона володіє основними властивостями, важливими для виконання рухової функції, але не включає в себе більшості другорядних деталей.

**Біомеханічна система** – це сукупність живих об'єктів (органів, тканин), які характеризуються загальними особливостями при проявах законів механічного руху, а також загальними особливостями способів управління ними, участі в цих рухах або в їх використанні.

**Розрізняють системи:**

- **активні** (всього тіла, рухового апарата);
- **пасивні** (внутрішніх органів, м'яких та рідких тканин).

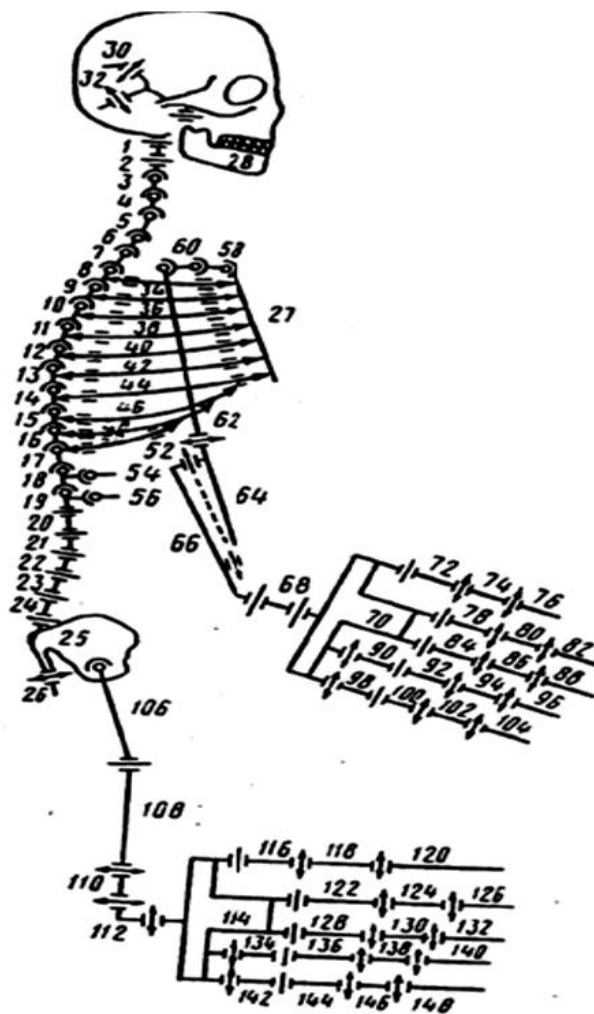
Особливий інтерес для вивчення рухів людини являє біомеханічна система його рухового апарата, яка служить:

- ✓ джерелом енергії;
- ✓ механізмом для передачі зусиль;
- ✓ об'єктом руху;
- ✓ системою керування.

**Біомеханічна система** – це спрощена копія, модель тіла людини, на якій можна вивчати закономірності її рухових дій.

Таким чином, біомеханічна система тіла людини складається з **біомеханічних ланцюгів**.

Більшість частин тіла, з'єднаних рухомо, утворюють **біокінематичні ланцюги**. До них прикладені сили (навантаження), які викликають деформації самих біоланок та зміну їх руху.



**Рис. 1. Структурна схема опорно-рухового апарату людини (за А. Morecrietal, 1981)**

Складовими частинами біомеханічної системи є **біокінематичні ланцюги** – ланцюги між багатьма частинами тіла, що рухомо з'єднані.

До цих ланцюгів прикладаються сили (навантаження), які викликають деформацію і зміну рухів.

**До основних видів деформацій відносяться:**

- розтяг;
- стискання;
- вигин;

- крутіння;
- зрушення.

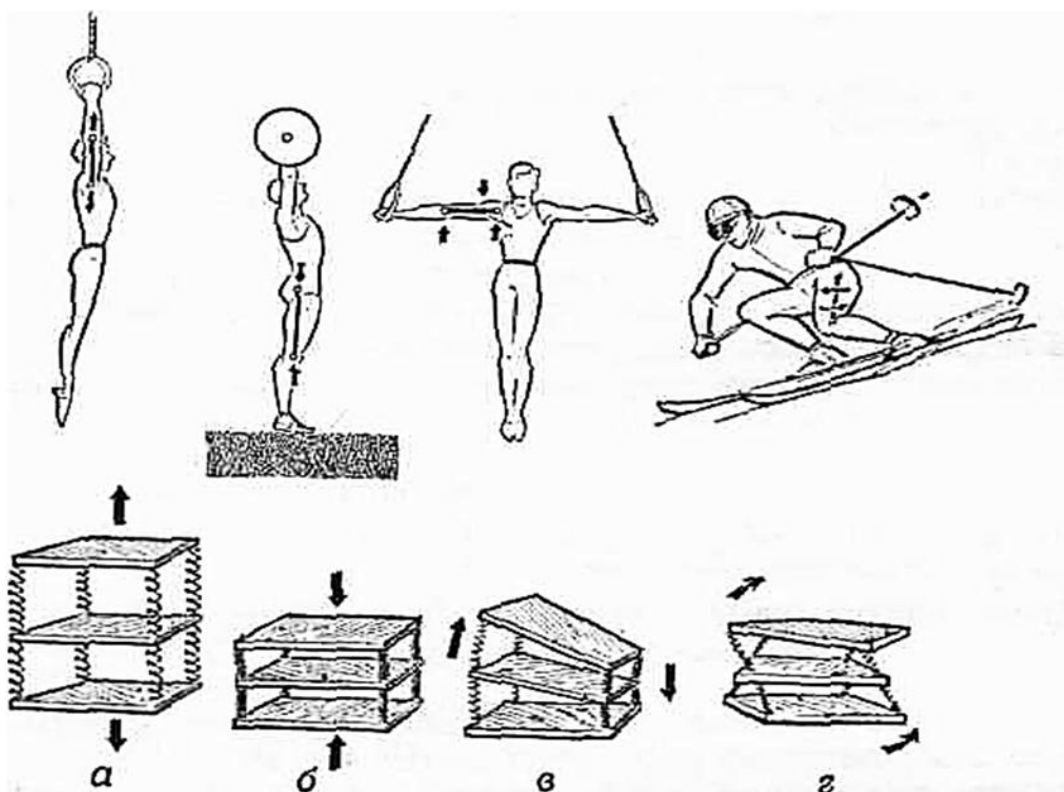
Кістки скелета і м'які тканини при деформації під дією прикладених сил (навантажень) протидіють їм.

