

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра механічної та біомедичної інженерії

С.П. Панченко

БІОМЕХАНІКА

Конспект лекцій для здобувачів ступеня бакалавра
спеціальності 132 Матеріалознавство

Дніпро
НТУ «ДП»
2022

Панченко С.П.

Біомеханіка. Конспект лекцій для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 132 Матеріалознавство / С.П. Панченко; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2022. – 73 с.

Автор:

С.П. Панченко, канд. техн. наук, доц.

Погоджено рішенням науково-методичної комісії спеціальності 132 Матеріалознавство (протокол № 3 від 19.12.2022) за поданням кафедри механічної та біомедичної інженерії (протокол № 9 від 30.11.2022).

Конспект лекцій складається з трьох розділів. В розділі «Біомеханіка як наука» показуються особливості наукових досліджень в біомеханіці, дається визначення поняття «біомеханіка», наводяться історичні відомості та напрямки розвитку цієї науки. Розділ «Основи біомеханічного аналізу» присвячено опису основних біомеханічних характеристик, їх особливостям та вимірюванню. В розділі «Біомеханіка опорно-рухового апарату» розглядаються особливості біомеханіки складових опорно-рухового апарату людини (кістки, м'язи, зв'язки і т.д.).

Відповідальний за випуск завідувач кафедри механічної та біомедичної інженерії, д-р техн. наук, доц. Д.Л. Колосов.

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ | 4 |
| Розділ 1. Біомеханіка як наука | 5 |
| 1.1. Визначення та історія біомеханіки | 6 |
| 1.2. Особливості біомеханіки | 9 |
| 1.3. Напрямки розвитку біомеханіки | 18 |
| Питання для самоконтролю | 19 |
| Розділ 2. Основи біомеханічного аналізу | 20 |
| 2.1. Біомеханічні характеристики тіла людини | 21 |
| 2.2. Сили в біомеханіці | 29 |
| 2.3. Кінематичні характеристики руху | 37 |
| 2.4. Енергетичні характеристики в біомеханіці | 43 |
| 2.5. Особливості вимірювання біомеханічних характеристик | 46 |
| Питання для самоконтролю | 58 |
| Розділ 3. Біомеханіка опорно-рухового апарату | 59 |
| 3.1. Особливості біомеханіки опорно-рухового апарату людини | 59 |
| 3.2. Біомеханіка м'язів, зв'язок і сухожилць | 63 |
| 3.3. Біомеханічні особливості м'язового скорочення | 68 |
| Питання для самоконтролю | 71 |
| Використані джерела інформації | 72 |

Вступ

Закони природи спрадавна цікавлять людину, але лише в останні століття громадського розвитку сформувалася наука, що представляє систему знань про закони природи і людину. Умовно наука розділена на окремі дисципліни за ознакою вивчення в них основної форми руху матерії. Не дивлячись на кількісні і якісні відмінності між формами руху матерії, вони пов'язані між собою і в спостережуваних в природі процесах можуть переходити одна в іншу.

Найбільш простою з них є механічна форма руху, під якою розуміють зміну в часі положення одних матеріальних тіл відносно інших або зміну положення частин тіла.

Механічні явища і моделі виявляються дуже плідними при вивченні законів природи і сприяють поясненню нових досягнень науки в різних галузях знань, де природно реалізуються сучасні підходи до наукового пізнання, у зв'язку з переважно математичним моделюванням механічних і біологічних процесів.

Біомеханіка - це дисципліна, що вивчає механічні форми руху біологічних систем, тіл або їх частин.

Біомеханіка включає: загальні закони і основні поняття класичної механіки, опис структур і функцій окремих частин і цілісного організму, способи моделювання і теорії, що пояснюють складні біологічні процеси для основних механізмів контролю, вимірів і управління механічними рухами. Розглядаються закони перетворення енергії при простих механічних переміщеннях і складних формах руху біологічних тіл.

Фундаментальне значення біомеханіки для розвитку природознавства, фізичної культури і спорту, космонавтики, медицини добре відомо і пов'язано з тим, що її закони і способи моделювання широко використовуються в практичних розробках для кожного з цих напрямів науки.

Розділ 1. Біомеханіка як наука

Біологічну механіку сьогодні визначають як науку, що вивчає закономірності руху та деформування різних біологічних структур та тканин під дією факторів навколишнього середовища.

Проблеми, які вирішуються біомеханікою, важливі одночасно і для технічних, і для медико-біологічних наук. Це пов'язано з тим, що у процесі еволюції виникли біологічні системи, оптимальні за конструкцією щодо виконуваних ними фізіологічних функцій, та властивостей матеріалів, які визначають їх механічну поведінку. Тому лише вивчення будови та механічних властивостей різних біологічних тканин може дозволити створити матеріали (зазвичай це композити), найбільш придатні для заміщення уражених природних структур.

Розуміння суті механічних явищ, які виникають у живих системах, відкриває можливість відпрацювати нові підходи до лікування певних, насамперед ортопедичних захворювань.

Людина та будь-які інші біологічні об'єкти, будучи частиною матеріального світу, природно, підкоряються законам механіки та фізики. Разом з тим, на відміну від технічних систем, живі структури мають ряд особливостей, які слід мати на увазі, обговорюючи їхню механічну поведінку. Насамперед їм характерна здатність до самовідновлення. Її слід враховувати, визначаючи діапазони змін, які можна розглядати як оборотні.

Ще однією важливою відмінністю є здатність живих систем адаптуватися до тривалих чи багаторазових впливів зовнішніх факторів шляхом функціональної та морфологічної перебудови окремих структур.

При розгляді механічної поведінки живих об'єктів необхідно також брати до уваги активний характер їхньої реакції на зовнішні впливи, що може бути як позитивним, так і негативним фактором. Крім того, часто «віддалені» (як за місцем, так і за часом) результати впливу можуть виявитися більшими, ніж безпосередні локальні прояви.

Основу біомеханіки становлять такі науки як: математика, анатомія, фізика, фізіологія та деякі інші.

В результаті вивчення розділу 1 студенти повинні опанувати результати навчання:

ПРН29.1- С3 Знати і розуміти основні терміни і визначення дисципліни

ПРН29.2- С3 Знати основні сучасні досягнення в біомеханіці опорно-рухового апарату людини

1.1. Визначення та історія біомеханіки

Термін “біомеханіка” складається з двох грецьких слів: *bios* – життя і *mechanics* – засіб (зброя). У широкому науковому плані біомеханіка вивчає просторові рухи біологічних макро- та мікрооб’єктів. Незважаючи на те що біомеханіка вивчає переважно механічні форми рухів, вона не може не враховувати біологічні (насамперед анатомічні та фізіологічні) особливості об’єкта, котрий рухається (людина або тварина).

Загальна біомеханіка біологічних об’єктів (зокрема людини) вивчає загальні закономірності будови їхніх рухових систем, органів та їх рухів. Окремий напрям біомеханіки має забезпечити конкретні галузі рухової діяльності людини (біомеханіка трудових процесів, ергономічна біомеханіка, медична і клінічна біомеханіка, біомеханіка військової справи та космонавтики, біомеханіка рухової реабілітації та кінезитерапії, біомеханіка фізичного виховання та спорту тощо).

В існуючій сучасній системі наукових знань біомеханіці відводиться важливе місце. Фахівці сьогодні відносять її до найбільш значущих наук ХХІ століття. З цього погляду біомеханіка – галузь природничих наук, що на основі ідей та методів механіки вивчає фізичні якості біологічних об’єктів, закономірності їх адаптації до навколишнього середовища, поведінку (навчання) та механічні рухи у них на всіх рівнях організації і в різних станах (включаючи періоди розвитку та згасання, а також при патологіях).

Завданням біомеханіки є застосування результатів подібних досліджень для подальшого розвитку біології, фізики (механіки), професійної рухової дидактики (педагогіки), ергономіки, психомоторики, медицини, фізичної культури та спорту.

Біомеханіка - одна з найстаріших гілок біології. Її витоками були роботи Аристотеля та Галена, присвячені аналізу рухів тварин та людини. Але тільки завдяки роботам одного з найблискупіших людей епохи Відродження — Леонардо да Вінчі (1452—1519) — зробила біомеханіка свій наступний крок. Леонардо особливо цікавився будовою людського тіла (анатомією) у зв'язку з рухом. Він описав механіку тіла при переході зі становища сидячи до положення стоячи, при ходьбі вгору і вниз, при стрибках і, мабуть, вперше дав опис ходи.

Р. Декарт (1596-1650) створив основу рефлекторної теорії, показавши, що причиною рухів може бути конкретний фактор довкілля, що впливає на органи почуттів. Цим пояснювалося походження мимовільних рухів.

Надалі великий вплив в розвитку біомеханіки надав італієць Д. Бореллі (1608—1679) — лікар, математик, фізик. У своїй книзі «Про рух тварин» по суті він започаткував біомеханіку як галузі науки. Він розглядав організм людини як машину та прагнув пояснити дихання, рух крові та роботу м'язів з позицій механіки.

Перші кроки у докладному вивченні біомеханіки рухів були зроблені лише наприкінці ХІХ століття німецькими вченими Брауном та Фішером (V. Braune, O. Fischer), які розробили досконалу методику реєстрації рухів,

детально вивчили динамічну сторону переміщень кінцівок та загального центру ваги (ЗЦВ) людини при нормальній ходьбі.

К.Х. Кекчеєв (1923) вивчав біомеханіку патологічних ходів, використовуючи методику Брауна та Фішера.

П.Ф. Лесгафт (1837-1909) створена біомеханіка фізичних вправ, розроблена на основі динамічної анатомії. У 1877 р. П.Ф. Лесгафт почав читати лекції з цього предмета на курсах з фізичного виховання. В Інституті фізичної освіти ім. П.Ф. Лесгафта цей курс входив у предмет «фізична освіта», а 1927 р. був виділений у самостійний предмет під назвою «теорія руху» і в 1931 р. перейменованій на курс «Біомеханіка фізичних вправ».

Великий внесок у пізнання взаємодії рівнів регуляції рухів зробив Н.А. Бернштейн (1880-1968). Їм надано теоретичне обґрунтування процесів управління рухами з позицій загальної теорії великих систем. Дослідження Н.А. Бернштейна дозволили встановити надзвичайно важливий принцип управління рухами, загально визнаний нині. Нейрофізіологічні концепції Н.А. Бернштейна послужили основою формування сучасної теорії біомеханіки рухів людини.

Ідеї Н.М. Сеченова про рефлекторну природу управління рухами шляхом використання чутливих сигналів, що отримали розвиток у теорії Н.А. Бернштейна про кільцевий характер процесів управління.

В.С. Гурфінкель та інших. (1965) клінічно підтвердили цей напрям, виявили принцип синергії у створенні роботи скелетної мускулатури при регуляції вертикальної пози, а Ф.А. Северин та ін. (1967) отримали дані про спінальні генератори (мотонейрони) локомоторних рухів. R. Granit (1955) з позиції нейрофізіології дав аналіз механізмів регулювання рухів.

R. Granit (1973) зазначив, що організація відповідей на виході в кінцевому рахунку визначається механічними властивостями рухових (моторних) одиниць (РО) та специфічною ієрархією процесів активації - включенням повільних або швидких РО, тонічних або фазічних мотонейронів, альфа-моторного або альфа- гамма-контролю.

Великий внесок у біомеханіку спорту зробили R.G. Osterhoud (1968); T. Duck (1970), R.M. Brown; J.E. Counsilman (1971); S. Pla-genhoef (1971); C.W. Buchan (1971); Dal Monte та ін. al. (1973); M. Saito та ін. (1974) та багато інших.

В Україні вивчення координації рухів людини ведеться з двадцятих років ХХ століття. Проводилися дослідження всієї біомеханічної картини координаційної структури довільних рухів людини з метою встановлення загальних закономірностей, що визначають як центральну регуляцію, так і діяльність м'язової периферії в цьому найважливішому життєвому процесі. З тридцятих років ХХ століття в інститутах фізкультури в Москві (Н.А. Бернштейн), у Ленінграді (Є.А. Котікова, Є.Г. Котельникова), у Тбілісі (Л.В. Чаїдзе), у Харкові (Д.Д. Донською) та інших містах стала розвиватися наукова робота з біомеханіки. У 1939 р. вийшов навчальний посібник Є.А. Котикової «Біомеханіка фізичних вправ» та в наступні роки до підручників і

навчальних посібників став входити розділ «Біомеханічне обґрунтування спортивної техніки з різних видів спорту».

З біологічних наук у біомеханіці найбільше використовувалися наукові дані з анатомії та фізіології. У наступні роки великий вплив на становлення та розвиток біомеханіки як науки надали динамічна анатомія, фізика та фізіологія, особливо вчення про нервизм І.П. Павлова та про функціональні системи П.К. Анохіна.

Великий внесок у вивчення фізіології рухового апарату зробив Н.Є. Введенський (1852-1922). Їм виконані дослідження процесів збудження та гальмування в нервовій та м'язовій тканинах. Його роботи про фізіологічну лабільність живих тканин та збудливих систем, про парабіоз мають велике значення для сучасної фізіології спорту. Велику цінність становлять також його роботи щодо координації рухів.

За визначенням А.А. Ухтомського (1875-1942), біомеханіка досліджує «як отримана механічна енергія руху і напруги може придбати робоче застосування». Їм показано, що сила м'язів за інших рівних умов залежить від поперечного перерізу. Чим більший поперечний переріз м'яза, тим більше він може підняти вантаж. А.А. Ухтомський відкрив найважливіше фізіологічне явище — домінанту у діяльності нервових центрів, зокрема за рухових актів. Велике місце в його роботах відведено питанням фізіології рухового апарату.

Питання фізіології спорту розробляв О.М. Хрестовників (1885-1955). Вони пов'язані з з'ясуванням механізму м'язової діяльності, зокрема, координації рухів, формування рухових умовних рефлексів, етіології втоми при фізичній діяльності та іншими фізіологічними функціями під час виконання фізичних вправ.

М.Ф. Іваницький (1895—1969) розробив функціональну (динамічну) анатомію стосовно завдань фізкультури та спорту, тобто визначив зв'язок анатомії з фізкультурою.

Успіхи сучасної фізіології, і, насамперед, праці академіка П. К. Анохіна дали з позиції функціональних систем по-новому подивитись біомеханіку рухів.

Все це дало можливість узагальнити фізіологічні дані з біомеханічними дослідженнями та підійти до вирішення важливих питань біомеханіки рухів у сучасному спорті, спорті найвищих досягнень.

У середині ХХ століття вчені створили протез руки, керований електричними сигналами, що надходять із нервової системи. У 1957 р. у нас в країні була сконструйована модель руки (пензля), яка виконувала біоелектричні команди типу «стиснути-розтиснути», а в 1964 р. створено протез із зворотним зв'язком, тобто протез, від якого безперервно надходить до ЦНС інформація про силу стиснення або розтискання пензля, про напрям руху руки і тому подібні ознаки.

Американські фахівці (E.W. Schrader та ін., 1964) створили протез ноги, ампутованої вище коліна. Була виготовлена гідравлічна модель колінного суглоба, що дозволяє досягти природної ходьби. Конструкція передбачає

нормальну висоту підйому п'яти та витягування ноги при її відведенні незалежно від швидкості ходьби.

Бурхливий розвиток спорту СРСР послужило основою розвитку біомеханіки спорту. З 1958 р. у всіх інститутах фізичної культури біомеханіка стала обов'язковою навчальною дисципліною, створювалися кафедри біомеханіки, розроблялися програми, видавалися навчальні посібники, підручники, проводились науково-методичні конференції, готувалися спеціалісти.

Як учбовий предмет біомеханіка виконує кілька ролей. По-перше, з її допомогою студент вводиться в коло найважливіших фізико-математичних понять, які необхідні для розрахунків швидкості, кутів відштовхування, маси тіла, розташування ЗЦВ та його ролі у техніці виконання спортивних рухів. По-друге, ця дисципліна має самостійне застосування у спортивній практиці, тому що представлена в ній система рухової діяльності з урахуванням віку, статі, маси тіла, статури дозволяє виробити рекомендації для роботи тренера, вчителя фізкультури, методиста лікувальної фізкультури та ін.

Біомеханічні дослідження дозволили створити новий тип взуття, спортивного інвентарю, обладнання та техніки управління ними (велосипеди, гірські та стрибкові лижі, гоночні лижі, човни для веслування та багато іншого).

Вивчення гідродинамічних характеристик риб та дельфінів дало можливість створити спеціальні костюми для плавців, змінити техніку плавання, що сприяло підвищенню швидкості плавання.

Біомеханіку викладають у вищих фізкультурних навчальних закладах у багатьох країнах світу. Створено міжнародне товариство біомеханіків, проводяться конференції, симпозіуми, конгреси з біомеханіки. Створено наукові Ради з питань проблем біомеханіки з секціями, що охоплюють проблеми інженерної, медичної та спортивної біомеханіки.

1.2. Особливості біомеханіки

Рухи живих систем і рухи механізмів істотно відрізняються, тому між класичною механікою та біомеханікою існує низка відмінностей:

1. Хоча кінцевою метою фізичних вправ є звичайний механічний рух, він реалізується завдяки вищим формам руху матерії: хімічній, біологічній і соціальній. Наприклад, для гри у футбол кінцевою метою команд є просте механічне переміщення м'яча у ворота суперника, проте воно здійснюється завдяки високо організованим хімічній, біологічній та соціальній формам руху матерії.

2. Більшість явищ у живих системах не можна розглядати, як наслідок прямої дії законів класичної механіки (такий підхід називають механіцизмом), бо ці явища є наслідками взаємодії елементів багаторівневих складних самокерованих та автономних систем. Так, наприклад, м'яз людини не зможе скорочуватись та імітувати різні механічні характеристики, якщо

його ізолювати (відокремити) від системи кровообігу та ЦНС. Видима нам механічна поведінка живого м'яза є результатом керуючого впливу нервової системи.

3. Подібність між руховою діяльністю людини і тварин спостерігається лише на біологічному рівні, так як рухові дії тварин є рефлекторними, а рухова діяльність людини – цілеспрямовані, усвідомлені та довільні. Живі системи є самокерованими та автономними. Під дією зовнішніх і внутрішніх впливів жива система сама керує своїми діями, що не притаманне неживим механізмам. Рух окремих частин тіла поєднаний керуючою дією з боку ЦНС в цілісні рухові акти - системи рухів. Кожен рух виконує свою роль у цілісності дії, так чи інакше відповідає її меті. Для виконання конкретних рухових завдань людина спочатку свідомо ставить перед собою відповідну мету, обирає оптимальний варіант поведінки, а вже потім розпочинається керування потрібними функціональними м'язовими групами. Видима нам зовнішня картина рухів людини є лише наслідком дуже складної керуючої функції нервової системи. Тому біомеханіка розглядає не «рухи», а «рухові дії», або «рухотворчі дії», а втрата людиною цілеспрямованості своїх рухових дій, їхньої усвідомленості та довільності призводить до її неповноцінності, як члена суспільства.

4. Згідно твердження одного з основоположників біомеханіки М. О. Бернштейна, людина буде свої рухи не за принципом копіювання якоїсь моделі, а за принципом доцільного пристосування до постійних змін зовнішнього і внутрішнього середовища. Водночас рухова дія – це не ланцюжок деталей, а складна структура яку ми при вивченні умовно розділяємо на окремі системно пов'язані компоненти. Свідоме керування руховими діями за певними алгоритмами з урахуванням специфіки біологічних закономірностей людини забезпечує їхню високу ефективність у різних умовах виконання.

5. Будь-які механічні переміщення тіла людини в просторі і в часі завжди неодмінно пов'язані з додатковими енерговитратами на переміщення частин тіла (їх підніманням та опусканням, розгоном і гальмуванням у певних режимах, викликаних необхідністю реалізації потрібної зовнішньої картини рухів). На відміну від неживих механізмів, тут неможливий повний взаємний перехід енергії від однієї форми до іншої, від одних частин тіла до інших, чи акумулювання механічної енергії для її подальшого використання (наприклад, у розтягнутих послідовних пружних компонентах м'яза тощо). Кожна частина тіла приводиться рух власними рушійними – м'язами, поведінка яких синхронізована та поєднана на ієрархічно вищих рівнях організації матерії (наприклад: спільність систем кровообігу, нервової системи, виконання окремих рухів у суглобах в ансамблі з рухами інших частин тіла за рахунок відповідної міжм'язової координації для досягнення спільної мети рухової дії тощо). Наприклад, велосипедисти і плавці витрачають на переміщення власних частин тіла від 30 до 90% від загальних енерговитрат організму; тенісист на саме відбивання м'ячика витрачає не більше 2 - 3%

своїх енерговитрат, а решта іде на переміщення всього тіла по майданчику та окремих частин його тіла.