Навантаження, що зумовлюють **розтягнення** – це найбільш характерні навантаження для м'яких тканин. Вони виникають, наприклад, при висах (рис. 2, а) або під час утримання вантажу в опущених руках.

Навантаження, що створюють **стискання** кісток і хрящів, зустрічаються найчастіше при вертикальному положенні тіла на опорі (рис. 2, б). У цьому випадку на скелет діють, з одного боку, сили тяжіння тіла і вага зовнішніх обтяжень, а з іншого – тиск опори.

Навантаження, що викликають **вигин**, зазвичай зустрічаються, коли кістки виконують роль важелів. У цих випадках додані до них сили м'язів і сили опору спрямовані поперек кісток і викликають вигин (рис. 2, в).

Нарешті, навантаження, що зумовлюють **кручення**, найчастіше зустрічаються при обертальних рухах ланки навколо поздовжньої осі (рис. 2, г).



**Рис. 2. Навантаження, що викликають деформацію:**  
**а – розтягнення; б – стискання; в – вигин; г – кручення.**  
**На схемах внизу – зміщення елементів (за С. Е. Хайкіпом)**



**Біокінематична пара** – це рухоме (кінематичне) з'єднання двох біоланок у суглобі, будова якого і керуючі дії м'язів визначають можливі варіанти взаємного механічного переміщення з'єднаних ним частин тіла.

**Біокінематичні пари бувають:**

- ✓ **поступальні** – одна ланка може переміщатися поступального по іншому (наприклад, бічні рухи нижньої щелепи);
- ✓ **обертальні** (наприклад, повороти в циліндричних і кулястих суглобах тіла людини);
- ✓ **гвинтові** з поєднанням поступального і обертального рухів (наприклад, в гомілковостопному суглобі).

З'єднання, що допускають поворот ланок пари, називають **шарнірами**.

**Біокінематичний ланцюг** – це послідовне **незамкнуте** (розгалужене), або **замкнуте** з'єднання біоланок через біокінематичні пари.

**Біокінематичні ланцюги бувають:**

- ✓ замкнені,
- ✓ незамкнені.

В **незамкнених** ланцюгах є вільна біоланка, яка з'єднана лише з однією біоланкою. В незамкнутому ланцюгу можливі ізолювані рухи в кожному суглобі. При виконанні рухових дій рухи в незамкнутих ланцюгах проходять одночасно в багатьох суглобах, але можливість ізолюваного руху не виключена. Такі ізолювані рухи геометрично незалежні від рухів в інших з'єднаннях (якщо не враховувати взаємодії м'язів). Наприклад, вільні кінцівки, коли їх кінцеві ланки вільні, являють незамкнуті ланцюга.

У **замкнутих ланцюгах** немає вільної кінцевої ланки: кожна біоланка обов'язково з'єднана двома біопарами. В замкнутому ланцюгу ізолювані рухи в одному суглобі неможливі: у цей рух одночасно втягуються й інші з'єднання. Так, наприклад згинаючи і випрямляючи ноги у випаді, можна переконатися в тому, що рух в будь-якому суглобі неодмінно викликає рухи і в інших.

Значна частина незамкнутих біокінематичних ланцюгів характеризується наявністю багато суглобових м'язів. Тому рухи в одних суглобах за участю

таких м'язів обов'язково пов'язані з рухами в сусідніх суглобах. Але при точному керуванні рухами у багатьох випадках цей взаємний зв'язок можна «виключити».

В *замкнених ланцюгах* зв'язок невизначений і дії м'язів обов'язково передаються на інші суглоби.

*Рухи в незамкнених ланцюгах* характеризуються відносною незалежністю ланок.

У *замкнених ланцюгах рухи* одних ланок впливають на рухи навіть віддалених ланок (допомагають або заважають). У замкнених ланцюгах можливостей рухів менше, але управління ними точніше, ніж в незамкнених.

У біокінематичних парах рухового апарату людини з'єднання двох ланок здійснюються таким чином, щоб створити лише наперед задані (визначені) рухи. Це забезпечується *ступенями свободи* окремих ланок і організму в цілому, що і визначає спрямованість руху.

Суттєвим є те, що кількість з'єднань ланок і кількість ступенів вільності живого організму набагато перевищує те, з чим має справу теорія механізмів і машин (тобто є більшою, ніж 1).

Кожен зв'язок, що накладається, *зменшує кількість ступенів вільності: зафіксувавши одну точку вільного тіла* зразу відбирають у нього 3 ступені вільності (можливих лінійних переміщень відносно основних трьох координатних осей); приклад: *шароподібний суглоб*, у якому зменшилася кількість ступенів вільності до трьох;

*закріплення двох точок тіла* відповідає фіксації його на осі, що проходить крізь ці точки – залишається одна ступінь вільності;

*закріплення трьох точок* повністю відбирає у тіла можливість руху; тому таке з'єднання до суглобів не відноситься.

До суглобів з трьома ступенями вільності відносяться *шароподібні суглоби (плечовий, тазостегновий)*, де можливі рухи у наступних напрямках:

- ✓ поворот;
- ✓ приведення і відведення у фронтальній площині;

✓ згинання та розгинання.

До суглобів з двома ступенями вільності відносяться: *колінний суглоб* (який припускає згинання і розгинання, а також деякий поворот голені відносно стегна), *зап'ястно-п'ясний суглоб великого пальця кисті руки* і деякі інші.

Суглобами з одним ступенем вільності є *плече, ліктьовий, міжфалангові суглоби пальців, сочленіння стопи з великою стегною кісткою*.

Розрахунок числа ступенів вільності кінематичного ланцюгу проводиться за наступною формулою:

$$N = 6n - \sum i P_i$$

де  $N$  – число ступенів вільності,  $n$  – кількість рухомих ланок кінематичного ланцюга,  $i$  – число обмежень ступенів вільності в з'єднаннях – суглобах,  $P_i$  – число з'єднань з  $i$ -обмеженнями, при цьому:  $\sum P_i = n - 1$ .

Загальна кількість ступенів вільності тіла людини складає близько:

$6 \cdot 144 - 5 \cdot 81 - 4 \cdot 33 - 3 \cdot 29 = 240$ , але з повною достовірністю точна кількість невідома.

Число ступеней вільності, наприклад, руки, можна розрахувати за цією залежністю:

$n = 18$ ,  $\sum f = 27$ ,  $\sum \lambda n (\lambda) = 35$ ,  $P_i = 1$  (знак  $\Sigma$  означає суму за усіма змінними).

Для відкритого біокінематичного ланцюга отримаємо:  $N = \sum f = 27 = 27$ .

У цій залежності  $n$  характеризує число рухомих сегментів: плече, передпліччя, зап'ястя, 1-5-п'ясні кістки, проксимальні та дистальні фаланги пальців кисті,  $\sum f$  – число ступенів вільності біокінематичних пар;  $\sum \lambda n (\lambda)$  – число сегментів, які мають  $\lambda$  з'єднань: плече має 2 суглоби; передпліччя, 1-5-п'ясні кістки і проксимальні фаланги пальців – також по 2. Дистальні фаланги пальців мають по 1 суглобу. Зап'ястя має 6 суглобів (променево-зап'ястний, зап'ястно-п'ясний 1-го і п'ясно-фалангові 2-5-го пальців).

З одного боку, устрій пасивного апарату людини (кістки, суглоби) створює невизначеність руху, а з іншого м'язи (їх управляючі рухи) накладають додаткові *ступені зв'язку* і залишають необхідну кількість ступенів вільності.

Так і забезпечується необхідна можливість рухів. Таким чином, **м'язи** – це той апарат, що забезпечує управління рухами і спрямовує рух у наперед заданому напрямку. Крім того, своєрідність процесів управління рухами людини зумовлена також особливостями м'язової системи, як системи двигунів, що перемагають зайві ступені вільності.

### 3 Характеристика 15-ланкової моделі тіла людини.

Опорно-руховий апарат людини містить біля 70 ланок. Але такого досконалого опису геометрії мас взагалі не потрібно.

Для розв'язку більшості практичних задач достатньо *15-ланкової моделі* тіла людини. У **15-ланковій моделі** (рис. 3) деякі ланки складаються з деяких елементарних ланок. Тому такі збільшені ланки мають назву *сегментів*.

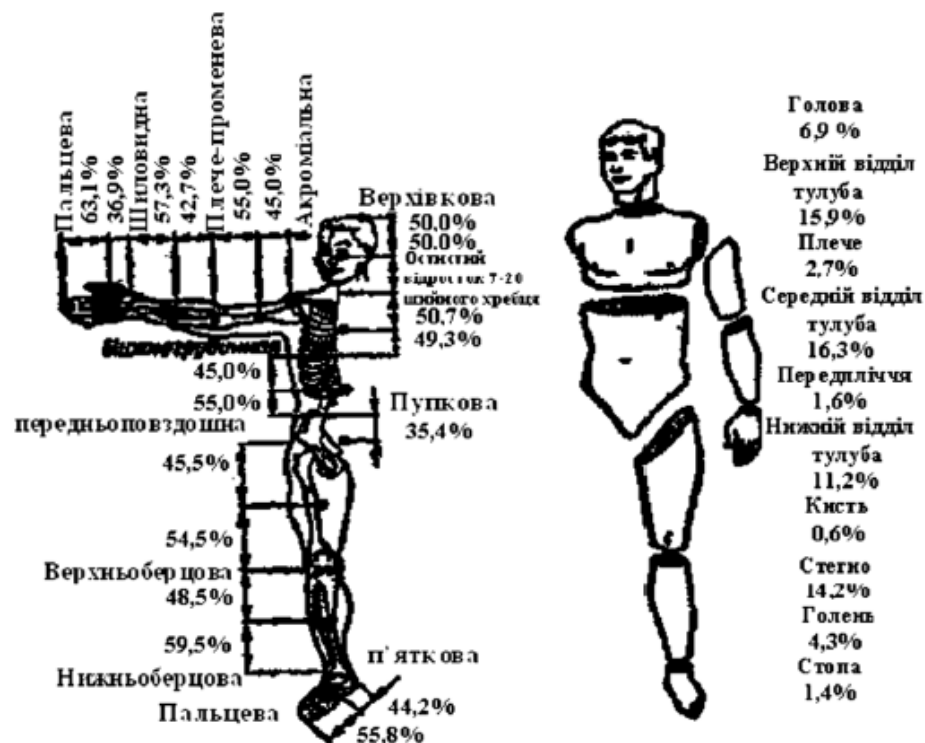


Рис. 3. 15-ланкова модель тіла людини (зліва – місця розташування ЦТ ланок, справа – відносні маси ланок опорно-рухового апарату людини)

Наведені на рисунку значення є вірними для «середньо статистичної людини», вони отримані шляхом усереднення результатів дослідження багатьох людей.

Індивідуальні особливості людини, і в, першу чергу, маса і довжина тіла, впливають на геометрію мас.

#### 4. Важіль як біомеханічна категорія.

Біомеханічні ланки являють собою своєрідні важелі і маятники.

Кістки, які з'єднані рухомо, утворюють основу біокінематичних ланцюгів.

Прикладені до них сили (м'язової тяги та інші) діють на ланки біокінематичних ланцюгів, *як важелі*. Це дозволяє передавати дію сили через ланки на відстані, а також змінювати ефект прикладених сил.

*Кісткові важелі*, які з'єднані рухомо у суглобах, можуть під дією прикладених сил зберігати положення і змінювати його.

**Усі сили, що прикладені до кісткової ланки як до важеля, можна поділити на групи:**

- *сили, які лежать у площині осі суглобу* (вони не можуть вплинути на рух навколо цієї осі);
- *сили, які мають складові, що лежать у площині, яка є перпендикулярною до осі важеля* (ці сили можуть вплинути на рух навколо цієї осі в двох прямо протилежних напрямках), тобто рухомі (направлені за рухом) і гальмівні (направлені протилежно до руху).

Рухи людини здійснюються за законами важелів.

*Важелі* – це окремі кісткові ланки людського тіла, наприклад, кістки плеча, передпліччя, стегнові кістки, кістки гомілок, стоп, голови, хребта.