6. Виконання м'язами людини статичної роботи з утримання пози, збереження рівноваги тощо, яка часто пов'язана з важкими умовами їхнього скорочення без періодів розслаблення, з позицій класичної механіки рівна нулю, а в біомеханіці оцінюється за імпульсами прикладених сил. Людина, виконуючи тривалу механічну роботу, пов'язану з втомою певних функціональних м'язових груп та всього організму, обирає нераціональний з позицій механіки режим збільшення загальних енерговитрат з метою зниження навантаження на основні м'язові групи, що дає змогу зберегти їхню належну працездатність до кінця виконання рухового завдання

7. Основні закони класичної механіки (механіки Ньютона) описують рух абсолютно твердих тіл, які не деформуються. У живих системах постійно змінюється відносне розташування їхніх частин. Самі частини тіла живих систем також явно деформуються. Тому, вивчаючи рух живої системи, також враховують певну роботу м'язів (наприклад, завдяки гнучкості хребта або грудної клітини), необхідну для деформації окремих частин тіла, яка завжди супроводжується витратами енергії, її розсіюванням. Тому вводиться поняття «живої маси», адже рухаються не тверді тіла, а складні утворення з кісткових елементів, м'яких тканин, внутрішніх органів, рідин, газів тощо. Математично неможливо розрахувати енерговитрати, пов'язані із складними затухаючими коливними процесами, що відбуваються в біомеханічній системі при її рухах (особливо – ударного характеру), але ці витрати також невеликі.

Спрощене моделювання живих систем, а особливо – людини, може призвести до хибних результатів.

Кожний вид спорту об'єднує цілі комплекси фізичних вправ, котрі мають спеціальну рухову спрямованість і становлять його спортивну техніку. Біомеханіка розглядає спортивну техніку як складну динамічну систему дій, що ґрунтується на раціональному використанні рухових можливостей людини і спрямована на розв'язання конкретного завдання у тому або іншому виді спорту, зокрема на досягнення високих спортивних показників.

Біомеханічний аналіз спортивної техніки є важливою передумовою для наукового обґрунтування та раціоналізації самого процесу і навчання рухів у спорті, а також для профілактичного, оздоровчого та лікувального застосування фізичних вправ у лікувальній фізичній культурі.

Для розв'язання поставлених завдань біомеханіка використовує різні методи дослідження, запозичені з анатомії, фізіології, педагогіки, механіки, математики та інших наук. Водночас вона розробила власні оригінальні способи вивчення рухів, котрі сформувалися у самостійні методичні прийоми, що визначають так званий біомеханічний метод дослідження.

Курс біомеханіки на факультетах фізичного виховання педагогічних інститутів має на меті ознайомити студентів із загальними основами

біомеханіки як науки про рухи людини і дати необхідні знання з біомеханічного обґрунтування фізичних вправ.

У результаті вивчення цього курсу майбутній фахівець з фізичного виховання повинний опанувати знаннями і навичками, що необхідні для правильного застосування фізичних вправ як засобу фізичного виховання.

Біомеханічний аналіз фізичних вправ являє собою не тільки конкретний метод вивчення рухів. Це й особливий спосіб мислення, розуміння складності процесів механічного руху людини, їх досконалості, які вироблено в процесі еволюції; це спосіб розкриття доцільності у фізиці живого.

Рух людини, що вивчається в біомеханіці, містить у собі механічний рух. Саме він складає основне завдання рухової діяльності людини. Але механічний рух здійснюється при визначальній участі більш високих форм руху. Тому біологічна механіка (біомеханіка) ширша і набагато складніша, ніж механіка, вона якісно відрізняється від фізики неживих тіл. Механічний рух живого пояснюється лише при вивченні специфіки живого, спираючись, зрозуміло, на основи механіки – на класичну механіку (абсолютно твердого тіла).

Предмет біомеханіки визначається тим, що саме, які явища (об'єкт пізнання) і яку сторону дійсності (область вивчення) вона вивчає.

Об'єкт пізнання біомеханіки – рухові дії як системи взаємно зв'язаних активних рухів і положень тіла людини.

Як наука біомеханіка охоплює вивчення механічного руху у тваринних організмах, у тому числі і руху людини.

Однак рухові дії людини істотно відрізняються від рухів тварин. У першу чергу, мова йде про усвідомлену цілеспрямованість рухів людини, про розуміння їхнього змісту, можливості контролювати їх і планомірно удосконалювати. Тому подібність між рухами тварин і людини завершується на суто біологічному рівні.

Об'єктом пізнання в біомеханіці є активні рухи, а також збереження положень тіла. Саме вони вивчаються як системи рухів у діях людини.

Рухові дії, що складають рухову діяльність, здійснюються за допомогою цілеспрямованих активних рухів. Руху багатьма частинами тіла, органами опори і рухи об'єднані в керовані системи рухів, цілісні рухові акти (наприклад гімнастичні вправи, способи пересування на лижах, прийоми гри в баскетбол та ін.). До системи рухів входить також і активне збереження положень окремих частин тіла (у суглобах), а іноді і всього тіла.

Предмет вивчення біомеханіки – механічні і біологічні причини виникнення рухів в їхній єдності й особливості їхнього виконання за різних умов.

Причини рухів у біомеханіці розглядають з погляду і механіки, і біології. Ці позиції треба розглядати в їхньому взаємному зв'язку, з урахуванням ролі людської свідомості в керуванні рухами. Організована система взаємозалежних механічних і біологічних закономірностей не є просто їх сумою.

Ці закономірності, вступаючи в складні взаємини, приводять до розкриття біомеханічної специфіки живого. Причому найбільш важливі особливості виявляються саме у плані керування рухами, що забезпечує їхню високу ефективність у різних умовах виконання.

Сфера застосування біомеханіки

Біомеханіка використовується для медичної діагностики, створення заміників тканин і органів, для розробки методів та засобів (у тому числі тренажерів), призначених для розв'язання складних рухових завдань, а також методів впливу на процеси у живих об'єктах, для створення методів аналізу та корекції природних, професійних (трудових) та спортивних рухів, для пізнання рухових можливостей людини і забезпечення оптимальних умов ефективного функціонування “людино-машинних” систем, при розробці методів захисту людини від несприятливих впливів механічних чинників зовнішнього середовища під час роботи в екстремальних умовах.

Найважливішими напрямками наукових досліджень у сучасній біомеханіці є

- вивчення механіки опорно-рухового апарату (скелета, м'язів) людини та тварин; вивчення природних локомоцій людини та тварин (плавання, політ, наземні пересування), а також маніпуляційних рухів людини;
- вивчення фізичних основ, механізмів та виявлень управління (регуляції) у біологічних системах;
- вивчення фізичних основ психомоторики та закономірностей формування у людини і тварин складних рухових навичок та заданих моделей рухів і рухових дій;
- вивчення рухової діяльності операторів “людино-машинних” систем з метою раціоналізувати її, оптимізувати та підвищити ефективність;
- вивчення різних виявлень рухової активності та здібностей людини до розв'язання складних рухових завдань в екстремальних умовах (в орбітальних польотах, у відкритому космосі, у стратосфері, під водою, за умов наднизьких та надвисоких температур);
- розробка технологій і засобів (на основі фізичних методів) для дослідження якостей та явищ у живих системах для спрямованого впливу на них та їх захисту від впливу зовнішніх чинників;
- створення заміників органів та тканин (переважно для потреб медицини);
- розробка моделей ефективного розв'язання людиною складних рухових завдань у різній професійній (трудовій), військовій, космічній практиці, у мистецтві, фізичному вихованні та спорті;
- розробка методик та технологій ефективного навчання людини і рухів та різних способів розв'язання складних рухових завдань;
- розробка технічних засобів (тренажерів) та іншого спорядження (у тому числі медичного обладнання та спортивного інвентарю), призначеного для відновлення тимчасово втрачених функцій (у медицині), а також для

розширення й удосконалення рухових можливостей людини у різних видах її професійної (трудової), військової практики, фізичній культурі та спорті.

Великого розвитку набула біомеханіка у фізичній культурі та спорті. У цій галузі більш наочно виявляються і найгостріше випробовуються рухові можливості людини.

Біомеханіка фізичних вправ вивчає рухову систему людини та її рухові акти (вправи) під час занять фізичною культурою і спортом з метою забезпечити раціональні методи фізичного виховання населення і створити міцні наукові основи сучасної системи підготовки спортсменів високої кваліфікації.

Завдання біомеханіки

Завдання загальної біомеханіки – висвітлити (з позицій біомеханіки) основні загальні закономірності будови, рухового апарата і виконання рухів.

До розділу загальної біомеханіки входять вступ до курсу, який визначає предмет і метод науки, вивчення особливостей опорно-рухового апарата людини як біомеханічної системи, визначення біомеханічних характеристик рухів людини, що розкривають особливості рухових дій; розгляд складу і структур систем рухів у фізичних вправах.

Рухи живих істот являють собою дуже складне явище. У них поєднується найпростіший рух – механічний, що вивчає механіка, з більш високими формами руху, що вивчає хімія, біологія, психологія та інші науки. Тому біомеханіка, розробляючи власні шляхи вивчення механічного руху живих істот, використовує також дані ряду суміжних наук.

Оскільки оволодіння рухами, удосконалення рухів визначають собою їхню ефективність, їхню відповідність меті рухової діяльності, навчальний курс біомеханіки спрямований на вивчення рухів тільки людини. Тут необхідно враховувати і те, що рухи зумовлені вищими рівнями свідомого керування ними. Саме ці особливості не мають пояснення ні з позицій механіки, ні з позицій біології.

“У нормі людина робить не просто рух, а завжди дії” (Н. А. Бернштейн). Дії людини завжди мають мету, визначений зміст. З дій людини складається його рухова діяльність. За допомогою цієї діяльності в процесі фізичного виховання людина вдосконалює свою власну природу, фізично змінюється. Людина перетворить світ, використовуючи можливості науково-технічного прогресу в кінцевому рахунку за допомогою рухової діяльності.

У біомеханіці предмет вивчення визначається її завданнями. Загальні завдання охоплюють всі галузі знань у цілому; окремі завдання важливі при вивченні конкретних питань рухів.

Загальне завдання вивчення рухів полягає в оцінюванні ефективності прикладених сил для більш ефективного досягнення поставленої мети.

Вивчення рухів у кінцевому рахунку має педагогічну спрямованість. Рухи вивчають для того, щоб визначити, від чого залежить їхня ефективність,

у яких умовах і як краще їх виконувати. Для цього необхідно вміти оцінювати їхню досконалість, їхню відповідність поставленій меті. На думку А. А. Ухтомського, біомеханіка досліджує, “яким чином отримана механічна енергія руху і напруження може мати робоче застосування”.

Шлях оцінювання ефективності в принципі простий. Потрібно визначити сили, що у даному русі виконують корисну роботу. Далі потрібно встановити, які сили виконують шкідливу роботу, що знижує ефект корисних сил. З’ясовують, які джерела сил, де і коли вони прикладені, який результат їхньої дії. Зіставляючи отримані дані, можна довідатися, наскільки ефективний досліджуваний рух, у чому полягають його недоліки, як краще його усунути і, головне, як удосконалювати рух.

При всій удаваній простоті цього завдання потрібно підкреслити, що виконання його вимагає не тільки зроблених методів реєстрації рухів, але й фундаментальної теорії, що дозволяє пояснювати одержувані дані.

Оцінка ефективності вимагає глибокого розкриття законів руху в живих системах. Ці закони навіть з погляду механіки відрізняються від законів Ньютона, принаймні, як живий організм відрізняється від абстрактної моделі – абсолютно твердого тіла. З цього погляду завдання впливають не тільки на вибір галузі вивчення, але також на метод і теорію, що пояснює закономірності даної науки.

Окремі завдання біомеханіки полягають у вивченні і поясненні: а) самих рухів людини в тій або іншій сфері її рухової діяльності; б) рухів фізичних об’єктів, переміщуваних людиною; в) результатів розв’язання рухового завдання; г) умов, в яких вони здійснюються; д) розвитку рухів людини (з урахуванням названих сторін) у результаті навчання і тренування.

Для досягнення мети рухової дії можна знайти кілька способів її виконання. Вивчаючи кінематику, просторову форму і характер рухів, отримують їхній зовнішній опис. Вивчаючи динаміку рухів, вплив сил на їхню зміну, знаходять причини особливостей рухів. У такий же спосіб описують і пояснюють рух снарядів (м’яч, шайба, ядро і т. п.), що залежать від рухів людини.

Для оцінювання якості рухів потрібно вивчити результат виконання рухового завдання. Він може більше або менше відповідати поставленим вимогам. При цьому потрібно не тільки визначити саму якість результату, але й дати пояснення причинам тієї або іншої ефективності. Необхідно зіставляти різні варіанти, що склалися в практиці, різний ступінь досконалості, що залежить від кваліфікації виконавця, і багато чого іншого.

Далі необхідно розглянути вплив умов, за яких виконується рух, на спосіб дії і на результат розв’язання рухового завдання. Тому що рухи часто виповнюються в перемінних умовах, характер зміни останніх також впливає на рухи. Умови рухової діяльності звичайно поділяють на зовнішні й внутрішні. До зовнішніх умов належать усі фактори зовнішнього оточення, в якому рухається людина. До внутрішніх умов діяльності відносять більш загальні, залежні від довгостроково діючих факторів (рівень підготовленості, вікові особливості та ін.), і більш приватні прояви пристосування людини до

конкретних умов визначеної дії (ступінь спрацювання, стомлення та ін.). З одного боку, тут виявляють, які умови сприяють ефективності, інакше кажучи, які потрібно створювати умови. З іншого боку, визначають, як краще пристосуватися до заданих умов, як їх використовувати.

Нарешті, як правило, для розуміння досліджуваного стану або процесу треба вивчити його історію, розглянути явище в його розвитку. Тут потрібно не тільки розкрити вже пройдені етапи, але й передбачати, прогнозувати майбутнє. Без передбачення неможливе обґрунтоване планування діяльності, а саме воно загалом відрізняє людину від тварин. Тому на основі опису і пояснення рухів необхідно вказати шлях їхнього удосконалення: не тільки вивчати дійсність, але й перетворювати її.

Визначення загального завдання, розкриття його через ряд особливих завдань підвищує цілеспрямованість вивчення рухів, конкретизує вимоги до розробки теорії й методу біомеханіки, дає можливість раціоналізації фізичних вправ і шляхів оволодіння ними.

Теорія і методи біомеханіки

Теорія будь-якої науки – це сума нагромаджених знань, сформованих у систему.

Методи – це шляхи дослідження та отримання нових знань і виявлення нових закономірностей.

Теорія і методи виражаються відповідними поняттями та законами, які розкривають зміст науки.

Найбільш часто в біомеханічних дослідженнях використовується порівняно простий функціональний метод, який полягає у виявленні взаємозв'язку між певними біомеханічними характеристиками рухових дій, що виконуються, або характеристиками самої людини та між результатами її рухової діяльності. За допомогою даного методу вивчають функціональну залежність між властивостями і станом системи, явища чи процесу. Їх характеризують певні параметри, конкретні умови і кількісно визначений закон. Тут не ставиться завдання вивчити внутрішню причинну структуру явищ, а досліджується лише їх функція. Залежності, що виявляються між будовою системи та її функцією, мають переважно статистичний (імовірний) характер. Тут розглядають функцію усєї системи в цілому, не вивчаючи її внутрішніх механізмів.

Функціональний підхід дозволяє констатувати ті чи інші недоліки техніки і тактики. Але він не дає відповіді на запитання «чому», тобто не дає змоги розробити чіткі рекомендації для їх усунення; педагог вимушений діяти навмання.

В основі сучасного розуміння рухових дій закладений метод системно-структурного аналізу та системно-структурного синтезу: людина розглядається, як система, що рухається, а самі процеси руху – як системи рухів, що розвиваються.

Системно-структурний підхід – це діалектичний принцип наукового пізнання цілісності складних об'єктів та систем. Такий підхід до техніки рухових дій, як до предмету навчання, спрямований проти метафізичного розділення цілого без урахування взаємодії його елементів.

Метод системно-структурного аналізу і синтезу стосовно вивчення рухових дій людини, реалізований у теорії структурності рухів, закладеної М. О. Бернштайном, згідно якої рухова діяльність людини – це не ланцюжок деталей, а структура, яка умовно диференціюється на частини.

В теорії структурності рухів закладені наступні принципи:

а) принцип структурності побудови системи рухів – усі вони взаємопов'язані; саме ці структурні зв'язки визначають цілісність та досконалість рухових дій;

б) принцип цілісності дії – всі рухи створюють одне ціле, спрямоване на досягнення єдиної мети; зміна кожного руху так чи інакше впливає на всю систему рухів.

в) принцип свідомої цілеспрямованості системи рухів – людина свідомо ставить мету і керує цілком свідомими рухами для досягнення цієї мети.

Однак, усі рухові дії людини повністю підпорядковуються законам класичної механіки. Метод системно-структурного аналізу і синтезу в загальному вигляді має у своїй основі системний синтез дій з використанням кількісних характеристик, зокрема – моделювання рухів.

Біомеханіка, як експериментальна наука, опирається на результати експериментів та спостережень (феноменологію). За допомогою різних приладів реєструються кількісні характеристики рухових дій (наприклад: траєкторії руху, швидкості, прискорення, зусилля тощо), які дають змогу розрізняти рухові дії та порівнювати їх між собою. За даними характеристиками систему рухів умовно поділяють на окремі складові частини, вивчаючи склад системи за її окремими елементами (це і є системно-структурний аналіз), та виявляючи «слабкіланки», які необхідно змінити. Вивчаючи зміни кількісних характеристик, виявляють, як окремі елементи впливають один на одного і визначають причини цілісності системи (це і є системно-структурний синтез).

На вищому рівні системного аналізу можна моделювати рухові дії, використовуючи ЕОМ, шукати оптимальні варіанти дій. Системний аналіз і системний синтез рухових дій неподільно пов'язані між собою (взаємодоповнюють себе в системно-структурному дослідженні).

Системно-структурний підхід дає більш конкретні рекомендації: відповіді на запитання, з яких елементів складаються рухові дії і як ці елементи пов'язані між собою, а також пояснення причин внутрішнього механізму системи рухів.

Функціональний метод аналізу рухових дій використовується на першому етапі досліджень, при вирішенні нових завдань або конкретних питань педагогів-практиків. Ним користуються у випадках, коли якийсь вид

рухової діяльності недостатньо досліджений, його визначальні елементи не виявлені, або коли апаратурна база не відповідає вимогам методу системно-структурного аналізу і синтезу. Однак, статистичні результати, одержані при використанні функціонального методу, часто не дають змоги вирішувати питання індивідуалізації технічного удосконалення.

Метод системно-структурного аналізу і синтезу рухових дій передбачає ретельне і повне виконання всіх конкретних завдань біомеханіки, а також наявність у даному питанні багатой феноменології; цей метод вимагає глибоких узагальнень. Його складність, тривалість і вартість значно перевищують аналогічні показники функціонального методу. Окрім того, для деяких складних і маловивчених видів рухової діяльності застосування системно-структурного підходу викликає значні труднощі. Проте цей метод дає можливість розробляти індивідуальні раціональні зразки техніки для конкретних осіб на даний період і для конкретних умов виконання рухових дій.

1.3. Напрямки розвитку біомеханіки

Враховуючи, що біомеханіка, як наука, виникла на стику класичної механіки і біології, а також динамічної анатомії, фізіології, психології та педагогіки, її розвиток ішов кількома паралельними напрямками: механічним, функціонально-анатомічним та фізіологічним.

Механічний напрямок, початий роботами Леонардо Да Вінчі та Д. Бореллі (який у 1697 р. написав трактат «Про рухи тварин»), розвиває ідеї зміни рухів живих систем під дією прикладених сил згідно до законів класичної механіки. Зараз механічний підхід до вивчення рухів людини, що дає змогу визначити кількісну міру рухотворчих процесів – одна з основ біомеханіки, яка ніколи не втратить свого значення. Питанням будови і властивостей опорно-рухового апарату людини та її рухових дій велику увагу приділяють біомеханічні школи США, Німеччини, Польщі, Іспанії тощо, в тому числі й українська.

Однак, чисто механічний підхід до вивчення рухових дій людини часто призводить до невиправданих спрощень, які недооцінюють специфіку живого, дають механістичне пояснення ієрархічно вищих біологічних і соціальних форм руху матерії механічними факторами. Біомеханіка – це не «прикладна до живого» механіка, як її розуміють деякі фахівці з технічною чи математичною освітою, а самостійна сучасна наука, що вивчає механічні закони руху живих систем з позицій системного підходу.

Функціонально-анатомічний напрямок зародився при вивченні будови людського тіла в динаміці. Професор М. Ф. Іваніцький та його учень професор М. А. Джафаров започаткували українську школу динамічної анатомії, розробивши теорію єдності та взаємообумовленості форми і функції живого організму, вперше впровадили в навчальний план Львівського державного інституту фізичної культури спеціальний курс біомеханіки (яка спочатку називалась динамічною анатомією). Всесвітньовідомий російський

анатом П. Ф. Лесгафт, учнями якого вважають себе і згадані вчені, започаткував новий підхід у вивченні анатомії людського тіла під впливом фізичних навантажень, описуючи та аналізуючи рухи в суглобах, визначаючи участь окремих м'язів у збереженні положення тіла та в його рухах.. З 1877 року спеціальний курс «Теорія тілесних рухів» (пізніше – «Теорія рухів») Лесгафт та його учні читали слухачам фізкультурних курсів та студентам інституту фізичної освіти.

Знання морфологічних особливостей біомеханічних систем забезпечує серйозне обґрунтування фізичної і технічної підготовки.

Фізіологічний напрямок розвитку біомеханіки започаткували ідеї нервізму, вчення про вищу нервову діяльність та останні досягнення нейрофізіології. І. М. Сеченов, І. П. Павлов, П. К. Анохін, один із засновників сучасної біомеханіки М. О. Бернштайн та інші розкрили рефлекторну природу рухотворчих дій та механізмів нервової регуляції при взаємодії організму з навколишнім середовищем, а їх дослідження регуляторних механізмів ЦНС, нервово-м'язового апарату людини дають уяву про виняткову складність і досконалість процесів керування її руховими діями

Сьогодні аналіз будь-яких вправ ґрунтується на головних засадах керування руховими діями: пристосуванні керуючих імпульсів у ході виконання рухового завдання до конкретних умов його виконання, усуненні відхилень (корекції) від обраного способу поведінки, та в кільцевому характері процесів керування шляхом аналізу чуттєвих сигналів.

Лише системне поєднання передових досягнень усіх вказаних напрямків розвитку сучасної біомеханіки дає змогу вірно зрозуміти сутність рухових (рухотворчих) дій живих систем та активно їх удосконалювати.

Питання для самоконтролю

- 1) Дайте визначення біомеханіки як науки.
- 2) Розкрийте біомеханіку як навчальну дисципліну.
- 3) Охарактеризуйте предмет біомеханіки.
- 4) Розкрийте об'єкт пізнання біомеханіки.
- 5) Визначте, що вивчає біомеханіка.
- 6) Розкрийте найважливіші напрями наукових досліджень у сучасній біомеханіці.
- 7) Охарактеризуйте основні завдання вивчення загальної біомеханіки.
- 8) Розкрийте метод біомеханіки.
- 9) Охарактеризуйте історію розвитку біомеханіки.

Розділ 2. Основи біомеханічного аналізу

Для об'єктивної оцінки якості виконання рухової дії, необхідно порівняти певні кількісні характеристики її виконання з такими-ж характеристиками обраного зразка – наприклад: виконання такої самої фізичної вправи фахівцем високої кваліфікації, здоровою людиною, із загальноприйнятою нормою тощо, або розрахований зразок-модель індивідуальної раціональної техніки для конкретної особи, виходячи з індивідуальних особливостей будови її тіла та функціональних можливостей.

Тому проблема коректного вимірювання та розрахунку різних кількісних характеристик виконання рухових дій надзвичайно актуальна і важлива. Проте слід відзначити, що правильний вибір біомеханічних характеристик (Б.Х.) з метою оцінювання за ними якості рухової дії – також дуже складне завдання. Такі кількісні характеристики виконання конкретної вправи називаються визначальними, провідними чи головними – це і є так звані критерії оцінювання техніки.

Видиму нам зовнішню картину рухових дій людини – кінематику фізичної вправи – можна описати кінематичними біомеханічними характеристиками, які дають змогу кількісно охарактеризувати переміщення в просторі і в часі окремих точок чи частин тіла (просторові, часові та просторово-часові Б.Х.). Причини рухових дій розкривають динамічні Б.Х. – інерційні, силові та енергетичні.

Об'єктивна реєстрація Б.Х. рухової дії розпочинає її біомеханічний аналіз та оцінювання. Реєстрація кінематичних характеристик порівняно простіша від реєстрації динамічних, особливо в природних умовах.

Детально кінематичні Б.Х., динамічні Б.Х., способи реєстрації Б.Х., їх подальшої математичної обробки та аналізу за ними рухових дій розглядаються в даному розділі.

В результаті вивчення розділу 2 студенти повинні опанувати результати навчання:

ПРН30.1- С3 Володіти принципами побудови математичних моделей біологічних об'єктів

ПРН30.2- С3 Вміти аналізувати отримані результати

2.1. Біомеханічні характеристики тіла людини

Тіло людини є з погляду механіки об'єкт найбільшої складності. Воно складається з частин, які з великим ступенем точності можна вважати твердими (скелет) і деформованих порожнин (м'язи, судини та ін.), причому в цих порожнинах містяться текучі і фільтруючі середовища, що не мають властивостей звичайних рідин.

Тіло людини загалом зберігає будову, властиву всім хребетним: двополярність (головний і хвостовий кінці), двосторонню симетрію, переважання парних органів, наявність осевого скелета, збереження деяких (реліктових) ознак сегментарності (метамерії) тощо.

До інших морфофункціональних особливостей тіла людини відносяться: високополіфункціональна верхня кінцівка; рівний ряд зубів; розвинений мозок; прямоходіння; пролонговане дитинство та ін.

В анатомії прийнято вивчати тіло людини у вертикальному положенні із зімкнутими нижніми та опущеними верхніми кінцівками.

У кожній частині тіла виділяють області голови, шії, тулуба та двох пар верхніх та нижніх кінцівок.

На тулуб людини позначають два кінці — черепний, або краніальний і хвостовий, або каудальний і чотири поверхні — черевну, або вентральну, спинну, або дорсальну і дві бічні — праву та ліву.

На кінцівках визначають по відношенню до тулуба два кінці: проксимальний, тобто ближчий і дистальний, тобто віддалений.

Тіло людини побудоване на кшталт двосторонньої симетрії (воно ділиться серединною площиною на дві симетричні половини) і характеризується наявністю внутрішнього скелета. У середині тіла спостерігається розчленування на метамери, або сегменти, тобто утворення однорідні за будовою та розвитком, розташовані в послідовному порядку, у напрямку поздовжньої осі тіла (наприклад, м'язові, нервові сегменти, хребці та ін.); центральна нервова система лежить ближче до спинної поверхні тулуба, травна - до черевної. Як і всі ссавці, людина має молочні залози та покриті волоссям шкіру, порожнина його тіла розділена діафрагмою на грудний та черевний відділи.

Щоб краще орієнтуватися щодо взаємного становища частин у тілі, виходять із деяких основних площин і напрямів. Терміни "верхній", "нижній", "передній", "задній" відносяться до вертикального положення тіла людини. Площина, що ділить тіло у вертикальному напрямку на дві симетричні половини, називається серединною. Площини, паралельні серединній, називаються сагітальними; вони ділять тіло на відрізки, розташовані у напрямі праворуч наліво. Перпендикулярно серединній площині йдуть фронтальні, тобто паралельні лобі площині; вони розтинають тіло на відрізки, розташовані у напрямку спереду назад. Перпендикулярно серединній і фронтальній площині проводяться горизонтальні або поперечні площини, що розділяють тіло на відрізки, розташовані один над одним.

Термінами "медіально" і "латерально" користуються для позначення частин тіла по відношенню до серединної площини: "медіально" - знаходиться ближче до серединної площини, "латерально" - далі від неї. З цими термінами не треба змішувати терміни «внутрішній» і «зовнішній», які використовуються лише до стінок порожнин. Слова «черевний», «спинний», «правий», «лівий», «поверхневий», «глибокий» не потребують пояснення. Для позначення просторових відносин на кінцівках прийнято терміни «проксимальний» і «дистальний», тобто розташований ближче і далі від місця з'єднання кінцівки з тулубом.

Короткі дані про центр ваги тіла людини

Функція нижніх кінцівок людини, якщо виключити багато фізичних вправ, визначається головним чином опорою (становище стоячи) та локомоцією (ходьба, біг). І в тому, і в іншому випадку на функцію нижніх кінцівок, на відміну від верхніх, значний вплив має загальний центр ваги (ЗЦВ) тіла людини.

У багатьох завданнях механіки зручно і допустимо розглядати масу якогось тіла так, ніби вона сконцентрована в одній точці – центрі ваги (ЦВ). Оскільки ми маємо аналізувати сили, що діють на тіло людини під час виконання фізичних вправ і стоячи (спокій), нам слід знати, де знаходиться ЦВ у людини в нормі та при патології (сколіоз, коксартроз, ДЦП, ампутації кінцівки та ін.).

У загальній біомеханіці важливим є вивчення розташування центру ваги (ЦВ) тіла, його проекції на площу опори, а також просторового співвідношення між вектором ЦВ та різними суглобами. Це дозволяє вивчати можливості блокування суглобів, оцінити компенсаторні, пристосувальні зміни в опорно-руховому апараті (ОРА). У дорослих чоловіків (в середньому) ЗЦВ розташовується на 15 мм позаду передньо-нижнього краю тіла V поперекового хребця. У жінок ЦВ у середньому розташовується на 55 мм спереду від передньо-нижнього краю I крижового хребця.

У фронтальній площині ЗЦВ незначно (на 2,6 мм у чоловіків і на 1,3 мм у жінок) зміщений вправо, тобто права нога приймає трохи більше навантаження, ніж ліва

Загальний центр ваги (ЗЦВ) тіла складається із центрів ваги окремих частин тіла (парціальні центри ваги). Тому при рухах та переміщенні маси частин тіла переміщається і загальний центр ваги, але для збереження рівноваги його проекція не повинна виходити за межі площі опори.

Висота положення ЗЦВ у різних людей значно варіює в залежності від цілого ряду факторів, до яких в першу чергу відносяться стать, вік, статура тощо.

У жінок ЗЦВ зазвичай "має трохи нижче, ніж у чоловіків.

У дітей раннього віку ЗЦВ тіла розташоване вище, ніж у дорослих.

При зміні взаємного розташування частин тіла проекція його ЗЦВ також змінюється. Змінюється у своїй і стійкість тіла. У практиці спорту (навчання

вправам і тренуванням) і при виконанні вправ лікувальної гімнастики це питання дуже важливе, тому що при більшій стійкості тіла можна виконувати рухи з більшою амплітудою без порушення рівноваги

Стійкість тіла визначається величиною площі опори, висотою розташування ЗЦВ тіла та місцем проходження вертикалі, опущеної з ЗЦВ, усередині площі опори. Чим більша площа опори і чим нижче розташований ЗЦВ тіла, тим більша стійкість тіла.

Кількісним виразом ступеня стійкості тіла у тому чи іншому положенні є кут стійкості (КС). КС називається кут, утворений вертикаллю, опущеною з ЗЦВ тіла та прямою, проведеною з ЗЦВ тіла до краю площі опори. Чим більший кут стійкості, тим більший ступінь стійкості тіла.

Вертикаль, опущена з ЗЦВ тіла, проходить певній відстані від осей обертання суглобів. У зв'язку з цим сила тяжіння в будь-якому положенні тіла має по відношенню до кожного суглоба певний момент обертання, що дорівнює добутку величини сили тяжіння на її плече. Плечем сили тяжіння є перпендикуляр, проведений із центру суглоба до вертикалі, опущеної з ЗЦВ тіла. Чим більше плече сили ваги, тим більший момент обертання має по відношенню до суглоба.

Маса частин тіла визначається у різний спосіб. Якщо в різних людей абсолютна маса частин тіла значно відрізнятиметься, то відносна маса, виражена у відсотках, досить постійна.

Дуже велике значення мають дані про масу частин тіла, а також про розташування парціальних центрів ваги та моментів інерції в медицині (для конструювання протезів, ортопедичного взуття тощо) та у спорті (для конструювання спортивного інвентарю, взуття тощо).

Справжня дисципліна вивчає механічні форми рухів живих біомеханічних систем.

Об'єктами вивчення є люди, що взаємодіють з різними механічними системами.

Методи досліджень включають аналіз і синтез дій за допомогою реалізацій фізико-математичних моделей.

Механічні характеристики біосистем використовують у біомеханіці як для опису властивостей різних фізико-математичних моделей, які розробляються і застосовуються у біомеханіці, так і для дослідження руху і взаємодії біологічних тіл, зокрема тіла людини, із зовнішнім довкіллям.

При рішенні різних завдань біомеханіки, біологічне тіло, у тому числі і тіло людини, розглядається як матеріальний об'єкт і залежно від співвідношення його розмірів з розмірами навколишніх тіл в просторі його приймають матеріальною точкою або матеріальним тілом (системою матеріальних точок). Так, наприклад, біологічне тіло вважають матеріальною точкою, якщо його розмірами можна знехтувати в порівнянні з розмірами інших, об'єктів, що оточують його, або його розміри несумірні з переміщеннями тіла в просторі. У ряді випадків біологічні тіла або їх окремі

складові (сегменти), сполучені в суглобах, можна розглядати як абсолютно тверді тіла, якщо в дослідженні можна нехтувати змінністю відстаней між їх точками. В цьому випадку тіла і їх сегменти при русі приймають такими, що не деформуються або незмінними. У поширених у біомеханіці моделях, тіло людини приймають у вигляді механічної системи зі взаємозв'язаними між собою сегментами (ланками), а рух тіла і його ланок вивчають, вважаючи їх абсолютно твердими стержнями різної форми.

Хоча такі моделі біологічних об'єктів значно спрощують дійсність, практичне їх використання у біомеханіці підтверджує їх придатність для аналізу рухів біологічних тіл.

До основних біомеханічних характеристик тіл або біомеханічних систем, відносять:

- характеристики, що визначають положення тіла або біомеханічної системи в просторі;
- характеристики, що визначають розподіл маси тіла або біомеханічної системи в просторі, називають мас - геометричними характеристиками;
- характеристики, що визначають закони рухи тіл, називаються кінематичними і кінетичними характеристиками.

Велике значення приділяється вимірам цих характеристик.

Для визначення положення тіла людини, його частин або характерних точок тіла зручно використати три взаємно перпендикулярні анатомічні площини і осі, а також нерухомі і рухливі системи декартових координат.

Розглянемо тіло людини в основній вертикальній стойці.

Систему декартових координат $OXYZ$ жорстко зв'язують з тілом людини і поміщають її початок відліку в антропометричній точці, що належить вершині остистого відростка п'ятого поперекового хребця.

Нерухому систему координат $O1X1Y1Z1$ можна розмістити у будь-якому місці простору, зокрема поєднавши її початок в точці O , а її осі в початковому положенні раціонально орієнтувати, поєднуючи їх з осями рухливою координатною системою $OXYZ$.

Вертикальна площина, що проходить через «передню серединну» і хребетну лінії, а також будь-які площини, які паралельні їй або площини XOZ називаються сагітальними. Сагітальними площинами тіло розділяється на ліву і праву частині, а одна з них є площиною симетрії тіла.

Вертикальна площина, перпендикулярна сагітальною, і будь-які площини, паралельні їй або площини XOZ називаються фронтальними. Ці площини розділяють тіло на передню і задню частині.

Горизонтальна площина і будь-які площини їй паралельні, перпендикулярні до сагітальної та фронтальної площин і називаються трансверсальними. Останні розділяють тіло на верхню і нижню частини.

Анатомічні осі - сагітальна, фронтальна і подовжня співпадають з напрямками координатних осей ОХ, ОУ, ОZ, відповідно. Якщо вісь ОУ направити у бік лівої руки людини, то ці осі утворюють праву ортогональну систему координат.

Положення тіла в просторі характеризується його місцем, орієнтацією і позою.

Місце тіла визначає в якій частині простору знаходяться людина.

Орієнтація визначається поворотами тіла, а відповідно і поворотами рухливої системи координат ОХYZ з ним пов'язаною, відносно нерухомою.

Нагадаємо, що усе вище перелічене справедливо для незмінного твердого тіла. Для біомеханічних систем, що складаються з сегментів, характерними є їх пози.

Поза людини визначається взаємним розташуванням його частин (ланок) в системі координат, пов'язаній з тілом. Так, наприклад, можуть бути різні орієнтації тіла, але в однаковій позі.

Пози людини у рамках такої моделі можна інтерпретувати, як розташування ланок моделі в системі координат ОХYZ.

Зрозуміло, що у рамках плоскої моделі позу людини можна описати завданням координат крайніх двох точок кожної ланки моделі в системі координат, пов'язаній з тілом.

До мас - геометричним характеристикам (М. Г. Х.) біомеханічних систем відносять масу, моменти інерції, центр мас, площі поверхні і об'єми тіл, центри додатка рівнодійних гідростатичних сил, що діють в об'ємі або на поверхні тіла.

Їх використовують при рішенні різних рухових завдань людини.

Центром мас називається точка, координати якої обчислюються по формулах

У полі тяжіння центр мас співпадає з центром тяжіння. Центр мас людини займає різне положення залежно від пози людини.

Осьовий момент інерції характеризує розподіл мас і дорівнює сумі добутків маси кожної точки системи на квадрат її відстані до відповідної осі.

Розмірність осьового моменту інерції в СІ [кг.м²].

Площу поверхні тіла зазвичай визначають наступними експериментальними методами: викраєній, планіметричний, силуетний, лінійних вимірів, відео електронний і інші. Можна використати наближені номограми.

Відомі для визначення площі поверхні тіла різні наближені формули. Наприклад, у формулі $S = 0,0485 m/h$, S - площа тіла [м²], m - маса тіла [кг]; h - довжина тіла [см].

Сила лобового опору тіла при його русі відносно зовнішнього середовища залежить від міделя St - величини проекції поверхні тіла на площину перпендикулярну до напрямку руху. Значення міделя при різних взаємодіях тіла із зовнішнім середовищем (вода, повітря) залежно від пози оцінюється у відсотках від загальної площі поверхні тіла. Для різних видів пересування тіла людини в середовищі найбільш раціональне значення

міделя $S\tau$ - визначають по наступних залежностях: для ходьби - $S\tau = 0.31 S$; для бігу - $S\tau = 0.25 S$; для пересування на велосипеді (велоспорт) - $S\tau = 0.21 S$; для спуску на лижах (гірськолижний спорт) - $S\tau = 0.13 S$.

Для фізико-математичного моделювання біомеханічних систем, зокрема тіла людини, використовуються різні моделі.

Модель тіла людини представляють у вигляді механічної системи.

Зупинимося коротко на одній з таких моделей, найбільш задовільною для використання при вивченні рухових завдань біомеханіки людини. Для побудови такої моделі, тіло людини представляють тим, що складаються з п'ятнадцяти сегментів (ланок).

Кожна така ланка відповідає цілком певній частині тіла, де цифрами позначено: ланка 1 - голова і шия; ланка 2 - верхній відділ тулуба; ланка 3 - середній і нижній відділ тулуба; ланки 4 і 5 - кисті; ланки 6 і 7 - плечі; ланки 8 і 9 - передпліччя; ланки 10 і 11 - стегна; ланки 12 і 13 - гомілки; ланки 14 і 15 - стопи.

Тут все п'ятнадцять, виділених вище сегментів тіла, моделюються жорсткими стержнями, маси яких зосереджені в окремих точках кожної ланки. Стержні прийняті сполученими шарнірно в суглобах тіла.