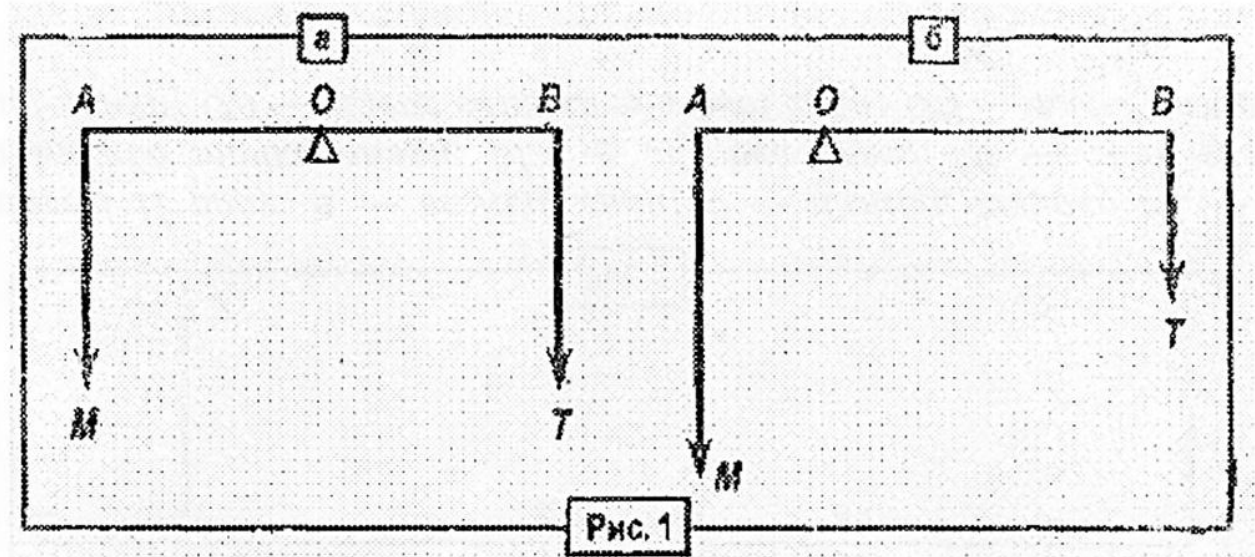
На кожному кістковому ланку звичайно діють *дві сили*:

- ✓ м'язова сила;
- ✓ сила ваги даної кісткової ланки.

*У залежності від місця прикладення сил стосовно точки опори важеля або осі обертання розрізняють:*

- «важелі рівноваги»,
- «важелі швидкості»;
- «важелі сили».

*Важіль I роду – «важіль рівноваги», це важіль у якого сили розташовані з обох сторін від точки опори (осі обертання) і спрямовані в одну сторону. Плечем важеля вважають перпендикуляр, опущений з точки опори важеля (осі обертання) на напрямок м'язової сили або ваги; плече важеля відповідає відстані від точки опори важеля до точки прикладення сил (рис. 4).*



**Рис. 4. Важелі I роду:**

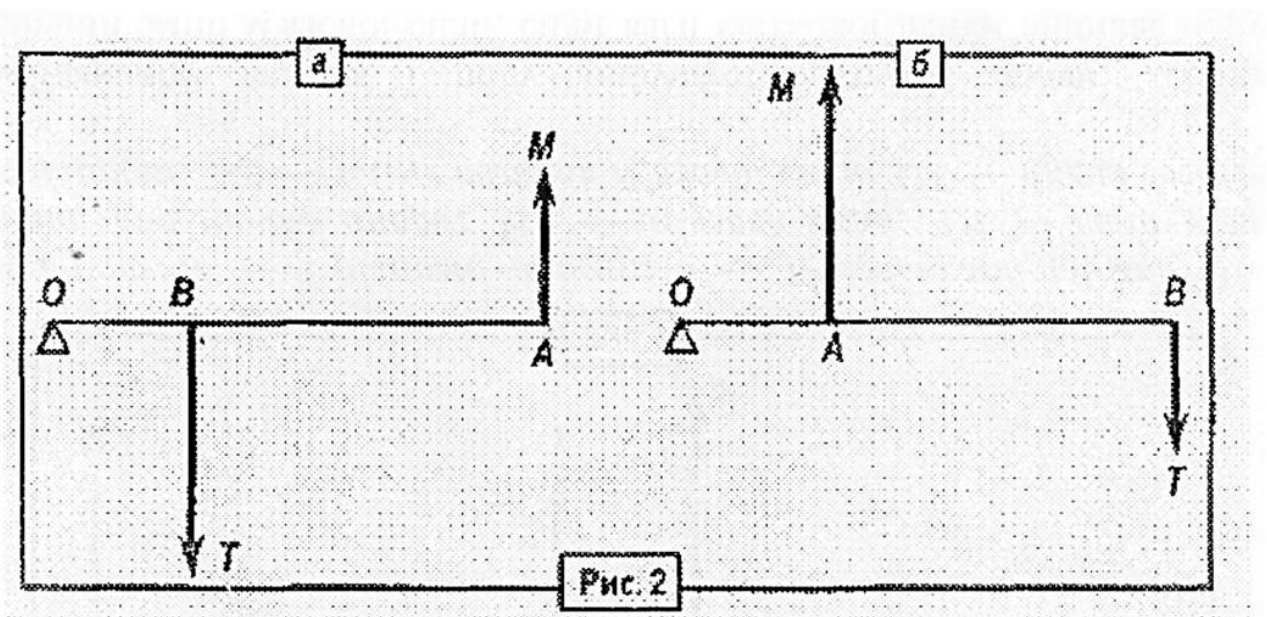
**а – з рівними плічми; б – з нерівними плічми**

**(O – вісь обертання, або точка опори; MA – м'язова сила; TB – сила ваги даної кісткової ланки; OA — плече важеля м'язової сили; OB — плече важеля сили ваги)**

*За законом важеля I роду відбуваються рухи голови, хребта.*

При асиметричній зміні м'язової сили, сили ваги кісткової ланки виникає порушенні рівноваги важеля, і це клінічно виявляється порушенням постави в сагітальній або фронтальній площині.

**Важелем II роду** називається такий важіль, у якого сили, прикладені до нього розташовані з одного боку від точки опори або осі обертання і спрямовані різні сторони. Цей важіль має два різновиди в залежності від того, яка сила (сила ваги і або м'язова) буде розташована ближче до точки опори (осі обертання). Якщо сила ваги знаходиться ближче до точки опори і плече її важеля менше плеча важеля м'язової сили, то такий важіль II роду називається «**важелем сили**» (рис. 5, а).



**Рис. 5. Важелі II роду:**

**а – важіль сили; б – важіль швидкості**

**(O – вісь обертання, або точка опори; MA – м'язова сила; TB – сила ваги даної кісткової ланки; OA — плече важеля м'язової сили; OB — плече важеля сили ваги)**

Якщо м'язова сила розташована ближче до точки опори і плече її важеля менше ніж плече важеля сили ваги, то такий важіль II роду називається «**важелем швидкості**» (рис. 5, б).

*Рухи кінцівок відбуваються переважно за законом важелів II роду.*

**Рух стопи** під час підйому навшпиньки є прикладом руху за законом «**важеля сили**». У цьому русі точкою опори служать головки плесневих кісток, сила ваги тіла проходить через кульшові суглоби, кісти стегна, гомілку, таранні кісти, і давить униз, а м'язи задньої поверхні гомілки протидіють силі ваги і прагнуть утримати тіло в стані рівноваги при його положенні стоячі на носках.

При цьому має місце рівність моментів обертання сили ваги і м'язової сили. Якщо м'язи, що розташовані по задній поверхні гомілки, слабкі, людина не в змозі утримуватися в рівновазі, стоячі на носках, оскільки момент обертання м'язової сили буде менше, ніж момент обертання сили ваги. У цьому випадку рівновага порушиться, і людина буде прагнути встати на повну ступню. Необхідні вправи для зміцнення м'язів, розташованих на задній поверхні гомілки, тобто м'язів-згиначів стопи (триглавий м'яз гомілки, підошовний м'яз, задній великогомілковий м'яз, довгий згинач пальців, довгий і короткий малоомілковий м'яз). Крім того, необхідно порадити пацієнтові зменшити масу тіла (схуднути, якщо вага його перевищує нормальні показники).

Прикладом руху за законом «*важеля швидкості*» служить згинання руки ліктьовому суглобі.

Знання законів важелів I та II роду допомагає правильно вибирати найбільш оптимальні вихідні положення (ВП) для виконання фізичних вправ.

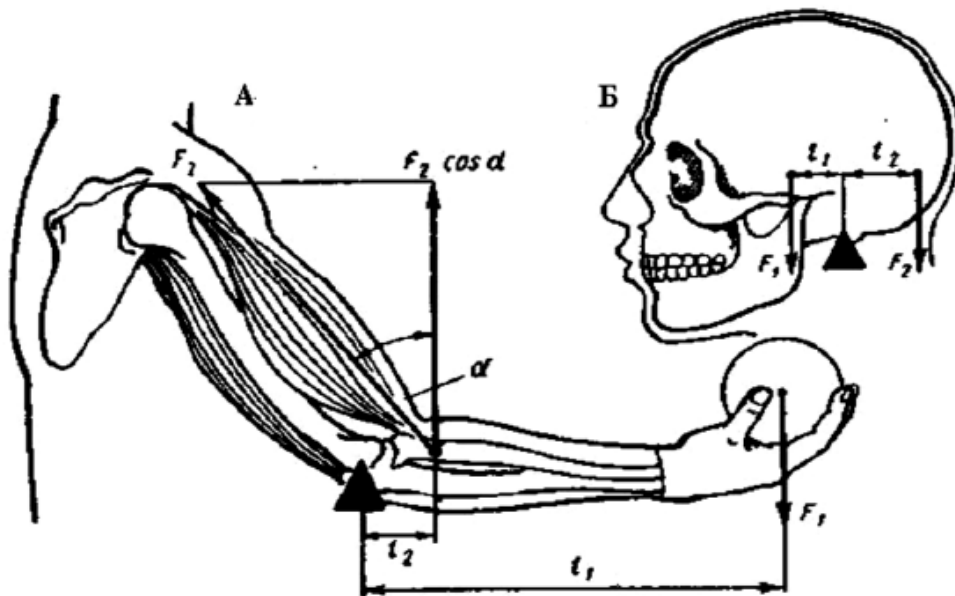


Рис. 6. Приклади важелів різного роду:  
А – передпліччя – важіль III роду, Б – голова – важіль I роду

**Умови збереження положення ланцюгів та їх рухів як важелів.**

Для *рівноваги важеля* необхідно рівність моментів прикладених сил протилежної дії відносно осі важеля; а для *прискорення важеля* – відповідно нерівність цих моментів сил.



В результаті дії протилежних сил ланка як важіль має можливість:

- ✓ зберігати положення або продовжувати рух з попередньою швидкістю;
- ✓ отримати прискорення у бік тієї чи іншої сили.

**Ефект сумісної дії сил залежить від співвідношення їх моментів.**

Якщо моменти обох сил рівні, то, або зберігається нерухоме положення важеля, або триває рух із швидкістю, наявною в момент зрівнювання обох моментів.

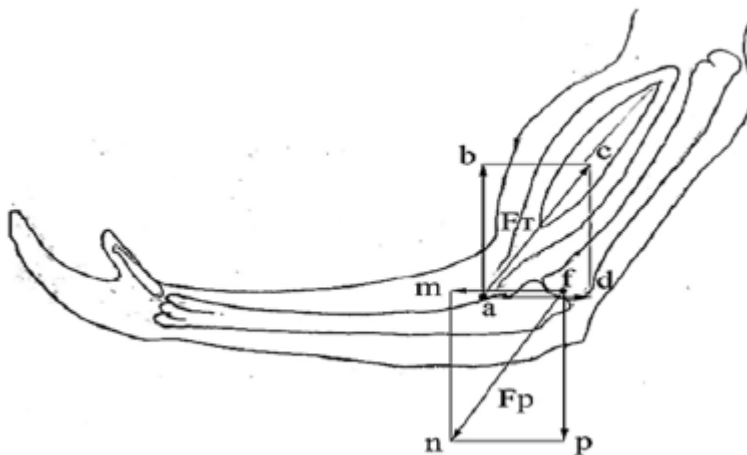
Коли момент однією з сил більше моменту іншої сили, виникає прискорення в той бік, куди спрямована сила більшого моменту. Якщо більше момент сили м'язової тяги, м'яз скорочується (долаюча робота) і плече важеля переміщується в її бік.

Якщо більше момент сили тяжіння, то м'яз розтягується (уступальна робота) і плече важеля переміщується в іншу сторону.

Отже, для приведення тіла (окремої ланки) до руху **потрібна пара сил**.

У суглобі пара сил утворюється **силою тяги м'язів і реактивною силою**, при чому остання утворюється внаслідок тиску однієї суглобної поверхні на іншу.

Розглянемо цю обставину на прикладі обертального руху при згинанні у ліктьовому суглобі (рис. 7).