Механічна модель тіла складається з ланок (сегментів), що приймаються у вигляді циліндрів, усічених конусів і, можливо, інших геометричних фігур. Позначено: 1 - голова, 2 - верхній відділ тулуба, 3 - середній і нижній відділи тулуба, 4, 5 - кисті рук, 6,7 - плечі, 8, 9 - передпліччя, 10,11 - стегна, 12,13 - гомілки, 14,15 - стопи.

Для адекватності моделі розміри її ланок визначають антропометричними методами. За цими даними обчислюють М. Г. Х. ланок і тіла в цілому.

Для визначення М. Г. Х. використовують, наприклад, рівняння множинної регресії:

Існують і інші методи для визначення М. Г. Х. тіла людини. Так, наприклад, масу ланки, в % від загальної маси тіла, і положення центру мас на осі ланки можна визначити скориставшись певними даними.

Додатково у біомеханіці використовують такі поняття як центр об'єму і центр поверхні. Ці характеристики біомеханічної моделі тіла також відносяться до М. Г. Х.

Центр об'єму тіла - це точка прикладення рівнодійної сил гідростатичного тиску. Із-за різної щільності багатьох частин тіла ця точка не співпадає з центром мас тіла. Для основної стійки тіла центр об'єму знаходиться на декілька сантиметрів вище за його центр мас.

Центр поверхні тіла - це точка прикладення рівнодійної сил зовнішнього середовища.

Визначення антропометричних точок тіла людини

Для забезпечення точності тіла людини використовують так звані антропометричні точки, що мають строгу локалізацію: кісткові виступи, відростки, горби, виростки, краї кісток, які зчленовуються, постійні складки шкіри, специфічні утворення (соски грудних залоз, пупок й так далі).

Місцезнаходження тієї або іншої антропометричної визначають шляхом промацування і безболісного натискання з подальшим позначенням її демографічним олівцем.

На поверхні тіла натурника позначають такі антропометричні точки:

- верхівкову – найбільш високу точку темряви при положенні голови в очно-ямково-вушній горизонталі;
- верхньо-грудинну – найглибшу точку грудини відносно серединної лінії тіла;
- середньо-грудинну – в області грудини на рівні верхнього краю 4-го грудино - реберного зчленування відносно серединної лінії тіла;
- акроміальну (плечову) – найбільш виступаючу зовні на нижньому краю акроміального відростка лопатки при вільно опущених руках;
- променеву – саму верхню точку головки променевої кістки на латеральній (задній) стороні передпліччя в області плече-променевого суглоба;
- шилоподібну – саму нижню на шилоподібному відростку променевої кістки
- пальцеву – саму нижню на м'якоті дистальної фаланги 3-го пальця;
- передню клубово-остисту – найбільш виступаючу вперед точку переднього верхнього клубового остюка;
- лобкову – саму верхню точку по серединної лінії тіла;
- клубово-гребеневу – найбільш виступаючу латеральну в області гребеня клубової
- верхньо-берцову – точку, орієнтиром для якої служить щілина колінного суглоба з медіального боку зв'язки наколінника;
- нижньо-гомілкову (внутрішню) – саму нижню точку медіальної лоджки;
- п'яткову – найбільш виступаючу назад точку стопи;
- кінцеву – найбільш виступаючу наперед на м'якоті дистальної фаланги 1-го, а 2 або 3-го пальця стопи;
- плеснову медіальну – найбільш виступаючу медіальну точку 1-ї плеснової кістки
- плеснову латеральну – найбільш виступаючу латеральну точку 5-ї плеснової кістки;
- потиличну – найбільш виступаючу назад точку потиличного пагорба;
- шийну – найбільш виступаючу точку остистого відростка 7-го шийного хребця;
- грудну – найбільш виступаючу назад точку остистого відростка 7-го грудного хребця, який визначають 12-м ребром;
- поперекову – найбільш виступаючу точку остистого відростка 5-го поперекового хребця (найбільш глибоку точку поперекового лордоза);
- крижову – найбільш видатну назад на крижах відносно задньої серединної лінії тіла.

Після нанесення антропометричних точок на поверхню тіла вимірюють подовжні, поперечні та глибинні розміри тіла. Усі результати у спеціальну карту антропометричного обстеження.

Визначення подовжніх розмірів тіла

В антропометрії подовжні розміри тіла людини визначають як відстань між антропометричними точками, орієнтованими відносно вертикальної вісі.

Вимір можна проводити двома приладами:

- ▲ антропометром, яким визначають висоту всіх антропометричних над опорною поверхнею, де знаходиться випробовуваний. Потім, віднімаючи висоту однієї з висоти іншої, знаходять довжину відповідних сегментів тіла;
- ▲ штанговим циркулем, яким безпосередньо вимірюють довжину того або іншого сегменту тіла між його крайніми. Зазвичай 1-й спосіб застосовують для подовжніх розмірів тіла та його сегментів, а 2-й – для поперечних розмірів.

Основними подовжніми розмірами тіла людини є такі:

- довжина тіла – висота верхівкової точки над опори;
- довжина тулуба – різниця висот верхньо-грудинної і лобкової точок, тобто проекційна відстань між ними;
- довжина корпусу – довжина тіла за врахуванням довжини нижніх кінцівок;
- довжина верхньої кінцівки – різниця висот акроміальної і пальцевої точок, тобто проекційна відстань між ними;
- довжина плеча – різниця висот плечової і променевої точок, тобто проекційна відстань між акроміальною і променевою точками;
- довжина передпліччя – різниця висот променевої і шилоподібної точок, тобто проекційна відстань між ними;
- довжина кисті – різниця висот шилоподібної і пальцевої точок, тобто проекційна відстань між ними;
- довжина нижньої кінцівки – напівсума висот передньої клубово-остистої і лобкової точок;
- довжина стегна – довжина нижньої кінцівки за врахуванням висоти верхньо-берцової точки;
- довжина гомілки – різниця висот верхньо-берцової і нижньо-гомілковою точок, тобто проекційна відстань між ними;
- довжина стопи – відстань між п'яточною і кінцевою точками.

Вимір поперечних розмірів сегментів тіла людини

Поперечні розміри сегментів тіла людини визначають як відстань між , орієнтованими у трансверсальній площині, а глибинні розміри – як відстань між , орієнтованими в сагітальній площині. В поперечних і глибинних

розмірів проводять товстотним циркулем або верхньою штангою антропометра. У 1-му випадку точність виміру складає 0.5 см, у другому – 0.1 см.

При цьому визначають в основному такі діаметри:

- акроміальний (ширину плечей) – відстань між правою і лівою акроміальними точками;
- тазовий (ширину тазу) – відстань між двома повздожно-гребневими точками;
- поперечний (середньо-грудинний) – відстань між найбільш виступаючими частками ребер (по середніх пахвових лініях);
- передньо-задній (середньо-грудинний) – найбільша відстань між середньо-грудинною та остистим відростком хребця, що лежить у цій же горизонтальній площині;
- поперечний для дистальної плеча – найбільша відстань між латеральним і медіальним надмищелками плечової кістки;
- поперечний для дистальної частки передпліччя – найбільша відстань між шилоподібними відростками променевої і ліктьової
- поперечний для дистальної частини стегна – найбільша відстань між медіальним і латеральним надмищелками стегнової
- поперечний для дистальної частини гомілки – найбільша відстань між виступаючими точками лодижок великої берцової та малої гомілкової.

Визначення положення тіла людини у просторі та мас-геометричних характеристик біомеханічних систем необхідно для складання фізичних моделей тіла людини.

2.2. Сили в біомеханіці

Міра біомеханічної дії на матеріальні об'єкти називається силою. Сила визначається вектором, що має точку прикладення, напрям і величину(модуль вектору). Сили в системі СІ вимірюють в ньютонках - [Н].

Сили, з якими зв'язки діють на об'єкти, називаються реакціями в'язей.

Сукупність сил, що діють на об'єкт, називають системою сил.

Зовнішні і внутрішні сили. Рух тіла людини і його окремих ланок в просторі, будь-яка зміна швидкості руху механічних об'єктів, збереження і зміна пози людиною, забезпечується за рахунок зовнішніх і внутрішніх сил.

Зовнішні сили - це ті сили, які діють на тіло людини і його ланки з боку зовнішніх для них об'єктів, наприклад, опор, поля сил тяжіння (гравітаційного поля), докілья (повітря, вода і тому подібне) і інших.

Внутрішні сили - це ті сили, з якими елементи і тіла взаємодіють між собою усередині біомеханічної системи. Наприклад, для тіла людини - це сили тяги м'язових груп.

Розділення сил на зовнішні і внутрішні встановлюють при виборі сукупності елементів, що становлять біомеханічну систему.

Так, якщо розглядати рух руки і в систему включити верхню кінцівку, а саме кисть, передпліччя і плече, то сили тяги м'язів, що сполучають руку і тулуб, діють з боку тулуба можна вважати зовнішніми, а сили тяги м'язів, що сполучають плече і передпліччя - внутрішніми.

Тіло називається вільним, якщо на його переміщення в просторі не накладено обмежень, інакше воно називається скованим. Обмеження, накладені на тіла, точки і біомеханічні системи, називають в'язами.

Сила – векторна величина, що є мірою механічного впливу одного тіла на інше в даний час. Чисельно вона визначається добутком маси тіла та його прискорення, викликаного цією силою.

Момент сили – це міра дії, що обертає сили на тіло. Він визначається твором сили та її плеча щодо осі обертання.

У біомеханіці розглядають три типи зовнішніх сил:

- сили взаємного притягування між тілами, які називаються гравітаційними силами. Вони діють на відстані і називаються дистантними;
- сили, які обумовлені деформацією контактуючих тіл (вони називаються пружними силами). До них відносять сили, які діють на тіло з боку розтягнутої або стиснутої пружини, сила, з якою підвіс діє на прив'язаний до його кінця вантаж тощо;
- сили, які виникають лише при контакті тіл і обумовлені поверхневими явищами – контактні сили тертя.

Розглянемо сили і реакції у біомеханічних системах.

Сила тяжіння

Рухи будуються, виходячи з гравітаційної взаємодії. Результатом гравітаційної взаємодії є вага тіла. Відповідно до закону всесвітнього тяжіння сила тяжіння двох тіл, що мають маси m_1 , m_2 і що знаходяться на відстані r один від одного, визначається за формулою.

Сили гравітаційної взаємодії спрямовані вздовж лінії, що сполучає центри мас тіл. У біомеханіці спортивних рухів, зазвичай, враховується лише сила ваги фізичного тіла, оскільки величини гравітаційних сил, що виникають між тілами з масами, можна порівняти з масою тіла людини незначні. Сила ваги тіла визначається добутком маси тіла та прискоренням вільного падіння.

Сила тяжіння, що діє на тіло людини, завжди спрямована вниз і прикладена в загальний центр тяжіння тіла.

Вага тіла – сила впливу тіла на опору чи підвіс у результаті гравітаційного тяжіння. Вага тіла людини прикладена не до неї самої, а до її опори (сила ваги дистантна, вага – контактна сили).

Сила реакції опори

Сила реакції опори – це міра протидії опори на неї тіла, що з нею в контакті (у спокої чи русі). Вона дорівнює силі дії тіла на опору, спрямована у протилежний бік і прикладена до цього тіла.

Людина, перебуваючи на горизонтальній опорі, відчуває протидію своїй вазі. В цьому випадку опорна реакція, як і вага тіла, спрямована перпендикулярно опорі. Це є нормальна реакція опори. Якщо поверхня опори не плоска, то опорна реакція перпендикулярна до площини, що стосується точки опори. Коли вага статична, то реакція опори статична; за величиною вона дорівнює статичній вазі. Якщо людина на опорі рухається з прискоренням, спрямованим вгору, то до статичної ваги додається сила інерції і виникає динамічна реакція опори.

Реакція опори сила пасивна – вона може сама собою викликати позитивні прискорення. Але без неї – якщо немає опори (якщо ні від чого відштовхнутися чи ні до чого притягнутися) – людина не може активно пересуватися. Якщо відштовхуватися від горизонтальної опори не прямо вгору, то сила тиску на опору буде прикладена не під прямим кутом до її поверхні. Тоді реакція опори також не буде перпендикулярна поверхні – її можна розкласти на нормальну і дотичну складові.

Напрямок дотичної реакції опори ще залежатиме від взаємодії дотичних поверхонь. Рівнодійна нормальна і дотична складові називається загальною реакцією опори. Вона лише за вільному нерухомому положенні над опорою (чи під опорою) проходить через ЗЦВ тіла.

Під час рухів, відштовхування чи амортизації загальна реакція опори звичайно проходить через ЗЦВ тіла, утворюючи щодо нього момент. На величину сили реакції опори впливають властивості покриття та матеріал, з якого виготовлено взуття.

Сили пружності

При деформації твердого тіла під впливом прикладених сил з'являються сили пружності. Взаємодія тіл буде пружною лише у тому випадку, коли після зняття навантаження тіло відновлює свою форму за рахунок сил пружності.

Сила пружності прямо пропорційна подовженню тіла і направлена у бік протилежного напрямку тіла при деформації. Мінус означає, що сила пружності завжди спрямована у протилежний бік стосовно деформації.

Коефіцієнт пружності залежить від матеріалу, з якого виконаний предмет, що деформує, а також його розмірів. Рівняння називається законом Гука.

При спортивних вправах виникають пружні взаємодії з такими снарядами, як трамплін для стрибків у воду, поперечина, бруси, місток у спортивній гімнастиці, штучне покриття легкоатлетичної доріжки тощо. Спортсмен деформує об'єкт зовнішнього середовища, з яким взаємодіє, за

рахунок своєї маси та м'язових зусиль, що розвиваються. Об'єкт буде деформуватися до того часу, поки сила деформації стане рівної максимальній силі, з якою спортсмен діє нею. Коли дія деформуючої сили припиняється, потенційна енергія пружної деформації перетворюється на кінетичну, передану тілу спортсмена. У цьому й полягає позитивне вплив пружних об'єктів: запасаючи енергію в попередніх фазах спортивної вправи,

Сили тертя

Сили тертя виникають, коли одне тіло переміщається щодо іншого. Існує кілька різновидів тертя. Найважливіше – це тертя ковзання, що виникає, коли тіло переміщається щодо іншого із деякою швидкістю.

Тертя ковзання існує таких рухах, як ходьба, біг, спортивні метання, спортивні ігри тощо. Його окремим випадком є тертя спокою, що виникає, коли сила, прикладена до тіла, недостатня, щоб зрушити його з місця. Коли зсувна сила досягає певного, властивого конкретним поверхням, що дотикаються, значення, тіло починає ковзати вздовж поверхні. Прикладом тертя спокою є розгін у бобслеї. Однією з різновидів тертя є тертя кочення. Цей вид тертя проявляється при коченні предмета, що перекочується (м'яч, колесо) і пов'язаний з деформацією дороги (прогин) і самого об'єкта (невелике сплюскування).

Розглянемо дію сили тертя кочення з прикладу колеса. При коченні з м'якого покриття колесо вдавлюється в опору, утворюючи ямку, через край якої йому весь час доводиться перекочуватися.

Французький фізик Кулон на основі дослідів виявив, що сила тертя кочення пропорційна силі нормального тиску і обернено пропорційна радіусу колеса. З формули видно, що коефіцієнт тертя кочення залежить від радіусу колеса.

Під час руху по твердому покритті сила тертя кочення пов'язана з деформацією самого колеса. З цією силою особливо доводиться рахуватися у вело- та мотоспорті. Її величина визначається за такою формулою.

Сила тертя кочення набагато менша за силу тертя ковзання, тому колесо широко використовується в різних видах транспорту.

Один з різновидів сил тертя – тертя кручення – проявляється, коли між дотикаються поверхнями є нерухома точка, тобто рух відбувається навколо цієї точки. Так, при метанні молота обертання відбувається на стопі.

Сили тертя у спортивних рухах виконують і позитивну та негативну роль. З одного боку, без сили тертя неможливо забезпечити горизонтальне переміщення тіла спортсмена. У дисциплінах, пов'язаних із бігом, стрибками тощо, прагнуть збільшувати коефіцієнт тертя між спортивним взуттям та поверхнею опори. З іншого боку, у таких видах спорту, як лижні гонки, стрибки з трампліну, швидкісний спуск на лижах, найпершим завданням є зменшення величини тертя.

У тілі людини тертя виникає між м'язами, при взаємному зміщенні органів прокуратури та тканин тощо. Наприклад, у суглобах кістки

стикаються хрящовими поверхнями, між якими в зазорі знаходиться синовіальна рідина, яка виконує роль мастила, тобто зменшує тертя ковзання. Трибологія суглобів (від грец. триб. – терти, логос – наука) – це розділ біомеханіки, що вивчає внутрішньосуглобове тертя.

Тертя в суглобах невелике: коефіцієнт тертя колінного суглоба перебуває у діапазоні 0,01 – 0,02.

Сили опору навколишнього середовища

При виконанні спортивних вправ тіло людини завжди відчуває вплив довкілля. Ця дія може ускладнювати переміщення, так і забезпечувати його можливість. Сила, що діє з боку налітає на тіло потоку, що рухається, може бути представлена у вигляді сили лобового опору, спрямованої в бік, протилежну руху тіла, і підйомної сили, що діє перпендикулярно напрямку руху.

При виконанні спортивних рухів сили опору залежать від щільності середовища ρ , швидкості тіла V щодо середовища, площі тіла S , перпендикулярної потоку навколишнього середовища і коефіцієнта C , що залежить від форми тіла.

Сила лобового опору залежить від швидкості руху більшою мірою, ніж від інших параметрів, що входять до формули. Так, сила лобового опору зростає пропорційно до квадрата швидкості.

Коефіцієнт C залежить від обтічності тіла. Найбільш високе його значення спостерігається у плоского тіла, розташованого перпендикулярно потоку, що налітає.

Окрім лобового опору на тіло може діяти підйомна сила. Вона виникає у разі розташування площини симетрії рушійного тіла під кутом до потоку або за несиметричності тіла. Величина підйомної сили залежить від кута атаки α , утвореного віссю симетрії тіла та вектором швидкості потоку, що налітає.

Підйомна сила чисельно виражається рівнянням.

У процесі спортивних рухів, якщо для них характерні помітні швидкості, або при переміщеннях в умовах водного середовища силами опору необхідно вміти керувати. З цією метою для зменшення опору спортсмен прагне зменшити площу тіла, розташовану перпендикулярно потоку, що налітає, і прийняти обтічній позу. В останньому випадку часто використовуються всілякі пристрої, наприклад, шоломи обтічної форми, спеціальний одяг.

Іноді досягнення високого спортивного результату доводиться діяти навпаки – збільшувати опір руху. Так, якщо простежити зміну техніки стрибків з трампліну на лижах, то видно, що спортсмени використовують так зване V-подібне розташування лиж. Більш ранні варіанти виконання цієї рухової дії передбачали розташування лиж на проекції тіла. Перехід до V-подібного розташування лиж зумовив вихід їх поверхні за проекцію тіла і збільшення площі, що взаємодіє з потоком, що налітає. В результаті сила опору збільшується, і політ лижника стає більш тривалим за часом,

одночасно при оптимальній позі зростає підйомна сила, що призводить до збільшення відстані.

У деяких видах спорту сили опору є одночасно й рушійними та перешкоджаючими руху. Це відноситься до плавання та всіх видів греблі. Тут принцип руху заснований на більш високому опорі, що діє на кінцівку, що гребує, або весло в напрямку руху спортсмена або човна, ніж на тіло або човен у протилежному напрямку. Тому, наприклад, човен робиться максимально обтічної форми, а весло, навпаки, має форму, що забезпечує максимальний опір його просування.

Сила лобового опору, що діє тіло спортсмена як ціле, має точку докладання. Така точка називається центром поверхні тіла. Якщо тіло переміщається в середовищі, воно прагне повернутися так, щоб ЗЦВ і центр поверхні опинилися на одній прямій. Сила лобового опору та підйомна сила мають динамічний характер, тобто виникають із появою швидкості.

Крім динамічних сил опору на тіло людини завжди діє сила статичного характеру – виштовхувальна чи сила Архімеда. Сила Архімеда залежить від величини об'єму тіла або його частини V , щільності середовища ρ , в яке вони занурені та прискорення вільного падіння g .