**Рис. 7.** Схема дії пари сил при обертальному русі в суглобі ( $F_T$  – силу тяги двоголового;  $F_P$  – реактивна сила)

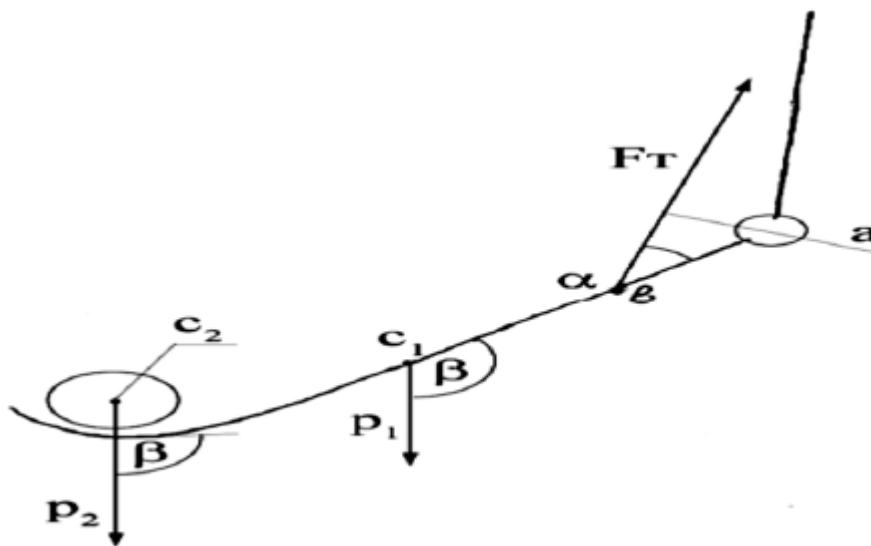
На рисунку 7 через  $FT$  – позначено силу тяги двоголового м'язу за променевою кістку. Ця сила розкладається на дві складові: обертальну силу ( $ab$ ) і силу тиску променевої кістки на плечову ( $ad$ ).

Сила  $FT$  при перенесенні своїм початком у точку прикладення  $f$ , являє собою тиск, який відбувається вздовж плечової кістки. Цій силі протидіє реактивна сила  $FP$ , яка може бути розкладена на сили  $fm$  і  $fp$ . Сила  $FT$  разом із силою  $FP$  утворює пару сил, що призводять до згинання у ліктьовому суглобі.

Якщо б реактивна сила була б відсутня, то замість згинання у ліктьовому суглобі відбулося б переміщення передпліччя за напрямком тяги двоголового м'язу.

Для визначення обертального моменту  $M(F)$ , величину м'язової сили (або іншої діючої сили, наприклад, сили тяжіння)  $F$  помножують на її плече  $d$  (перпендикуляр, який опущений з центру суглобу на лінію дії сили).

Розглянемо динамічну схему обертання в ліктьовому суглобі, де кості передпліччя утворюють важіль III роду (рис. 8).



**Рис. 8.** Динамічна схема обертального руху в ліктьовому суглобі

Припустимо, що плече займає вертикальне положення, а передпліччя зігнуто під деяким кутом.

Двохголовий м'яз тягне променевою кістку вгору.

Момент обертання двоголового м'язу дорівнює добутку сили  $FT$  на плече  $l=ab$  і  $\sin\alpha$ .

Двоголовий м'яз працює проти сили тяжіння – ваги передпліччя і кисті ( $P1$ ) і ваги тіла, яке лежить на кисті ( $P2$ ).

Обидва ці моменти спрямовані донизу і діють під однаковим кутом  $\beta$ .

Місцем прикладення сили  $P1$  є центр тяжіння системи «передпліччя – кисть» ( $C1$ ), тобто а місцем прикладення сили  $P1$  – центр тяжіння тіла ( $C2$ ).

Обертальні моменти цих сил у відношенні до ліктьового суглобу дорівнюють:

$$M(P1) = P1 \cdot l1 \cdot \sin\beta$$

$$M(P2) = P2 \cdot l2 \cdot \sin\beta$$

Для того, щоб м'яз утримував вантаж (**умова рівноваги**) необхідно, щоб момент сили м'яза і моменти сили тяжіння урівноважували один одного:

$$M(FT) = M(P1) + M(P2)$$

В цьому випадку м'яз **буде виконувати утримуючу роботу**.

У випадку:  $M(FT) > M(P1) + M(P2)$  у ліктьовому суглобі **відбувається згинання, а м'яз буде виконувати переможну роботу**.

У випадку:  $M(FT) < M(P1) + M(P2)$  у ліктьовому суглобі **відбувається розгинання, а м'яз буде виконувати уступальну роботу**.

Зрозуміло, що зі зміною положення частин тіла, тобто зі зміною кутів між ланками тіла, змінюється і плече сили тяжіння м'язів. Разом із цим, змінюються і механічні умови прояву м'язової сили. Якщо плече цієї сили підвищується, то механічні умови для роботи м'язів полегшуються. При скороченні м'язу кут його підходу до кістки збільшується, а отже, збільшується плече сили і обертальний момент, тобто сила тяги м'язу зменшується. Таким чином, механічні і фізіологічні умови прояву м'язової сили під час руху в суглобі, змінюються у протилежних напрямках.

## 6. «Золоте правило» механіки у рухах людини.

Важільний устрій рухового апарату дає людині можливість кидати тіла на великі відстані, виконувати сильні удари тощо. Але ми виграємо у швидкості і потужності руху ціною підвищення сили м'язового скорочення. Наприклад, для того, щоб згинати руку у ліктьовому суглобі, переміщувати тіло масою 1 кг (тобто із силою тяжіння 10 Н), двоголовий м'яз плеча повинен розвивати силу 100-200 Н.

Обмін сили на швидкість є тим більше вираженим, чим більшим є співвідношення плечей важеля.

***Робота, що здійснюється силою, прикладеної на одному плечі важеля, передається на інше плече.***

Сила тяги м'яза, прикладена на короткому плечі важеля, викликає у стільки разів більший зсув іншого плеча, у скільки перше плече коротше другого. У зв'язку з тим, що різні шляхи можна пройти за один і той же час, тут є вигреш у швидкості.

Сила, передана на довге плече важеля, як раз в стільки ж разів менше, ніж прикладена. Таким чином, вигреш у швидкості досягається за рахунок програшу в силі.

Майже всі м'язи в тілі людини прикріплюються біля суглобів (коротке плече важеля); це призводить до виграшу в шляху (а, отже, і в швидкості) при програті в силі.

При більшій частині положень кісткового важеля м'язові тяги спрямовані під гострим або тупим кутом до ланцюга (вздовж ланки), що сприяє непоправним втратам в силі м'язів (зменшується обертальна тяга). Нормальна ж (прихована) тяга в цьому випадку сприяє зміцненню суглоба, через який переходить м'яз.

При великих навантаженнях напружуються всі м'язи, що оточують суглоб, в тому числі і антагоністи. При цьому різко зростають втрати в

сумарній тязі м'язів; в той же час досягається і позитивний ефект – зміцнення навантаженого суглоба.

У зв'язку з особливостями прикладання м'язових тяг до кісткових важелів необхідні значні напруження м'язів для виконання не тільки силових, а й швидкісних рухів.

***Вхідні в біокінематичні ланцюга ланки тіла утворюють системи складових важелів, в яких «золоте правило» механіки проявляється набагато складніше, ніж в простих одиночних важелях.***

Через те, що м'язи, в більшості випадків, прикріплюються недалеко від суглобу, то плече сили тяги м'язу є коротким. У зв'язку з цим ***м'язи, які діють на кісткові важелі, майже завжди дають виграти у швидкості, програючи у силі («золоте правило» механіки у рухах людини).***

***Виділяють дві причини програшу в силі:***

- прикріплення м'язу поблизу суглобу (невелике плече сили);
- тяга м'язу вздовж кістки під дуже гострим (або тупим) кутом (це також зумовлює невелике плече сили).

Можна вказати і на третю причину втрат у силі м'язів: при великих навантаженнях навантажуються усі м'язи, які оточують суглоб (через ланковий механізм).

Крім того, є м'язи-антагоністи, які створюють моменти сил, котрі спрямовані протилежно, через що ці м'язи корисної роботи не виконують, а енергію витрачають. Але все одно в цьому є і ***позитивний зміст***: хоча і виникають втрати енергії, суглоб під час великих навантажень отримує підкріплення напругою м'язів, які його оточують.

Таким чином, у зв'язку з особливостями прикладання м'язових тяг до кісткових важелів, виникають значні напруження м'язів при швидкісних і силових рухах. Виграш у силі і підкріплення суглобів потребують значного розвитку сили м'язів.

## 7. Механічні властивості кісток і суглобів.

Механічні властивості кісток визначаються їхніми різноманітними функціями. Крім рухової, вони виконують захисну й опорну функції. Кістки черепа, грудної клітки й таза захищають внутрішні органи. Опорну функцію виконують кістки кінцівок і хребта.

Кістки ніг і рук довгасті та трубчасті. Трубчаста будова кістки забезпечує протидію значним навантаженням і разом з тим у 2-2,5 рази знижує їх масу та суттєво зменшує моменти інерції.

***Розрізняють чотири види механічного впливу на кістку:***

- ✓ розтягування,
- ✓ стискання,
- ✓ вигинання,
- ✓ скручування.

Механічні властивості суглобів залежать від їхньої будови. Суглобова поверхня зволожується синовіальною рідиною, яка сприяє зменшенню коефіцієнта тертя в суглобі приблизно в 20 разів.

Міцність суглобів, як і міцність кістки, небезмежна. Так, тиск у суглобному хрящі не повинен перевищувати  $350 \text{ Н} \cdot \text{см}^{-2}$ . При більш високому тиску припиняється змащення суглобного хряща і зростає небезпека його механічного стирання. Це потрібно враховувати особливо при проведенні туристичних походів (коли людина несе важкий вантаж) і при організації оздоровчих занять з людьми середнього та літнього віку.

## 8. Біомеханічні властивості м'язів.

Біомеханічними властивостями м'язів є скоротливість, пружність, твердість, міцність і релаксація.

***Скоротливість*** – це здатність м'яза скорочуватися при збудженні. У результаті скорочення відбувається укорочення м'яза і виникає сила тяги.

**Пружні властивості м'яза** – це здатність м'яза відновлювати первісну довжину після усунення деформуючої сили.

**Твердість** – це здатність протидіяти силам, що прикладаються.

**Міцність м'яза** оцінюється величиною сили, яка його розтягує, при якій відбувається розрив м'яза.

**Релаксація** – властивість м'яза, що виявляється в поступовому зменшенні сили тяги при постійній довжині м'яза.

## 9. Форми, типи та режими м'язових скорочень

В залежності від характеру зміни довжини м'яза, що скорочується, розрізняють форми м'язового скорочення:

- динамічну;
- статичну;
- ауксотонічну.

**Динамічним** називається скорочення м'яза, яке викликає зміну його довжини. Таке скорочення лежить в основі динамічної роботи.

Динамічні скорочення бувають **двох типів**:

- ✓ концентричні;
- ✓ ексцентричні.

Коли зовнішнє навантаження менше, ніж напруження м'яза, що скорочується, м'яз, скорочуючись, вкорочується, викликаючи рух, це **концентричний тип скорочення**. Якщо ж скорочення м'яза здійснюється при сталому напруженні, то його називають **ізотонічним** (ізо - рівний, тонус - напруження).

Якщо зовнішнє навантаження більше, ніж напруження м'яза під час скорочення говорять про **ексцентричний або міометричний тип скорочення**. Такий м'яз розтягується в час скорочення. В природних умовах даний тип скорочення може спостерігатися при роботі м'язів в уступаючому режимі

(опускання вантажу, робота м'язів-розгиначів в час скорочення м'язів-згиначів).

Динамічні вправи, які лежать в основі динамічної роботи, мають фізичне вираження (кгм, Вт, Дж, ккал), для них може бути визначений коефіцієнт корисної дії.

Скорочення м'язів, при яких вони розвивають напруження, але не змінюють своєї довжини, називають *статичними*. Такі скорочення забезпечують підтримання тіла в просторі, вони направлені на протидію земному тяжінню і сприяють збереженню відповідної пози тіла.

Підтримання природної пози спортсмена здійснюється енергоекономічними, маловтомлюваними тонічними напруженнями м'язів.

Більшість же статичних вправ (положень, поз), які зустрічаються у спортивній практиці, пов'язані з тетанічними напруженнями м'язів.

Скорочення, при яких змінюється довжина і напруження м'язів, називають *ауксотонічним*. Така форма скорочень м'язів зустрічається найчастіше, адже в реальних умовах діяльності людини чисто ізометричні і чисто ізотонічні скорочення практично не зустрічаються. Узагальнена характеристика форм і типів м'язових скорочень подана в табл. 1.

Таблиця 1

### Характеристика форм і типів м'язових скорочень.

Форми скорочення м'язів	Тип скорочення	Зовнішнє навантаження	Зовнішня робота
1. Динамічна	концентричний (ізотонічний)	менше, ніж напруження м'язів	позитивна
	ексцентричний	більше, ніж напруження м'язів	негативна
2. Статична	ізометричний	дорівнює напруженню м'язів	рівна нулю



У відповідності з типом скорочення м'язів, які забезпечують виконання даної вправи, усі фізичні вправи поділяються на статичні та динамічні. Відповідно і будь-яка фізична робота в крайніх значеннях може бути динамічною і статичною. Частіше статична робота є тимчасовим елементом в одному з циклів динамічної роботи.

При динамічному скороченні виконується зовнішня робота: при *концентричному скороченні - позитивна*, при *ексцентричному - негативна*.