Величина сили, що виштовхує, має помітну величину при знаходженні тіла у воді або іншій рідині. Для повітряного середовища, у зв'язку з незначною щільністю повітря, сила, що виштовхує, що діє на тіло людини, має дуже мале значення і, як правило, при аналізі рухових дій не враховується. Виштовхувальна сила прикладена до точки, яка називається центром об'єму тіла. Ця точка може не збігатися з ЗЦВ, у зв'язку з чим тіло, занурене у воду може прагнути повернутись так, щоб сила ваги та виштовхувальна сила опинилися на одній лінії.

Якщо виштовхувальна сила більша за силу тяжіння, тіло перебуватиме на поверхні рідини, якщо менше – тонути. Здатність тіла плавати чи тонути можна оцінити, порівнюючи величини щільностей тіла (для тіла спортсмена використовується середня щільність) та рідини. Якщо щільність тіла менша за щільність рідини, воно буде плавати на поверхні. Здатність тіла плавати чи тонути має значення оцінки потенційних можливостей спортсмена.

Сили інерції

Сили інерції дуже специфічні, оскільки немає тіла, з боку якого діють. Причиною виникнення сили інерції є неінерційність системи відліку, щодо якої розглядається рух.

Неінерційною системою відліку є така система, у якій тіло відліку має поступальне прискорення або обертальний рух, рівномірне чи прискорене. Таким чином, для виникнення сил інерції система координат повинна рухатися в просторі як завгодно, але не рівномірно прямолінійно.

Сила інерції, що виникає при поступальному прискореному русі системи відліку, визначається як формула.

У деяких випадках облік сил інерції є дуже важливим. Це стосується аналізу суглобових рухів. Тут під час руху біокінематичних ланцюгів кожне наступне ланка ланцюга перебуває у системі координат, що з попередньою ланкою. У такому разі, при прискореному русі зазначеної системи, а також при її обертанні на ланку, що знаходиться в ній, обов'язково діють сили інерції, для подолання яких потрібна додаткова робота м'язів.

Сили інерції можуть вимагати додаткових м'язових сил, а й розвантажувати м'язи, коли сили інерції діють у напрямку з необхідною технікою руху. Таким прикладом є "ривок" у важкій атлетиці, коли при виконанні розгону штанги на кисті рук діє не тільки сила тяжіння снаряда, а й сила інерції, що виникає при прискореному переміщенні системи кистіштанга. При виконанні наступної фази ривка штанги сили інерції, пов'язані з рухом снаряда вгору, створюють розвантаження м'язів ніг і спортсмен отримує можливість підсісти під снаряд, зафіксувати його над головою і приступити до завершальної фази даного рухового дії.

Сили інерції, що виникають при обертальному русі системи відліку, мають кілька різновидів:

- 1) сили інерції, що виникають через власне обертання системи відліку (відцентрові сили);
- 2) сили, інерції, що виникають через нерівномірність обертання системи відліку;
- 3) сили інерції, що виникають при переміщенні тіл щодо системи відліку, що обертається (сили Коріоліса).

Сили інерції, пов'язані з обертанням системи відліку, мають значення при аналізі спортивних рухів. Всі суглобові рухи, що виконуються в процесі рухової дії, створюють умови для виникнення сил інерції, що сприяють або запобігають необхідним змінам пози.

Відцентрова сила інерції для тіла маси m центр мас якого розташований на відстані r від початку відліку, у разі обертання системи з кутовою швидкістю ω щодо осі проходить через початок відліку визначається за формулою.

Відцентрова сила спрямована вздовж радіусу, що з'єднує центр мас тіла та початок системи координат. Прикладом відцентрової сили є сила, що натягує трос під час метання молота. Відцентрові сили виникають і при виконанні акробатичних елементів на кшталт сальто. В даному випадку вони прагнуть розпрямити тіло спортсмена, що обертає.

Сили інерції, пов'язані з нерівномірністю обертання системи відліку, визначаються як деякої формули. Напрямок цієї сили перпендикулярно радіусу, що з'єднує центр мас тіла та початок координат.

Сили Коріоліса виникають при русі тіла щодо системи, що обертає координат. При цьому при русі вздовж радіусу, що з'єднує центр мас тіла і початок системи координат, що обертається, сила буде спрямована в площині обертання перпендикулярно зазначеному радіусу, а при русі в напрямку,

перпендикулярному радіусу, – вздовж нього, накладаючись на дію відцентрової сили.

Сила Коріоліса визначається за такою формулою.

Система відліку може мати поступальне та обертальне прискорення, а тіло може переміщатися щодо неї. У цьому випадку, розглядаючи рух тіла щодо такої системи відліку, необхідно враховувати одночасну дію всіх перерахованих сил інерції. Приклад такої ситуації – динаміка руху біокінематичних ланцюгів, що становлять тіло людини.

Інерційні характеристики тіла

Інерційні характеристики розкривають особливості тіла людини та рухомих їм тіл у їх взаємодіях. Всі фізичні тіла мають властивість інертності (або інерції), що проявляється у збереженні руху, а також в особливостях зміни його під дією сил.

Маса – це міра інертності тіла під час поступального руху. Маса вимірюється відношенням величини прикладеної сили до викликаного нею прискорення. Маса тіла характеризує, як саме прикладена сила може змінити рух тіла. Одна й та сама сила викличе більше прискорення у тіла з меншою масою, ніж у тіла з більшою масою.

Момент інерції – це міра інертності тіла під час обертального руху. Для матеріальної точки маси m , розташованої з відривом r від осі обертання, момент інерції визначається формулою. Момент інерції буде більшим, коли його частинки далі від осі обертання, а значить, кутове прискорення тіла під дією того ж моменту сили менше; і навпаки, якщо частинки ближчі до осі, то кутове прискорення більше, а момент інерції менше. Значить, якщо наблизити тіло до осі, то легше викликати кутове прискорення, легше розігнати тіло у обертанні, легше зупинити його. Цим користуються під час руху навколо осі.

Якщо вісь обертання не проходить через ЗЦВ тіла або взагалі не пов'язана з тілом, то момент інерції щодо цієї осі (повний момент інерції тіла) можна уявити, що складається з двох доданків: центрального моменту інерції тіла щодо осі, що проходить через ЗЦВ і паралельної цієї зовнішньої осі, та суми добутку мас тіла на квадрат відстані між цими осями.

Для тіл правильної форми існують спеціальні формули визначення моментів інерції.

Найменший момент інерції тіло людини має у випрямленому стані щодо поздовжньої осі тіла, що проходить через його ЗЦВ.

Цілеспрямована зміна моменту інерції тіла людини широко використовується при керуванні обертальними рухами у різних видах спорту. Можливості впливу спортсмена на величину моменту інерції щодо осі обертання дозволяє істотно впливати на кутову швидкість обертального руху.

Визначення сили чи моменту сили, якщо відома маса чи момент інерції, дозволяє дізнатися лише прискорення, тобто як швидко змінюється швидкість. Але ще необхідно дізнатися, на скільки саме зміниться швидкість. І тому має бути відомо, як довго була прикладена сила, тобто слід визначити імпульс сили (або його моменту).

Кількість руху (імпульс) – це міра поступального руху тіла, що характеризує його здатність передаватися іншому тілу як механічного руху. Кількість руху тіла вимірюється добутком маси тіла та його швидкості.

Імпульс сили - це міра впливу сили на тіло за проміжок часу (у поступальному русі). Він дорівнює добутку сили та тривалості її дії. Будь-яка сила, прикладена навіть у малі частки секунди (наприклад, удару по м'ячу), має імпульс. Внаслідок імпульсу сили виникають зміни руху, що залежать від інерційних властивостей тіла і проявляються у зміні швидкості (кількість руху). Саме імпульс сили визначає зміну швидкості, а силою обумовлено лише прискорення.

У обертальному русі момент сили, діючи протягом певного часу, створює імпульс моменту сили.

Імпульс моменту сили – це міра впливу моменту сили щодо даної осі за цей проміжок часу (у обертальному русі).

Кінетичний момент (момент кількості руху) – це міра обертального руху тіла, що характеризує його здатність передаватися іншому тілу як механічного руху. Кінетичний момент дорівнює добутку моменту інерції щодо осі обертання на кутову швидкість тіла.

Відповідна зміна кількості руху відбувається під дією імпульсу сили, під дією імпульсу моменту сили відбувається певна зміна кінетичного моменту (моменту кількості руху).

Таким чином, до раніше розглянутих кінематичних заходів зміни руху (швидкості та прискорення) додаються динамічні заходи зміни руху (кількість руху та кінетичний момент). Разом із заходами дії сил вони відображають взаємозв'язок сил та руху. Їхнє вивчення допомагає зрозуміти фізичні основи рухових дій людини.

2.3. Кінематичні характеристики руху

Кінематика – це розділ теоретичної механіки, в якому вивчається рух механічних систем з геометричної точки зору, без урахування причин (сил), що викликають цей рух та зміну руху

Кінематичні характеристики тіла дають можливість порівнювати розміри тіла та його ланок, а також кінематичні особливості рухів

Положення тіла, його рух у просторі може бути визначено щодо іншого незмінного тіла. З ним пов'язують обрану систему відліку — систему координат, у якій визначають параметри руху.

Встановлення способів, за допомогою яких може бути заданий рух точок або тіл по відношенню до обраної системи відліку, дозволить визначити кінематичні характеристики руху (траєкторії точок, їх швидкості, прискорення, кутові параметри тел.)

Рух будь-якої механічної системи щодо обраної системи відліку буде відомий, якщо відомий рух кожної точки цієї системи. Тому вивчення розділу "Кінематика" починається з теми "Кінематика точки", далі розглядається тема "Кінематика твердого тіла".

Система відліку. Визначення положення точки у просторі

Усі переміщення тіла можна виміряти, базуючись на порівнянні становища якогось тіла чи точки відліку, тобто всі рухи розглядаються як відносні, тому необхідно вибрати системи відліку відстані та часу. Системою відліку називається тіло, що умовно вважається нерухомим, щодо якого визначають положення інших тіл у різні моменти часу. Таке тіло називається тілом відліку. Як тіло відліку вибирають нерухомі щодо Землі тіла (підлога спортивного залу, доріжка стадіону, гімнастичні снаряди тощо). Для практичного визначення положень тіла у просторі вводяться такі поняття, як початок відліку відстані, напрямок відліку відстані та одиниці відліку. Як початок відліку використовується точка, вибрана на тілі відліку. Напрямок відраховується до осей координат, проведеним з обраного початку, а як одиниця відліку відстаней використовується метр. Рух у просторі відбувається з часом. У поняття системи відліку часу входять такі поняття, як початок відліку часу та система координат.

Напрямок відліку та одиниці.

У біомеханіці для дослідження рухів як початку відліку часу зазвичай вибирається початок фази руху. Напрямок відліку часу може бути обраний залежно від розв'язуваної задачі як від початку відліку, так і в зворотному напрямку. Як одиниця відліку часу використовується секунда.

Системи відліку поділяються на дві групи: інерційні та неінерційні. Інерційними системами відліку вважаються такі, щодо яких тіло, яке не піддається впливу інших тіл, зберігає свій стан спокою або рівномірного прямолінійного руху. У природі не існує суворо інерційних систем відліку, проте з певним ступенем наближеності при аналізі спортивних рухів такою можна вважати систему, пов'язану з поверхнею землі, підлогою спортивної зали тощо. Для опису положення точки у просторі має бути обрана система відліку спільно з початком відліку, напрямом та одиницями.

Найпростішою системою відліку є природний спосіб, у якому відлік ведеться на відстані, пройдену точкою вздовж траєкторії. Найбільш популярна прямокутна система декартових координат, у якій положення матеріальної точки у просторі описується її координатами на трьох взаємно перпендикулярних осях: Ox , Oy , Oz .

Існують і інші способи завдання положення точки в просторі:

– векторний, при якому положення точки визначають радіус-вектором, проведеним з центру даної системи координат до точки, що цікавить (використовується в навігації, орієнтуванні тощо);

– полярний, коли відстань визначають довгою вектора, а напрямком – кутом між вектором та прийнятим вихідним напрямком (полярна вісь).

Полярний спосіб використовується в вітрильному спорті та спортивному орієнтуванні.

Просторові характеристики руху

Просторові характеристики дозволяють визначити вихідне і кінцеве становища під час руху, різницю між ними, їх зміни, тобто. це показники, загалом що визначають просторову форму рухів людини. До просторових характеристик руху відносяться траєкторія, шлях, переміщення.

Траєкторія точки – це уявний слід точки тіла при її русі під час виконання рухової дії. Траєкторія може бути прямолінійною та криволінійною. Кривизна траєкторії показує форму руху у просторі. Щоб визначити кривизну траєкторії вимірюють радіус кривизни. Якщо траєкторія є дугою кола, радіус кривизни постійний. По траєкторії можна судити про ефективність рухової дії.

Шлях – відстань, що проходить точкою вздовж траєкторії (довжина траєкторії).

Переміщення буває лінійним та кутовим. Лінійне переміщення - відрізок прямий, що сполучає початкове та кінцеве положення точки. Переміщення – величина векторна. Вона характеризується чисельним значенням (модулем) та напрямком. Якщо після руху точка повернулася у вихідне положення, переміщення дорівнює нулю.

У процесі виконання спортивних рухів точки тіла можуть змінювати своє кутове положення щодо обраної системи координат. Для аналізу таких ситуацій використовують поняття кутове переміщення. Кутовим переміщення – різниця кутових координат кінцевого та початкового положення розглянутої точки. Напрямок кутового переміщення визначають за правилом буравчика. Переміщення тіла людини, що змінює своє становище, визначити набагато складніше. У спрощених випадках його рух розглядають як рух однієї матеріальної точки – загального центру ваги тіла. Тоді можна простежити за переміщенням тіла людини «загалом», оцінити загальний результат її рухової діяльності. Проте залишається невідомим, у яких саме рухів досягнуто переміщення загального центру ваги тіла.

Вивчення рухів ланок тіла людини дозволяє докладніше розглянути переміщення тіла. У деяких випадках кілька рухливих ланок розглядають як цілу частину – тоді можна в загальних рисах вловити особливості рухів, хоча взаємна дія багатьох ланок не враховується та їх деформацією нехтують.

Часові характеристики руху

Будь-які переміщення фізичних тіл відбуваються у просторі з часом. Часовий аспект руху особливо важливий у спорті, де змагальний результат дуже часто залежить від часу проходження дистанції, вчинення тієї чи іншої рухової дії.

Часові характеристики розкривають рух у часі: коли він почався і закінчилося, як довго тривало, як часто виконувався рух, як вони були побудовані у часі. Разом із просторово-часовими характеристиками вони визначають характер рухів людини.

До часових характеристик руху належить: час, тривалість руху, темп і ритм.

Момент часу t визначається кількістю одиниць часу, що пройшли від початку його відліку до ситуації, що цікавить. Зазвичай позначається t_1 , t_2 тощо. Момент часу визначають як початку і закінчення руху, але й інших важливих миттєвих положень. Насамперед це моменти суттєвої зміни руху (наприклад, початок та кінець фази руху). За моментами часу визначають тривалість руху.

Проміжок часу Δt визначається як різниця двох послідовних моментів часу/

Тривалість руху Δt – це проміжок часу, що минув від початку руху до моменту його закінчення/

Темп руху – тимчасова характеристика, що використовується для циклічних дій, що показує, скільки рухів виконується в одиницю часу. Темп – величина, обернена до тривалості рухів. Чим більша тривалість кожного руху, тим менший темп, і навпаки. У циклічних рухах темп може бути показником досконалості техніки. Наприклад, частота рухів лижників, плавців, веслярів високої кваліфікації (за більш високої швидкості пересування) більша, ніж менш підготовлених. Зі стомленням темп рухів змінюється: він може підвищуватися (наприклад, при зменшенні довжини кроку в бігу) або знижуватися (наприклад, при нездатності підтримувати його).

Ритм – співвідношення тривалостей елементів дії. Ритм рухів характеризує, наприклад, відношення часу опори до часу польоту в бігу або часу амортизації (згинання коліна) часу відштовхування (випрямлення ноги) при опорі. Зі зміною темпу кроків змінюється та його ритм. Ритм у разі можна як відносини тривалостей його елементів. Щоб визначити ритм, виділяють фази, які розрізняються за завданням руху, його напрямку, швидкості, прискорення та інших характеристик. Ритм відображає зусилля, що додаються, залежить від їх величини, часу докладання та інших особливостей рухів. Тому за ритмом рухів можна певною мірою судити про їхню досконалість. У ритмі особливо важливі акценти – великі зусилля та прискорення – їхнє розміщення у часі. При оволодінні вправами іноді краще спочатку задати ритм, чим докладно описувати деталі рухів; це допомагає швидше зрозуміти особливості досліджуваного вправи, його побудова у часі.

Крім тимчасових можна визначити ще просторові показники ритму (наприклад, відношення довжини випаду за крок на лижах до довжини ковзання).

Просторово-часові характеристики руху

За просторово-часовими характеристиками визначають, як змінюються положення та рухи тіла у часі. При біомеханічному аналізі спортивних рухів найважливіше значення мають просторово-часові характеристики – швидкість і прискорення.

Швидкість – векторна величина, що характеризує, наскільки швидко змінюється положення тіла у просторі з часом. Напрямок вектора швидкості збігається з напрямком переміщення вектора. Знак швидкості залежить від переміщення знака. У механіці застосовуються два варіанти визначення швидкості. Швидкість може бути середньою та миттєвою. Середня швидкість характеризується переміщенням тіла у просторі за відносно великий проміжок часу. Однак така швидкість не відображає характерних рис проходження дистанції: вона не показує, як змінювалася швидкість на початку, по ходу дистанції, на фініші. Найбільш точно рух тіла характеризує миттєва швидкість. Вона визначається ставленням переміщення тіла за гранично малий проміжок часу до величини цього проміжку.

У математичних термінах миттєва швидкість є першою похідною за часом від переміщення. При виконанні спортивного руху швидкість тіла людини завжди змінюється з часом. Для характеристики цього запроваджується поняття прискорення.

Прискорення – векторна величина, що характеризує швидкість зміни швидкості за модулем та напрямом. Напрямок вектора прискорення співпадає з напрямком вектора зміни швидкості. Прискорення буде позитивним, коли швидкість зростає. При зменшенні швидкості прискорення негативне. Прискорення, як і швидкість, може бути середнім та миттєвим. Усе залежить від величини проміжку часу, протягом якого визначається характер зміни швидкості. Для середнього прискорення період часу має кінцеву вимірну величину. При знаходженні миттєвого прискорення проміжок часу має бути нескінченно малим. Миттєве прискорення в математичних термінах визначається як перша похідна за часом від швидкості або друга похідна за часом від переміщення точки.

При виконанні рухових дій тіло може здійснювати складне рух, у якому змінюється як лінійне, а й кутове розташування тіла щодо обраної системи координат. Характер зміни кутового положення тіла визначається такими поняттями як кутова швидкість та кутове прискорення. Кутова швидкість, як і лінійна, може бути середньою та миттєвою.

Кутова швидкість – векторна величина, що характеризує зміну кутового положення тіла щодо системи координат з часом. При знаходженні миттєвого значення кутової швидкості проміжок часу має бути нескінченно малим.

При виконанні спортивних вправ кутова швидкість зазвичай змінюється. Для характеристики зміни кутової швидкості запроваджується поняття кутового прискорення.

Кутове прискорення – векторна величина, що характеризує зміну кутової швидкості за одиницю часу. І також залежно від проміжку часу може бути середньою та миттєвою.

При здійсненні кутового переміщення тіло має певне значення лінійної швидкості.

Під час криволінійного руху тіло завжди має прискорення, яке розкладається на напрямки: 1) перпендикулярне швидкості (відцентрове прискорення); 2) паралельне швидкості (тангенціальне прискорення).

Центрошвидке прискорення – прискорення, що характеризує зміна напрямку вектора швидкості, не впливаючи на його чисельне значення. Вектор доцентрового прискорення спрямований перпендикулярно швидкості до центру кола. Якщо швидкість тіла, що рухається по колу, змінюється за величиною, то поряд з доцентровим прискоренням присутнє і тангенціальне прискорення.

Тангенціальне прискорення, крім радіусу обертання, залежить і від кутового прискорення. Тангенціальне прискорення завжди спрямоване по дотичній до кола, і якщо швидкість збільшується його напрямком, збігається з напрямком руху. Якщо ж швидкість зменшується, то напрямком тангенціального прискорення протилежний вектору швидкості. Вектори доцентрового і тангенціального прискорень перпендикулярні один одному, а їх сума дає вектор повного прискорення.

Швидкість тіла людини, що змінює своє становище, визначають як лінійну швидкість загального центру ваги тіла. Іноді визначають лінійні швидкості точок ланок тіла. Крім того, при зміні пози визначають кутові швидкості ланок тіла щодо суглобових осей; ці швидкості зазвичай змінюються в процесі руху. Для біомеханічного обґрунтування техніки необхідно у кожному разі вибрати, які швидкості, яких ланок і точок слід визначити. Прискорення тіла людини, що змінює своє становище, визначається складніше, ніж швидкість. Прискорення є показником якості докладених зусиль.

Положення тіла у просторі

Положення у просторі фізичних тіл визначається положенням їх точок. Для визначення положення тіла спортсмена в просторі достатньо вказати розташування в системі відліку однієї точки. Цією точкою є загальний центр ваги людини (ЗЦВ).

Загальний центр ваги всього тіла – це уявна точка, до якої прикладено рівнодіючу силу тяжіння всіх ланок тіла. Так як тіло людини не є незмінним твердим тілом, а являє собою систему рухомих ланок, то положення ЗЦВ визначатиметься головним чином позою тіла людини (тобто взаємним відносним становищем ланок тіла) і змінюватиметься із зміною цієї пози.

Висота положення ЗЦВ у різних людей значно варіює залежно від цілого ряду факторів, до яких насамперед належить стать, вік, спортивна спеціалізація та інше.

2.4. Енергетичні характеристики в біомеханіці

Сили, прикладені до твердого тіла, виконують механічну роботу, змінюючи положення та швидкість руху його частин і змінюючи тим самим його механічну енергію. Робота характеризує процеси зміни енергії системи.

Енергія, у свою чергу, характеризує стан системи, який може змінюватися лише внаслідок виконання над нею роботи.

Механічна енергія – це запас роботоздатності біомеханічної системи – кількісна характеристика її механічного стану. Механічна енергія твердого тіла змінюється, якщо на нього діють зовнішні сили та моменти.

Енергія, яка визначається взаємним розташуванням тіл (або частин тіла), між якими діють консервативні сили (наприклад, сили гравітаційного притягання), називається потенціальною енергією. Потенціальну енергію мають тіла, які підняті над площиною відліку, а також zdeформовані (розтягнуті, стиснуті, зігнуті чи скручені) пружні тіла. Для тіл, які знаходяться на поверхні Землі, потенціальна енергія звичайно (але не завжди) приймається рівною нулю. Потенціальну енергію E_p тіла в полі сил тяжіння, піднятого на висоту h , визначають за формулою:

Потенціальна енергія в полі сил тяжіння залежить від розташування тіла (чи системи тіл) відносно поверхні Землі, або прийнятої нами для розрахунку горизонтальної поверхні, відносно якої і визначається потенціальна енергія в даному випадку.

Потенціальна енергія пружнодеформованої системи залежить від відносного розташування її частин і визначається за формулою

При зміні розташування тіла (його піднімання чи опускання, зміні пози тощо), його потенціальна енергія переходить в кінетичну. Енергія руху, яка визначається швидкістю тіла, називається кінетичною енергією. Кінетична енергія – це енергія механічного руху тіла. При поступальному русі вона пропорційна масі тіла та квадрату його швидкості:

При обертовому русі кінетична енергія тіла вираховується за іншою формулою:

Сума потенціальної, кінетичної і пружної енергії твердого тіла становить його повну механічну енергію. При відсутності дії зовнішніх сил, повна механічна енергія системи твердих тіл не змінюється.

Механічна робота сили – це міра дії сили на тіло при його деякому переміщенні під дією цієї сили. Величина роботи сили над тілом визначається скалярним добутком її величини (модуля) на величину переміщення точки прикладання цієї сили в напрямку її дії.

У загальному випадку, коли сила з плином часу змінюється, а траєкторія руху точки криволінійна, робота сили є сумою елементарних робіт:

Якщо сила напрямлена у бік руху тіла (або під гострим кутом до напрямку його руху), вона виконує додатню роботу, збільшуючи енергію тіла. Сили, напрямом яких співпадає з напрямком переміщення тіла, називають рушійними силами або силами тяги. Коли ж сила напрямлена проти напрямку руху тіла (або під тупим кутом до його переміщення), то робота цих сил – від'ємна, а енергія тіла зменшується. Такі сили називають гальмівними – це сили опору рухові або тертя.

Сили, які за напрямком дії перпендикулярні механічному переміщенню, називаються нормальними. Нормальні сили роботу не виконують.

Робота сили тяжіння залежить від початкового і кінцевого розташування тіла і не залежить від форми і довжини траєкторії – вона визначається зміною положення тіла відносно Землі:

При опусканні тіла робота сил тяжіння додатня, а при підніманні – від'ємна.

Робота сил тяжіння при русі матеріальної точки по замкнутій траєкторії рівна нулю. Сили, робота яких по замкнутому контуру рівна нулю, називаються консервативними. Сила тяжіння є консервативною силою.

Консервативною силою є також сила пружності. Робота сил пружності при деформації (розтягу, стиску, згині чи закручуванні) пружного тіла з коефіцієнтом жорсткості k на величину вираховується за формулою:

Робота сили при обертовому русі на кінцевому шляху залежить від моменту сили $M(F)$ і кутового переміщення φ :

Роботу при повороті тіла на кут φ при обертовому русі у випадку постійного моменту сили $M(F)$ визначають наступним способом

При розрахунку енергії біомеханічної системи чи її частин часто визначають потужність механічної роботи. Потужність – це міра інтенсивності роботи, що характеризує її кількість, виконану за одиницю часу. Потужність – це векторна величина, що визначається, як відношення роботи до часу, протягом якого вона здійснювалась:

Потужність роботи над тілом у випадку його прямолінійного рівномірного руху визначається за формулою

Потужність у випадку рівномірного обертання тіла визначають за формулою:

Ефективність прикладання сил в класичній механіці визначають за величиною коефіцієнта корисної дії (К.К.Д.), який розраховується, як відношення корисної роботи (A_k) до всієї затраченої роботи (A_z) рушійних сил, і може приймати значення від «0» до «1»

Чим більший К.К.Д., тим ефективніший рух.

Ще в середині XIX століття фахівці намагалися оцінити механічну ефективність м'язової роботи (знайти біологічний аналог коефіцієнта корисної дії механізмів). Запропонований показник – відношення зовнішньої механічної роботи $A_{зовн.}$ до загальних (валових) енерговитрат організму – назвали коефіцієнтом механічної ефективності (К.М.Е.):

У поняття валові енерговитрати організму входять:

енергозабезпечення зовнішньої (видимої нам) механічної роботи, основного обміну; посиленої активності фізіологічних систем при активній м'язовій роботі; активності м'язів, що утримують позу, рівновагу тощо; додання сил тертя в організмі і т. ін.

Виділити із знаменника енерговитрати, які безпосередньо не стосуються зовнішньої механічної роботи, дуже важко. Різні дослідники вираховували енерговитрати на основний обмін, витрати енергії у стані спокою (лежачи, сидячи або в робочій позі), або на «холостому ході» (тобто, при виконанні вправи без зовнішнього навантаження), наприклад: робота на велоергометрі без навантаження, ходьба по горизонтальній поверхні тощо.

Проте, одержані значення «чистого» (нетто) коефіцієнта К.М.Е. коливалися від 0,19 до 0,45.

У першу чергу, це пов'язане з неврахуванням роботи на переміщення частин тіла при виконанні будь-яких рухових дій, а також відсутністю чіткого фізіологічного смислу вираховування метаболічної енергії спокою з валових енерговитрат. Істинне значення К.М.Е., на нашу думку, повинне лежати у межах 0,35 – 0,45, що підтверджується термодинамічними розрахунками та іншими біологічними фактами. Тобто, в чисельнику для виразу К.М.Е. повинна бути сума зовнішньої механічної роботи і роботи на переміщення частин тіла (яка також повинна бути віднесена до зовнішньої роботи). У знаменнику – із значення загальних енерговитрат організму (які можна визначити методом прямої калориметрії), доцільно вираховувати енергію на основний обмін.

Для практики певний інтерес представляє так званий "дельта"-коефіцієнт:

Застосування дельта – коефіцієнта механічної ефективності дозволяє уникнути абсолютної похибки при експериментальному визначенні загальних енерговитрат організму при м'язовій роботі.

Не слід плутати К.М.Е., що визначається рівнем досконалості м'язового апарату, його енергозабезпечення та керування ним (аналог К.К.Д. для м'язів і систем забезпечення їх роботи), з коефіцієнтом використання механічної енергії (доцільністю використання Азовн. з метою розв'язання рухового завдання).

У класичній механіці використовують два основних способи розрахунку величини виконаної роботи:

- а) вираховують скалярний добуток векторів сили та переміщення точки її прикладання;
- б) коли не всі сили, які діють на тіло, нам відомі, величину роботи, виконаної над ним, визначають за зміною його механічної енергії.

Основна складність розрахунку роботи на переміщення частин тіла пов'язана з тим, що тіло людини є так званою неконсервативною системою, в якій одна частина механічної енергії розсіюється, а інша – зберігається та використовується у наступних рухах.

Розглянемо можливі шляхи збереження енергії в тілі людини:

- а) перехід кінетичної енергії (енергії руху) окремих його частин у їх потенціальну енергію (енергію розташування в полі сил тяжіння);
- б) перехід механічної енергії від однієї частини тіла до іншої;
- в) накопичення енергії в послідовних пружних компонентах (сухожилках і сарколемі) пасивно розтягваних м'язах (аналогічно накопиченню енергії у пружинах, що деформуються) з наступним її повернення (ураховуючи часткові втрати на релаксацію з плином часу) в систему з метою виконання рухового завдання;
- г) зворотнє перетворення механічної роботи в хімічну енергію.

2.5. Особливості вимірювання біомеханічних характеристик

Для вивчення рухів у біомеханіці застосовуються специфічні для неї (біомеханічні) методи. У разі потреби використовують методи і суміжні науки: біологічні, психологічні, педагогічні, математичні та ін. Біомеханічні методи дозволяють одержувати кількісні характеристики рухів і виявляти їхню взаємну залежність. Це забезпечить системний аналіз, а також системний синтез рухів як основний шлях їхнього вивчення.

Біомеханічний аналіз являє собою один із способів вивчення рухової діяльності людини. Це ефективний логічний прийом вивчення складних і багатовимірних систем, за допомогою котрого рухи людини ніби розчленовуються на складові частини, що потім досліджуються диференційовано для більш глибокого їх пізнання як єдиного цілого. Разом з тим біомеханічний аналіз не зводиться до простого розчленування складних об'єктів, котрі вивчаються, на їхні складові елементи. Біомеханічний аналіз – це тільки початок об'єктивного дослідження руху. За ним іде слідом біомеханічний синтез – моделювання складних систем рухів з метою використання їх у різних напрямках медицини, ергономіки та прикладної дидактики рухової діяльності людини.

Для того, щоб дослідити рухи людини, вимірюють кількісні показники механічного стану і рухової функції її тіла та самих рухів. Для цього використовують біомеханічні характеристики.

Біомеханічні характеристики рухів тіла людини – це міри механічного стану біосистеми та його зміни (поведінки). Будь-яке об'єктивне вивчення рухів тіла на організменному рівні неможливе без дослідження їхніх біомеханічних характеристик. Механічний стан і поведінка кожної біологічної системи, тим більше такої складної, як тіло людини, відрізняється змінним характером, тому характеристики, що описують її стан, називаються не механічними, а біомеханічними. Ця суттєва особливість дає змогу при

вивченні враховувати біологічну специфіку рухів тіла людини як цілісної біологічної системи.

На практиці звичайно використовують біомеханічні характеристики двох типів – якісні та кількісні. Якісні характеристики дають змогу розрізняти рухи, принципово різні за типами, видами, біомеханічними закономірностями, принципами побудови та особливостями виконання (приклад якісно різних типів рухів – рухи навколо осі та локомоторні рухи). Кількісні характеристики дають змогу розрізняти та зіставляти рухи всередині кожного їх типу, виду тощо. Ці характеристики використовують найчастіше для порівняння зразків одних і тих самих рухів, але виконуваних різними особами. Вимірювання кількісних характеристик таких рухів дає об'єктивну можливість порівнювати якість виконавчої діяльності та визначити рівень рухової майстерності виконавців. Однак якщо якісні характеристики при певному досвіді можна визначити без спеціальної апаратури за допомогою візуального спостереження, то встановлення кількісних характеристик цих рухів вимагає використання досить складної вимірювальної техніки та методики. Кількісні характеристики рухів тіла людини методично зручно поділити на два основних види – біокінематичні та біодинамічні.

Розрізняють системно-структурний і функціональний підходи до аналізу рухової діяльності.

Функціональний підхід дозволяє констатувати ті або інші недосконалості техніки і тактики. Його функція – опанувати процесом керування без повного розкриття його внутрішньої природи. Зрозуміло, що такий шлях ненадійний. Не маючи чітких рекомендацій для усунення недоліків щодо техніки і тактики.

Системно-структурний підхід дає більш конкретні рекомендації. Визначається склад і структура рухової діяльності, тобто з яких елементів вона складається і як вони зв'язані між собою. Крім того, з'ясовують внутрішні механізми, тобто прагнуть відповісти на запитання, чому рухові дії виконані саме так, а не інакше. Найбільш широко розповсюдженим прийомом системно-структурного підходу є виконуваний за визначеними правилами поділ рухової дії на частини (“фази”).

Функціональний і системно-структурний підходи до аналізу й удосконалювання рухової діяльності доповнюють один одного. Застосовуючи системно-структурний підхід, здійснюється аналіз від складного до простого. Елементи рухової діяльності, що знаходяться на нижній сходинці ієрархічної градації, залишаються нерозкритими, недеталізованими і розглядаються вже з позицій функціонального підходу. Рівень, на якому системно-структурний підхід переходить у функціональний, залежить від розв'язуваних завдань.

Усі рухи людини відбуваються у часі та у просторі. Час береться однаковим у будь-якій точці простору, у будь-якій системі відліку. Під простором, у котрому рухається тіло людини, розуміють евклідові

тривимірний простір. При цьому вважається, що маса тіла (кількісна міра інертності її тіла) залишається увесь час незмінною і не залежить від руху.

Процедура аналізу рухової діяльності (біомеханічного аналізу) складається з наступних етапів:

1. Вивчення зовнішньої картини рухової діяльності. Насамперед з'ясовують, з яких рухових дій вона складається і в якому порядку дії впливають одна на одну. Наприклад, шкільний урок фізичної культури складається з ряду вправ. Потрібно враховувати, що характер, тривалість і інтенсивність попередніх вправ впливають на якість виконання наступних.

Вивчаючи зовнішню картину рухової діяльності, реєструють кінематичні характеристики. Особливо важливо знати тривалість окремих частин руху (фаз), графічним відображенням чого є хронограма. Хронограма рухової дії характеризує техніку, а хронограма рухової діяльності – перше, на що звертають увагу при аналізі спортивної тактики.

2. З'ясування причин, що викликають і змінюють рухи. Вони не доступні візуальному контролю, і для їхнього аналізу необхідно реєструвати динамічні характеристики. Найважливіше значення тут мають величини сил, що діють на людину ззовні і вироблені його власними м'язами.

3. Визначення топографії працюючих м'язів. На цьому етапі виявляється, які м'язи і наскільки активно беруть участь у виконанні даної вправи. Знаючи, які м'язи переважно забезпечують рухову діяльність, до якої готує себе людина, можна з безлічі фізичних вправ відібрати сприятливому розвитку саме цих м'язів і їхньої координації.

У залежності від того, яка частина всієї м'язової маси тіла задіяна, розрізняють: глобальну м'язову роботу (більш 2/3 %), регіонарну (від 1/3 до 2/3) і локальну (менш 1/3%). Так, бігуни, плавці, лижники виконують глобальну м'язову роботу. До регіонарної відноситься, наприклад, м'язова робота, виконувана при деяких загальнорозвиваючих гімнастичних вправах (підтягуванні на поперечині, підніманні ніг і верхньої частини тулуба з положення лежачи на спині і т.п.).

Уявлення про те, які м'язи задіяні в кожній вправі, можна одержати реєстрацією їхньої електричної активності. Чим інтенсивніше працює м'яз, тим вища його електрична активність і більша амплітуда електроміограми.

Добре відомо, що різні рухи відрізняються один від одного за кінематикою (зовнішня картина) і динамікою (характер силових взаємодій). Точно так само і електроміографічний портрет рухів неоднаковий у різних вправах. Але, як пише Р. С. Персон, “навіть досить складні рухи, якщо вони досить автоматизовані (наприклад ходьба та інші локомоції, звичайні побутові, професійні і спортивні рухи), мають більш-менш постійний рисунок дії м'язів не тільки при повторенні руху однією людиною, але й у різних людей”.

4. Визначення енергетичних витрат і того, як доцільно витрачається енергія працюючих м'язів. Для відповіді на ці питання реєструють енергетичні характеристики. Поряд із величинами енерговитрат важлива

економічність: чим вище, тим більше частка корисних енерговитрат стосовно усієї витраченої енергії. Помічено, наприклад, що в стаєрів вищої кваліфікації підвищення економічності бігу на 20% переміщає бігуна в списку кращих з 10-го на 1-ше місце.

5. Виявлення оптимальних рухових режимів (найкращої техніки рухових дій і найкращої тактики рухової діяльності) здійснюється на завершальному етапі біомеханічного аналізу. Тут же оцінюється ступінь відповідності реальних і оптимальних варіантів техніки і тактики.

Економічність рухової діяльності пропорційна енергії, затрачуваної на одиницю виконуваної роботи або метр пройденого шляху. Це найважливіший критерій оптимальності.

Механічна продуктивність тим вище, чим більший обсяг роботи виконується за визначений час або чим швидше виконується даний обсяг роботи. Наприклад, у циклічних видах спорту механічна продуктивність оцінюється часом подолання дистанції, а в масовій фізичній культурі – відстанню, що людина може пройти, пробігти або пропливти за 12 хв.

Точність рухових дій має два різновиди: цільова точність і точність відтворення заданої зовнішньої картини рухів (наприклад при виконанні “школи” у фігурному катанні). Цільова точність оцінюється відхиленням точки влучення від центра мішені (наприклад у стрільбі) або відношенням числа успішно виконаних рухових дій до їхнього загального числа (ударів у боксі і спортивних іграх, кидків у боротьбі, передач і прийомів м’яча і т.ін.).

Естетичність оцінюється близькістю кінематики (тобто зовнішньої картини руху) до естетичного ідеалу – загальноприйнятому або прийнятому в даному виді спорту (фігурному катанні, художній гімнастиці, синхронному плаванні і т.ін.).

Комфортабельними вважаються плавні рухи. Чим більше трясеться тіло при ходьбі, бігу і т.ін., тим нижче комфортабельність.

Організація біомеханічного дослідження залежить від визначення завдань і вибору відповідних їм методик.

Завдання біомеханічного дослідження досить різноманітні. Від їхньої постановки залежить не тільки вибір методик, організація дослідження, але і шляхи обробки отриманих даних, напрямок аналізу.

Визначення завдання дослідження значною мірою відповідає на запитання:

- 1) що вивчати (які залежності);
- 2) на якому матеріалі (об’єкті) досліджувати;
- 3) в яких умовах збирати дані;
- 4) яким способом одержувати й обробляти їх.

Методики дослідження (як комплекси характерних методів) вибирають, виходячи із завдання дослідження. Щоб визначити конкретне завдання, потрібно знати існуючі методики, що дозволяють його розв'язати, або можливість їхнього створення. На основі завдання визначають, які характеристики необхідно досліджувати. Одні з них одержують тільки розрахунковим способом як вироблені від зареєстрованих основних характеристик (момент інерції, кінетична енергія, робота, у багатьох випадках також швидкість, прискорення і т.ін.), інші (частіше просторові, тимчасові і силові характеристики) – шляхом безпосередньої реєстрації.

Установивши, які характеристики треба реєструвати, визначають умови збору даних (природні, спеціально створені для експерименту та ін.).