Співвідношення вираженості динамічних і статичних скорочень у виконанні даної вправи дозволяє умовно поділити їх на *долаючі* (підняття вантажу), *підтримуючі* (утримання вантажу) та *уступаючі* (опускання вантажу).

*Долаючі вправи* характеризуються концентричним (ізотонічним) скороченням м'язів внаслідок їх вкорочення.

*Уступаючі скорочення* - ексцентричні. В них зовнішня сила, яка діє на м'язи, більша за силу, яку розвиває працюючий м'яз.

З долаючими та уступаючими вправами пов'язана уява про позитивну та негативну роботу.

### **Режими скорочення м'язових волокон.**

В залежності від частоти імпульсації мотонейрона м'язові волокна рухової одиниці (РО) можуть працювати в двох режимах:

- в режимі поодинокого скорочення;
- в режимі тетанічного скорочення.

*Режим поодиноких скорочень* виникає тоді, коли інтервал між суміжними імпульсами мотонейрона дорівнює або дещо більшій тривалості поодинокого скорочення іннервованих ним м'язових волокон.

В кривій поодинокого ізометричного скорочення м'яза виділяють три фази:

- 1) латентний (прихований) період збудження,

- 2) фаза підйому напруження
- 3) фаза розслаблення.

При ізотонічному скороченні ці фази позначаються дещо інакше:

- 1) латентний період збудження,
- 2) фаза вкорочення,
- 3) фаза видовження.

**Тонічне напруження м'язів.** Здатність скелетної мускулатури тривало, стійко підтримувати скорочення (напруження) називається *тонусом, або тонічним напруженням.*

Тонус м'язів має рефлекторне походження.

Його виникнення і підтримання зумовлене наявністю в м'язах тонічно напружених рухових одиниць, які постійно контролюються нервовими центрами. В свою чергу, тонус нервових центрів підтримується по зворотних зв'язках аферентними імпульсами, що йдуть від пропріорецепторів.

М'язовий тонус є основою підтримання необхідної пози тіла в умовах постійної дії сил земного тяжіння.

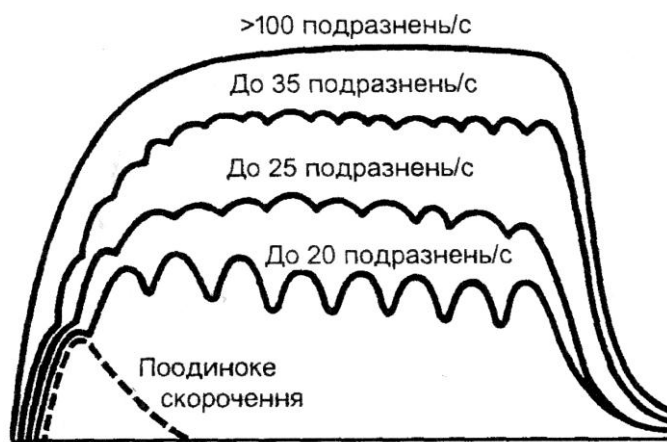
**Тетанічне скорочення м'язів.** При руховій діяльності звичайно до м'язових волокон надходить серія наступних нервових імпульсів, які викликають тривале тетанічне скорочення м'язів – *тетанус*. Тетанічні скорочення властиві тільки скелетним м'язам і не характерні для гладеньких м'язів внутрішніх органів та поперечносмугастих м'язів серця, що пояснюється тривалим рефрактивним періодом.

Тетанічні скорочення, в порівнянні з поодинокими, більш тривалі та сильні.

Тетанус викликається сумациєю поодиноких м'язових скорочень, коли повторний нервовий імпульс надходить до м'яза раніше, ніж повністю завершиться його поодиноке скорочення. За таких умов відбувається накладання однієї хвили поодиноких скорочень на другу (явище *суперпозиції*). Якщо ж кожний наступний імпульс надходить до м'яза в той момент, коли він починає розслаблюватись, то виникає *зубчастий неповний тетанус*, якщо ж

повторний імпульс приходить в період його скорочення - виникає **суцільний (повний) або гладенький тетанус**.

**Суцільний тетанус** дає більш сильне скорочення, ніж зубчастий тетанус. Частота імпульсів, яка необхідна для виникнення тетанусу, обернено пропорційна швидкості поодиноких скорочень. Для виникнення суцільного



тетанусу в повільних РО достатня частота імпульсів 25 за 1 с, а для швидких РО-50 імпульсів за 1 с і більше.

**Рис. 9. Формування тетануса в залежності від частоти подразнення.**

**Контрактура.** Поряд з тетанічним скорочення м'язів зустрічається ще одна різновидність тривалого скорочення м'язів - контрактура.

**Контрактура** – це локальне і сильне тривале скорочення м'язових волокон. Воно характеризується стійким напруження (стягуванням) м'яза з сильно сповільненим розслабленням.

**Контрактура буває:**

- *природженою* (природжені різке обмеження рухомості внаслідок недорозвинутості м'язів і суглобів);
- *набутою* (виникають при порушеннях функцій нервової системи, а також в умовах дії надмірного за силою больового або температурного подразника. Професійні контрактури зумовлені тривалою активністю тих груп м'язів, які інтенсивно використовуються в даній професії).

Контрактура при стомленні характеризується збільшенням тривалості періоду скорочення та розслаблення м'язів. В даному випадку вона зумовлені змінами обміну речовин у м'язах.

### Питання для самоконтролю

1. У чому полягають основні особливості опорно-рухового апарату людини та його відмінності від звичайних механізмів? Відповідь обґрунтуйте.
2. Охарактеризуйте механічні властивості суглобів. Яке максимально припустиме навантаження на суглоби?
3. Що таке біомеханічна ланка, біокінематична пара, біокінематичний ланцюг?
4. Охарактеризуйте основні принципи моделювання тіла людини як біомеханічної системи. Поясніть, чому м'язову систему вважають системою двигунів, що перемагають зайві ступені вільності рухів?
5. Поясніть, від чого залежить рухомість тієї чи іншої ланки тіла людини. Скільки ступенів свободи має: плечовий суглоб, колінний суглоб, ліктьовий суглоб, зап'ястно-п'ясний суглоб?
6. Наведіть приклади ланок тіла людини, як важелів I, II, III роду.
7. Наведіть умову рівноваги ланок тіла як важелів.
8. Поясніть, у чому суть «золотого правила» біомеханіки. Які причини програшу в силі м'язів людини і які біомеханічні основи необхідності розвитку сили м'язів? Назвіть біомеханічні якості м'язів.
9. Поясніть, чим обумовлені механічні властивості кісток і суглобів.