Спостереження в природних умовах тренування і змагань проводять так, щоб вони не стали перешкодою рухам спортсмена. Спостерігач може користуватися вимірювальними приладами (рулетка, секундомір, оптичні системи спостереження) і фото- і кіноапаратурою. Основна умова зорового або інструментального спостереження – одержання об'єктивних даних, що вимагає невтручання в природний хід рухів.

При проведенні експерименту (наукового досліджу) створюються спеціальні умови, в яких розв'язуються визначені в дослідженні завдання. Можна провести природний експеримент, в якому спортсмени будуть знаходитися в строго визначених умовах і при цьому буде забезпечене найменше втручання в їх рухи. При цьому спортсмени, оснащені складною апаратурою, можуть показати навіть високий результат.

У даний час широко застосовують лабораторний експеримент (модельний), починаючи від вивчення закономірностей у змінених і тільки в чомусь істотно подібних рухах і закінчуючи побудовою математичної моделі руху й аналізом її особливостей. Математичне моделювання рухів людини стає самостійним методом виявлення складних залежностей. Обробка зареєстрованих даних про рухи проводиться переважно математичними методами.

Сучасні комплексні методики включають ряд методів реєстрації й обробки даних, що взаємно доповнюють, а іноді і дублюють (для перевірки) один одного.

Той або інший метод дослідження вибирають, виходячи з того, наскільки він забезпечує одержання достовірних і доступних даних.

Необхідно, щоб такий метод:

- а) забезпечував достатню точність вимірювань;
- б) не спотворював рухів, тобто не обтяжував би спортсмена;
- в) був надійним і зручним для застосування;
- г) міг застосовуватися в умовах проведення спостережень або експерименту;
- д) надавав матеріал у формі, зручній для обробки;
- е) був сумісний з іншими необхідними методами і за всіма названими показниками відповідав завданню дослідження.

У біомеханічному дослідженні умовно розрізняють три етапи:

- 1) реєстрація даних (характеристик);
- 2) обробка результатів реєстрації;
- 3) біомеханічний аналіз.

Реєстрація характеристик рухів людини і спонукуваних їм тіл має на меті одержання кількісних даних про досліджувану дію, умови її виконання, його результати, а також про самого спортсмена. Реєструються як механічні характеристики рухів і навколишніх умов (кінематичної і динамічні), так і характеристики самого спортсмена (наприклад розміри тіла, функціональні показники). Звичайно реєструються не одиночні характеристики, а їхня сукупність, для чого застосовується не один, а комплекс методів (методика).

Обробка даних (результатів реєстрації) дозволяє одержати нові дані, що не були прямо зареєстровані (наприклад розрахувати швидкості за даними шляху і часу). Математична обробка дає можливість установити залежності між різними факторами, визначити їхню вірогідність. Нарешті, у результаті обробки даних одержують новий вид (таблиці і графіки), зручний для аналізу, наочний при використанні на практиці.

Біомеханічний аналіз спрямований на встановлення характерних закономірностей, пошуки яких були визначені в завданнях дослідження, і на обґрунтування висновків і рекомендацій. Пошуки закономірностей за традицією називають “аналізом”. Однак, як відомо, аналіз тісно зв’язаний із синтезом: розчленовування цілого на частини обов’язково доповнюється об’єднанням частин у ціле. Отже, біомеханічний аналіз містить у собі і синтез.

Перераховані етапи дослідження не завжди суттєво впливають один на один. Уже при виборі способу реєстрації починається попередній біомеханічний аналіз. У процесі реєстрації характеристик дослідник у міру нагромадження даних шукає залежності. Нарешті, хід обробки наштовхує на нові думки і сам спрямовується завдяки даним попереднього аналізу. Тому поділ на етапи умовний. Він змушує заздалегідь обміркувати хід дослідження, одержавши перші дані, перевірити, чи піддаються вони обробці, а в ході обробки уважно проаналізувати результати.

Реєстрація характеристик завершує шлях сигналу від спортсмена, що рухається, або іншого об’єкта до пункту фіксації (на папері, плівці, екрані і т.п.).

Цей шлях починається з прийняття сигналу за допомогою датчика. Відбувається перетворення сигналу, що несуть із собою рух, напруга або інші фізичні процеси. При кодуванні змінюється носій сигналу. Далі відбувається передача сигналу на відстань, можливі і подальші перетворення сигналу (посилення, перекодування) до надходження в пристрій, що реєструє. Тут сигнал знову перекодується і приймає характер процесу, що залишає ті або інші «сліди» (запис). Кількість пунктів перетворення (включаючи приймання і реєстрацію) буває різною. Передача може бути

механічною, оптичною, звуковою, електричною (по проводах, електромагнітна) та ін. Наприкінці передачі на приладі можлива індикація сигналу, що дозволяє наочно спостерігати його, індикація сигналу з одночасною його реєстрацією або тільки одна реєстрація. Усі ці варіанти подібні, якщо розглядати індикацію (спостереження за стрілкою, променем і т.ін.) як реєстрацію, що не фіксується.

В останні роки широко застосовуються в дослідженнях пристрої, що перетворюють неелектричні сигнали в електричні, котрі передаються по проводах або радіопередавачем і після посилення подаються на осцилограф.

Просторові характеристики (координати, траєкторії) можна вимірювати, а результати вимірювань записувати по ходу виконання руху як безупинно, так і в окремі моменти часу – дискретно. Визначення цих характеристик зводиться до вимірювання відстаней (у лінійних і кутових одиницях відліку).

Вимірювання відстаней виконується як безпосереднім шляхом, так і вимірюванням на зменшених (масштабно) зображеннях (матеріали фотореєстрації).

Безпосередні вимірювання. У спортивній практиці вимірюються як розміри місць змагань (загальні розміри і розмітка), так і результати спортивних виступів (наприклад висота, довжина в стрибках, дальність метань та ін.). Для цього застосовують рулетки, вимірювальні троси, оптичні візери, механічні дистанціметри (колесо з лічильником), циркулі-вимірники та ін. Кути нахилу на місцевості вимірюють еклиметром (кутоміром).

Результат рухів визначають, наприклад, за допомогою вимірника пригучості (В. М. Абалакова), мішеней для влучення футбольним або тенісним м'ячем. Уздовж доріжки розставляють на рівних відстанях орієнтири для зорового або автоматичного (фотоелементи) вимірювання часу проходження визначених відрізків (наприклад для визначення швидкості лідирування звуковим сигналом). Усі перераховані методи вимірювання відстаней прості і не вимагають докладних пояснень.

Кути в суглобах вимірюють гоніометрами різних систем. Найбільш зручна електрогоніографія – безперервне вимірювання суглобного кута. При зближенні або віддаленні двох деталей гоніографа (з'єднаних на осі суглоба) змінюється електричний опір, а зміна струму фіксується на стрічці (плівці) осцилографа. При використанні системи електрогоніографов можна одержати запис одночасних змін ряду суглобних кутів у різних площинах.

Фотореєстрація застосовується у вигляді одноразових і багаторазових експозицій.

При одноразовій експозиції (фото- або кіноапаратом) виходить одиночний фотознімок (фотографія), на якому, наприклад, відбиті положення, поза людини в даний момент. Якщо прикріпити до тіла (на проекціях центрів суглобів, у робочій точці, в інших обраних точках) світні лампочки накалювання і тримати затвор апарата відкритим протягом усього руху, то на негативі виходять безперервні траєкторії крапок (фотограма). У затемненому приміщенні фотограма буде більш чіткою. Замість лампочок можна використовувати маленькі дзеркала, що відбивають яскравий промінь

світла (тоді затемнення не потрібно). Фотограма дозволяє зафіксувати проекції траєкторій точок на площину, перпендикулярну оптичній осі об'єктива апарата. Але визначити, в який момент часу точка, що рухається, була в тому або іншому пункті траєкторії, неможливо.

При багаторазовій експозиції можна одержати на одному негативі подвійний (потрійний і т.д.) фотознімок (кілька положень). Використовуючи обтюратор, одержують хронофотограму – ряд зображень через однакові проміжки часу на одній і тій же плівці (або пластині). Якщо фотографувати людину, оснащену світними лампочками з застосуванням обтюратора, то на негативі вийде циклограма – ряд точкових траєкторій. Відстані між точками кожної траєкторії відповідають переміщенню точки за рівні проміжки часу. Нарешті, перериваючи промінь світла, що падає на об'єкт зйомки, можна також одержати на одному негативі ряд поз освітленої людини – стробофотограму. Останній спосіб дозволяє реєструвати пози як на хронограмі, але з більшою частотою (сотні і тисячі герців) при значній точності тимчасових проміжків.

Нерідко застосовується двостороння циклографія (двома апаратами). Такі ж дані одержують за допомогою дзеркальної циклозйомки – прямі і відбиті траєкторії (як зйомка з двох пунктів).

Кінореєстрація (кінозйомка), як відомо, здійснюється шляхом експозиції на послідовні ділянки кіноплівки, що переміщаються (кінокадри). При всіх видах кінозйомки первинним матеріалом реєстрації є кіноплівка (негативна або позитивна). Надалі вона може бути використана для демонстрації на екрані з застосуванням нормальної, прискореної або уповільненої проекції кінокадрів. Прискорену зйомку (рапід) використовують для одержання ряду характеристик шляхом більш точних вимірювань і розрахунків. На кожному кадрі фіксується лише одне положення, за яким можна визначити положення і координати точок тіла у відповідний момент. Можлива одночасна кінозйомка двома і трьома кіноапаратами, що дозволяє одержати зображення проекцій рухів і поз відповідно на двох або трьох взаємно перпендикулярних площинах, тобто одержати інформацію про переміщення ланок тіла у всіх трьох вимірах.

Умови фотокінореєстрації. При всіх видах зйомок потрібна попередня розробка схеми розташування апаратури щодо місця руху, маркування (розмітка) поля й об'єкта зйомки. Варто передбачити умови висвітлення.

Оптичну вісь об'єктива апарата розташовують перпендикулярно площині руху, що знімається. Видалення на велику відстань із використанням довгофокусної оптики (телеоб'єктив) дозволяє зменшити перспективне перекошування. Вибираючи місце для зйомки, враховують, на якому тлі вийде зображення й в якому масштабі.

Для одержання точного масштабу фотографують масштабну лінійку, поміщену у площині руху. Для подальшої обробки необхідно помістити в поле зйомки вертикальний (або горизонтальний) орієнтир. Паралельно площині руху може встановлюватися просторова розмітка (з урахуванням віддалення її від площини руху). Для наступної обробки на поверхні тіла, на

костюмі відзначаються пункти відліку – прикріплюються або малюються позначки (наприклад хрестики). Позначки розташовують, наприклад, на проекції осі суглоба на поверхню тіла. Варто тільки постійно враховувати, що при ряді рухів (унаслідок повороту ланки) пункт відліку зміщується щодо осі суглоба, що спотворює дані на десятки міліметрів. У цьому полягають найбільш принципові труднощі точного визначення просторових координат осей і центрів суглобів.

Відповідно до умов висвітлення місця зйомки і швидкістю руху, що знімається, визначають, якими повинні бути відносний отвір об'єктива, чутливість плівки й експозиції. При швидких рухах необхідна менша експозиція (щоб не змазувалося зображення) і велика частота зйомки (для більшої точності наступних розрахунків). При циклозйомці зменшують освітленість приміщення, щоб яскравіше виділялись лампочки. У випадку недостатньої освітленості при кінозйомці застосовують освітлювальні прилади (потужні лампи з відбивачами).

Часові характеристики (момент часу, тривалість руху, темп і ритм рухів) можна вимірювати і фіксувати, відзначаючи потрібні моменти часу і визначаючи відповідні його проміжки.

Для вимірювання часу в спортивній практиці застосовують механічні секундоміри (ціна найменшого поділу 0,1 с). Вони дають великі погрішності за рахунок часу реакції хронометристів при пуску і зупинці секундоміра. Існують пристрої для автоматичного пуску і зупинки секундоміра, що значно знижують погрішність «реакції». Більш точні електросекундоміри, що, маючи малу ціну розподілу (0,01 с), вмикаються і вимикаються автоматично. При роботі з кіноматеріалами про проміжки часу судять за частотою зйомки (тривалість міжкадрового проміжку часу – величина, зворотна частоті). Якщо частота зйомки недостатньо стабільна, то застосовують точний електросекундомір.

Для позначення часу на стрічці, на якій реєструються ті або інші характеристики, застосовують хронографи. Оцінки часу можна одержати на циклограмі і стробофотограмі (за частотою зйомки), а також на осцилографічному записі.

Просторово-часові характеристики (швидкості і прискорення) можна вимірювати і розраховувати. Безпосередньою реєстрацією швидкості користуються рідко. У дослідженнях для практичних цілей зручний спідограф В. М. Абалакова: капронову нитку (довжиною до 200 м) спортсмен, що рухається, змотує з барабана тахометра, що робить запис кривої швидкості.

Для реєстрації прискорень застосовують датчики, що дозволяють фіксувати прискорення (в одному, двох або трьох напрямках). Сигнал від датчика через підсилювач надходить на осцилограф.

До останнього часу швидкості і прискорення визначалися переважно розрахунковим шляхом за координатами точок і тимчасовими інтервалами. Безпосередня реєстрація швидкостей і прискорень у складних рухах має технічні труднощі, але застосовується все успішніше. У даний час

використовують також диференціюючі пристрої, що одночасно з реєстрацією переміщень дають запис розрахованих за ними швидкостей і прискорень.

Реєстрація динамічних характеристик може проводитися до або після рухів спортсмена (наприклад визначення маси тіла, моменту його інерції, сили м'язів та ін.) і під час рухів (наприклад сила взаємодії з опорою).

Інерційні характеристики (маса, момент інерції) звичайно безпосередньо не реєструються. Визначаються дані, за якими розраховують ці характеристики.

Маса тіла (m) визначається зважуванням. Знаючи за вагою тіла його силу ваги (G) і прискорення вільного падіння тіла (g), визначають масу:

$$M=G/g$$

Розподіл мас у тілі у певною мірою характеризується положенням його загального центра ваги (ЗЦВ). Застосовують достовірне (експериментальне) визначення положення ЗЦВ і розрахункове.

Один із найбільш точних дослідних методів – зважування людини на трикутній платформі у заданій позі.

Необхідну позу встановлюють двома способами. При першому способі позу змальовують з кінокадру, збільшуючи її до натурального розміру. На цей малюнок, що знаходиться на платформі, лягає спортсмен, приймаючи позу, що відповідає нанесеному контурові. При другому способі на кінокадрі вимірюють кути у великих суглобах тіла (плечові, ліктьові, тазостегнові, колінні, гомілковостопні) і, використовуючи кутоміри, задають спортсмену на платформі необхідну позу.

Дослідне визначення виконують і на моделях. Модель Абалакова – фігурка людини, побудована з дотриманням середніх пропорцій тіла (у 0,1 розміру тіла і 0,001 ваги). Фігурка укладається в заданій позі на лист паперу з контурами пози. Лист із моделлю пересувають по вільно хитній на опорі O платформі, поки ЗЦВ моделі не збіжиться з точкою підвісу платформи. Натиском знизу на голку в центрі платформи приколюють лист паперу в точці розташування ЗЦВ.

Можна також застосувати шарнірну модель O . Фішера, що дозволяє визначити положення ЗЦВ у передньо-задній площині.

Розподіл мас у тілі людини характеризується також моментом інерції щодо обраної осі. На гойдалках або на пружинному обертовому столі поміщають людину в заданій позі. Визначивши відстань ЗЦВ його тіла до осі обертання, надають установці коливальні рухи і реєструють період одного хитання. Знаючи момент інерції самої установки, масу тіла людини і період хитань, можна розрахувати момент інерції тіла.

Можна або вимірювати силові характеристики, реєструючи сили протягом усього руху, одержуючи поточне їхнє значення, або вимірювати і реєструвати максимальні їхні значення.

Силу дії людини (на визначений об'єкт) можна вимірювати як при роботі груп м'язів одного або кількох суглобів, так і при загальній спільній роботі багатьох груп м'язів (відштовхування, удар боксера та ін.). Коли під дією людини деформується пружина або пластина (платформа), деформація

передається на індикатор стрілочного типу з попередньо таврованою шкалою. Показання індикатора можна спостерігати безпосередньо, відзначаючи максимум стрілкою, що зупиняється, або фіксувати фотографуванням або кінозйомкою, а також передавати на записуючий пристрій (дінамографія).

Для вимірювання моментів сили ряду груп м'язів у суглобах застосовують метод полідинамометрії. За показниками динамометра максимальну силу тяги вимірюють на петлі, розміщеній на кінці ланки при суглобному куті, що дорівнює 90° .

Ця сила тяги (S) менше рівнодіючої тяги всіх м'язів (F_m) у суглобі в k раз. Тут k – коефіцієнт, дорівнює відношенню плечей сили тяги на петлі (Y) і рівнодіючої м'язової тяги (Y_1).

Щоб порівняти силу груп м'язів у різних людей, визначають відношення так званої “абсолютної сили групи м'язів” (S) до ваги спортсмена. Це відношення називають “відносною силою групи м'язів”.

Вимірювання сили звичайними кистьовим і становим динамометрами базується на викладеному принципі, але через великі похибки цих динамометрів застосування їх для наукових досліджень не рекомендується.

Метод електричної тензометрії базується на зміні електричних властивостей датчиків (тензодатчики), наклеєних на частини снарядів, що деформуються спортсменом (гриф штанги або поперечини, рукоять весла, ручка тенісної ракетки і т.п.) або на вимірювальні пристрої (сталеві кільця, пластини та ін.). Тензометричні платформи одержали широке застосування для реєстрації сили відштовхування в стрибках, ходьбі, бігу, метаннях, боротьбі і багатьох інших видах спорту.

Метод вектординамографії базується на електро-тензометричній реєстрації взаємно перпендикулярних складових деформації платформи (або іншого об'єкта). Електричні сигнали, пропорційні відповідним зусиллям людини, прикладеним до платформи, впливають на електронний промінь векторелектрокардіоскопу. На екрані електронний промінь залишає світний слід у вигляді кривої, що відбиває зміни обох складових зусиль. Після прикладання зусиль роблять фотознімок світного екрана (фотовектординамографія). Помістивши екран так, щоб він увійшов у кінокадр, одержують на кінокамері позу спортсмена і положення електронного променя (точки на екрані), що відповідає величині й напрямку прикладених до платформи зусиль (доіновектординамографія).

Метод телетензометрії базується на передачі по радіо сигналу про зусилля, прикладені спортсменом до елементів, що деформуються (наприклад до устілок з тензодатчиками у взутті бігуна, лижника).

Перевага тензометричних методів полягає у швидкості одержання інформації, можливостях векторного зображення сумарних зусиль. Недоліком є значні похибки, що скрадають важливі особливості тонкого керування рухами.

Електроміографія – метод реєстрації електричної активності збуджених м'язів. Застосовується для визначення початку і завершення м'язових зусиль

і величини їхньої активності, що по суті відноситься до динамічних характеристик.

Електричні потенціали (тисячні частки вольт) змінюються надзвичайно швидко (тисячні частки секунди). Для їхньої реєстрації необхідно підсилити сигнали в тисячі разів і подати їх на безінерційний осцилограф. На фотоплівці або паперовій стрічці одночасно реєструються електроміограми ряду м'язів і оцінка часу (звичайно до 0,02 с); попередньо записується калібрований сигнал, щоб при дешифруванні запису визначити величини біопотенціалів.

За електроміограмою можна визначити момент включення м'яза в активний стан і момент припинення активності, а за цими даними – тривалість активності. Крім того, з певною вірогідністю можна судити про ступінь активності м'яза, тобто про величину його напруги. Застосування портативних підсилювачів біострумів дозволяє записувати активність багатьох м'язів у складних умовах виконання вправ (стрибки із жердиною, лижні ходи, бар'єрний біг, плавання та ін.) при високих спортивних результатах.

Біомеханічний аналіз спрямований на розв'язання конкретних завдань дослідження шляхом виявлення біомеханічних закономірностей. В основу аналізу покладені дані про структурність рухів у руховій дії людини. Виходячи з принципу структурності визначається послідовність опису і пояснення рухів. При цьому аналітичне виявлення складу системи рухів поєднується із синтетичним відтворенням її структури. Єдина послідовність операцій навряд чи може бути рекомендована при різних завданнях дослідження. Однак викладений нижче загальний логічний хід і подальше використання результатів дослідження можуть бути основою схеми аналізу в кожному конкретному випадку.

За характеристиками рухів судять про їхнє виконання. Ці характеристики реєструють, дані реєстрації обробляють, зіставляють, аналізують. Тому вкрай важливо правильно вибрати необхідні для вивчення характеристики. Тут враховують і особливості рухів, і реальні можливості їхньої реєстрації (наявність апаратури, її відповідність завданням та ін.).

Виходячи з результатів первинної обробки, складають план подальшого аналізу.

Ґрунтуючись на вивчених характеристиках, визначають елементи рухів: а) суглобні рухи ланок і систем ланок (елементарні дії) і б) фази рухів.

Установлюють, з яких положень і в яких суглобах виконуються рухи, за якими напрямками, з яким розмахом; яка їхня послідовність і погодженість у часі і просторі. Інакше кажучи, визначають зовнішню картину рухів у цілому.

Слідом за цим (а часто й одночасно) вичленяють складові частини рухів ланок, підготовчі, робочі і завершальні фази.

Ще при встановленні складу рухів (або рухового складу) намагаються звфіксувати взаємні зв'язки і залежності елементів. Більш-менш докладно установивши склад, основну увагу переключають на структуру рухів.

Розглядають, як форма і характер рухів, їхня кінематична структура пов'язані з динамікою, з механізмом рухів. Динамічну структуру з'ясовують починаючи з визначення механічних умов збереження положень і виконання рухів. Розглядають зовнішнє силове поле, зовнішні сили, прикладені до тіла спортсмена, і його власні зусилля, що виявляються як вплив на власні частини тіла і зовнішні тіла.

Виявлення зовнішньої і внутрішньої динаміки – настільки важливе завдання в дослідженні рухів, що його нерідко виділяють як біодинамічний аналіз. Звичайно, без даних про кінематику рухів і без вивчення їхньої зміни під дією сил неможливо вивчати біодинаміку. У біодинамічному аналізі розглядаються взаємозв'язки силових і інерційних характеристик і особливе зіставлення дії сил зі зміною рухів.

Головне завдання дослідження структури системи рухів – відтворення цілісного процесу рухової дії, виявлення об'єднуючої ролі і специфічного впливу структурних зв'язків.

Для оцінювання ефективності рухів установлюють, наскільки успішно вирішене рухове завдання і яка “вартість” його розв'язання, наскільки раціонально (з урахуванням закономірностей біомеханіки) досягнута мета. Для цього вивчаються і результат рухів, і умови їхнього виконання, і відповідність рухів завданню досягнення мети і конкретних можливостей. На цьому етапі дослідження необхідно широке зіставлення можливостей людини з їхньою реалізацією.

Питання для самоконтролю

1. Біомеханічні характеристики тіла людини.
2. Сили в біомеханіці.
3. Кінематичні характеристики руху.
4. Динамічні характеристики руху.
5. Енергетичні характеристики в біомеханіці.
6. Просторові характеристики руху.
7. Часові характеристики руху.
8. Просторово-часові характеристики руху.

Розділ 3. Біомеханіка опорно-рухового апарату

Рухова діяльність людини потребує узгодженої роботи організму в цілому, але головна роль при цьому належить опорно-руховому апарату.

З механічної точки зору руховий апарат людини являє собою механізм, який складається з системи важелів, що приводяться у дію м'язами. Тобто людина – це система рухомо з'єднаних ланок, які мають деякі розміри, масу, моменти інерції і м'язові двигуни. Анатомічними структурами, які створюють ці ланки і з'єднання, є кістки, сухожилля, м'язи і фасції, фіброзні та синовіальні з'єднання кісток, а також внутрішні органи, шкіра та інше.

Для того, щоб зрозуміти устрій рухового апарату і принцип його дії, необхідно враховувати біологічну природу «механізмів» тіла людини. Аналіз діяльності рухового апарату з біологічної точки зору дозволяє розкрити своєрідність принципу дії «живих механізмів» по відношенню до «неживих» механізмів.

В результаті вивчення розділу 3 студенти повинні опанувати результати навчання:

ПРН30.3-С3 Володіти методами визначення зусиль при осьовому розтягу-стиску та згині в елементах біомеханічних систем

3.1. Особливості біомеханіки опорно-рухового апарату людини

Із загальною будовою опорно - рухового апарату організму людини можна детально ознайомитися в літературі.

Клітини - це структурні і функціональні одиниці живих організмів.

Тканини - це групи фізично об'єднаних клітин і пов'язаних з ними міжклітинними речовинами, певних функцій, що спеціалізуються на виконанні.

Кісткова тканина - це основний матеріал, з якого побудований скелет людини. Кістка виконує опорні і захисні функції. Приблизно 30% основної її речовини утворене органічними сполуками, а інші 70% - неорганічними.

Хрящова тканина - це тверде і одночасно гнучке з'єднання. Основна речовина володіє опором деформаціям, пружністю, здатністю демпфувати ударні навантаження в між суглобових поверхнях кісток.

Гіаліновий хрящ - еластична тканина, що стискається, покриває суглобові поверхні кісток.

Органи складаються з декількох тканин. Органи, що виконують єдину функцію, ті, що мають загальний план будови і розвитку утворюють систему органів. Усі системи органів взаємозв'язані і утворюють цілісний організм.

Скелет людини, як і багатьох інших тварин, служить ним захистом від зовнішніх дій, сприймає сили ваги, бере участь в здійсненні силових рухів. Кісткові ланки (кістки) сконцентровані усередині організму під шаром м'язів, мають високу міцність на вигин і стискування при мінімальній вазі. Такий внутрішній скелет носить назву ендоскелета, на відміну від екзоскелета

членистоногих. Ендоскелет, на відміну від екзоскелета, складається з живої тканини, і може безперервно рости в тілі.

За формою і будовою розрізняють трубчасті, губчасті, плоскі і змішані кістки. Надалі при аналізі напруженості і рухів опорно-рухового апарату людини розглядаються кінцівки і хребет, які мають складовими елементами трубчасті і губчасті кістки. Тільки мозок, як найвідчутніший до ушкоджень, поміщений в кісткову оболонку.

Суглоб – це з'єднання кісток в скелеті. Суглоби бувають напіврухливі, нерухомі і рухливі.

Зчленовані поверхні на кінцях кісток покриті гладким гіаліновим хрящем, завтовшки 0,2-0,5мм, в якому відсутні посудини і нерви. Необхідні йому поживні речовини і кисень дифундують через синовіальну оболонку і синовіальну рідину. При русі хрящ зменшує тертя між кістками і завдяки своїй еластичності служить амортизатором при ударі.

Зв'язки, що оточують суглоб, утворюють щільну волокнисту сумку і фіксують кістки. Внутрішня порожнина суглобової сумки вистилає синовіальною оболонкою, яка виділяє в цю порожнину синовіальну рідину. Синовіальна рідина представляє діалізат крові і служить мастилом для суглобових поверхонь, зменшуючи між ними тертя.

Біокінематичні пари і ланцюги

Дві сусідні ланки, сполучені між собою суглобом, утворюють біокінематичну пару. Наприклад, біокінематичною парою є стегно і гомілка, сполучені колінним суглобом.

Сполучені між собою біокінематичні пари називають біокінематичним ланцюгом. Біокінематичні ланцюги можуть бути різними.

Як легко помітити, такі ланцюги можуть бути замкнутими через опору, замкнутими на себе і незамкнутими. Характерною для замкнутих ланцюгів є неможливість для них ізольованих рухів в окремих суглобах без залучення до руху інших з'єднань. У незамкнутих ланцюгах можливі ізольовані рухи в окремих суглобах.

Зрозуміло, що це спрощена модель тіла людини і може бути використана лише для вирішення різних завдань біомеханіки.

Для об'єктивного аналізу рухів та рухових дій людини необхідно використовувати відомі біомеханічні дані про її руховий апарат як про матеріальну систему процесу рухів її тіла. Пропоновані теоретичні матеріали (зокрема класифікація рухової системи, використовувані в ній термінологічні та графічні позначення, рівняння, методи розрахунків та аналізу пар, ланцюгів рухових механізмів) дозволяють розв'язати багато завдань із визначення біокінематичної структури практично будь-якого рухового акту.

Опорно-руховий апарат (ОРА) – це система кісткових важелів, що приводиться у дію м'язами. Руховий апарат людини, з погляду біомеханіки, являє собою систему біокінематичних ланцюгів, усі ланки котрого об'єднані

у біокінематичні пари і мають між собою зв'язки, що визначають їх зовнішню свободу рухів.

Одним із способів моделювання рухового апарату є уявлення про нього як про систему взаємозв'язаних біокінематичних ланок. У реальних умовах функціонування організму всі рухомі ланки тіла мають між собою кінематичні зв'язки, котрі обмежують їх зовнішню свободу рухів. Завдяки цим зв'язкам усі біокінематичні ланки об'єднані у біокінематичні пари. У руховому апараті людини на відносний рух кожної ланки будь-якої біокінематичної пари (залежно від способу з'єднання її ланок) накладено певні обмеження. На характер вказаних обмежень впливають такі чинники, як пластичний стан тканин, що беруть участь в утворенні будь-якого сполучення, а якщо це суглоб, то ще й форма поверхні кісток, що сполучаються, наявність того чи іншого допоміжного апарату, участь у рухах певних груп м'язів та наявність різних морфологічних компонентів. Усе це для зручності дослідження можна об'єднати таким поняттям, як умови зв'язку біоланок у біокінематичних парах. Те чи інше число умов зв'язку (s) обмежує рухомість кожної біоланки у парі. Це число теоретично не може бути менше 1 або більше 5 через максимально можливі 6 ступенів свободи руху будь-якого незв'язаного тіла ($1 < s < 5$). Кількість ступенів свободи у будь-якій біокінематичній парі рухового апарату (H) визначають виходячи із залежності між числом умов зв'язку у парі та загальними можливостями руху у тривимірному просторі:

$$H=6-S.$$

Якщо враховувати, що кількість умов зворотного зв'язку біоланок теоретично можлива тільки у межах від 1 до 5, то слід було б виділити біокінематичні пари п'яти класів. Тоді з попереднього рівняння можна було б визначити число зв'язків практично будь-якої біокінематичної пари рухового апарату людини.

Таким чином, біокінематична пара I класу мала б п'ять ступенів свободи рухів ланок, II класу – чотири, III класу – три, IV класу – два, пара V класу мала б тільки один ступінь свободи рухів. У руховому апараті немає жодної біокінематичної пари I та II класу. Таким чином, можна констатувати, що жодна з ланок не має чотирьох, а тим більше п'яти ступенів свободи руху щодо своєї пари. Ланки біокінематичних пар мають максимум три ступеня свободи щодо своєї пари, тому при класифікації їх можна віднести до пар III класу. Такими парами є плече й лопатка, зчленовані у плечовому суглобі, та деякі інші. Біокінематичними парами IV класу слід, зокрема, вважати передпліччя та кисть, зчленовані у променевоzap'ястковому суглобі. Класифікація біокінематичних пар за класами передбачає також урахування усіх рухів тіла, що спричинює необхідність більш дрібного поділу в кожній парі. Зважаючи на те, що пар I та II класів в руховому апараті людини не виявлено, розглянемо можливі відмінності біокінематичних пар III, IV та V класів.

Усі можливі рухомі пари III класу теоретично можна поділити на чотири види: перший дозволяє виконати тільки три обертальні рухи ланок, другий – два обертальні і один поступальний, третій – один обертальний та два поступальні, четвертий – три поступальні рухи. За даними біомеханічних досліджень, серед біокінематичних пар III класу у людини є пари тільки першого виду, оскільки в усіх зчленуваннях з парами цього класу за звичайних умов можливі тільки три обертальні рухи.

Пари IV класу також можна поділити на три види. У парах першого виду цього класу можливі тільки два обертальні рухи, другого виду – один обертальний та один поступальний і третього – два поступальні рухи ланок. У руховому апараті людини за звичайних умов серед пар четвертого класу зустрічаються пари тільки першого виду.

Рухомі пари V класу теоретично можуть бути усього двох видів. Перший вид має один обертальний рух, другий – один поступальний рух ланок.

У біокінематичних парах V класу у людини зустрічаються переважно пари першого виду, хоча за певних умов можна припустити наявність пари і другого виду. Щодо пар VI класу можна припустити відсутність можливих рухів у них.

Згідно з наведеними даними, біокінематичні пари опорно-рухового апарату структурно і функціонально об'єднані у біокінематичні ланцюги. Цей принцип організації у руховому відношенні видається надзвичайно вигідним та раціональним.

Біокінематичним ланцюгом слід вважати зв'язані між собою біокінематичні пари з урахуванням їх природного місця в опорно-руховому апараті та біологічної ролі, що філогенетично склалася, в організмі людини. Морфологічно ці ланцюги визначаються як прості або складні залежно від того, кільком парам належать їх ланки. У простому біокінематичному ланцюгу кожна ланка є елементом не більше двох пар; складний ланцюг може включати біоланки, що входять у три і більше кінематичні пари.

Прості та складні рухомі ланцюги можуть бути також замкненими й незамкненими. До замкнених біокінематичних ланцюгів належать біоланки, котрі входять не менше ніж у дві біокінематичні пари. Незамкнені біокінематичні ланцюги містять біоланки, що входять тільки в одну рухому пару.

Кількість ступенів свободи руху біокінематичних ланцюгів опорно-рухового апарату людини (Н) відповідно до урахування числа пар I класу (B₁), II класу (B₂), III класу (B₃), IV класу (B₄), V класу (B₅) та VI класу (B₆). З усіх можливих ступенів свободи ланок біокінематичного ланцюга, що розглядається, виключаються ступені свободи, що зумовлені наявністю відповідного числа умов зв'язку.

Таким чином, враховуючи парність нижніх кінцівок, у системі їхніх біокінематичних ланцюгів можна встановити 82 пари, котрі, як і у верхніх кінцівках, можуть брати участь у найрізноманітніших механізмах та утворювати численні ланцюги.

Загальне число пар у верхніх та нижніх кінцівках не дуже відрізняється (відповідно 86 та 82), а в усьому єдиному біокінетичному ланцюгу ВКС їх 246 (може бути виділено ще кілька пар, котрі, однак, не відіграють суттєвої ролі у рухах людини й тому не включені до даної біокінематичної класифікації).

Для здійснення більшості довільних ізольованих рухів організм не використовує повністю свої рухові можливості. Більше того, для виконання висококоординованих фізичних вправ спортсмену необхідно подолати так звані надмірні ступені свободи руху тих або інших біоланок тіла.

З цих позицій будь-який біокінематичний ланцюг опорно-рухового апарату за певних кінематичних умов (коли початковий рух однієї або кількох біоланок викликає рухи інших, що однозначно визначаються) слід розглядати як специфічний локомоторний біомеханізм. Це відбувається кожний раз, коли аналітико-синтетична діяльність нервової системи спрямована на розв'язання певних рухових завдань (ходьба, біг, стрибки, удар по м'ячу у футболі, удар у боксі, складні гімнастичні комбінації тощо). На відміну від технічних, постійних механізмів, в опорно-руховому апараті можуть виникати найрізноманітніші рухові механізми з переміщеннями біоланок, що однозначно визначаються. Так, біомеханічні ланцюги верхніх кінцівок можуть бути використані людиною у локомоторних механізмах, спортивній, трудовій та військовій практиці.

Будова апарату рухів та висока рухова активність людини сприяли тому, що вона навчилася "створювати" зі своїх біокінематичних пар та ланцюгів величезну кількість локомоторних біомеханізмів, необхідних для життєдіяльності, праці, спорту тощо.

Для ефективного розв'язання рухового завдання, зокрема при виконанні фізичної вправи, спортсмен має реалізувати певну конкретну кінематичну структуру власних локомоторних механізмів. Аналізуючи ті чи інші рухові дії людини за біомеханічною схемою, необхідно у викладеній послідовності розглянути усі можливі якості біоланок, пар, ланцюгів та цілих рухових біомеханізмів.

3.2. Біомеханіка м'язів, зв'язок і сухожиль

М'язова тканина складає до 40% маси тіла і за характером іннервацій підрозділяється на три типи: гладка, поперечно-смугаста, сердечна.

Поперечно-смугаста м'язова тканина утворює скелетні м'язи, м'язи рота, глотки. Скелетні м'язи називають поперечно-смугастими із-за їх періодичної смугастої структури. Ці м'язи інервуються соматичною нервовою системою забезпечують рух організму.

Скелетні м'язи прикріплюються до частин скелета за допомогою сухожилля, щонайменше в двох місцях. Один кінець сухожилля переходить в зовнішню оболонку м'яза, інший - приєднаний до окістя.

Поперечно-смугастий м'яз складається з безлічі функціональних одиниць - м'язових волокон, що представляють результат злиття багатьох клітин.

Вони мають циліндричну форму, розташовані паралельно один одному і можуть досягати в довжину до 0,1 м і в діаметрі до 0,0001 м.

У м'язових волокнах міститься велика кількість міофібрил (м'язових ниток), які створюють поперечну покреслену.

Поперечна покреслена міофібрилла виглядає як правильне чергування світлих і темних смуг, викликаних зонами (дисками) відповідно I і A. По середині кожної зони проходить темна тонка лінія, це пояснюється певним розташуванням білкових ниток актину (тонких філаментів) і міозину (товстих філаментів).

Тут зона I розділяється на дві половинки лінією Z. Ділянка міофібрили A між двома лініями Z називається саркомером. Усі вони лежать паралельно один одному, утворюючи поперечні гексагональні ґрати, де в місцях перекриття актинових і міозинових ниток навколо однієї міозинової нитки розміщується шість актинових, що і призводить до появи дисків (смуг) в саркомері. Молекула міозину складається з довгого палочкообразного хвоста з двома голівками на кінці, які регулярно розташовуються по довжині нитки міозину.

Кожен м'яз іннервується великою кількістю мотонейронів (рухових нейронів) - нервових клітин, локалізованих в спинному мозку. Зв'язок мотонейронів з м'язами здійснюється через аксони (довгі відростки, що відходять від мотонейронів). Система, що складається з мотонейрона, аксона і групи м'язових волокон, і іннервуємих аксоном називається нейромоторною одиницею.

Є два набори ниток - актинові і міозинові і при зміні довжини саркомеру ці нитки ковзають один по одному, причому під час скорочення актинові нитки зрушуються у напрямку до середини саркомеру. Голівки міозинових ниток служать «гачками», що утворюють поперечні містки, які, прикріплюючись до актинових ниток, втягують актинові нитки, потім відділяються від актина і прикріплюються до більше його віддалених ділянок. Саркомер здатний коротшати на 30 % своєї довжини.

Цикл приєднання поперечних містків може повторюватися з різною частотою.

При роздратуванні скелетного м'язового волокна його скорочення відбуватиметься лише у тому випадку, якщо стимулюючий імпульс досягне певної порогової величини або перевищить її. Таке явище називають реакцією типу «все або нічого».

Основою для вивчення рухових процесів біологічних тіл у біомеханіці являються різні фізико-механічні моделі біосистем, зокрема і тіла людини. Відмітимо, що скелет тіла людини утворений окремими рухливими і нерухомими кістками, загальна кількість яких налічується більше 200, причому 148 з них є рухливими. Кістки сполучені між собою суглобами, які оточені зв'язками і кріпляться до обох кісток суглоба.

Зв'язки регулюють положення кісток. У біомеханічних моделях рухливі кісткові ланки представляють ідеально-твердими стержнями з шарнірами в місцях їх з'єднання.

В середньому коефіцієнт тертя в суглобах складає величину, що набуває значення від 0,003 до 0,02, що передусім залежить від конкретного з'єднання кісткової ланки в суглобі і від фізіологічних особливостей людини.

Слід зазначити, що інтенсивний рух збільшує кількість синовіальної рідини в суглобах, а отже зменшує між суглобове тертя і покращує рухливість.

Зв'язки відносяться до сполучних тканин і за механічними властивостями схожі з сухожиллями. Зв'язки і сухожилля складаються з еластичних волокон колагену, які в початковому ненавантаженому стані гофровані і закручені.

Діаграму, у вигляді залежності зусилля розтягування від подовження зв'язок і сухожиль, $P=F(l)$ отримують при розтягуванні зразка з постійною швидкістю.

Графічно це можна показати на діаграмі. На діаграмі, як правило, спостерігаються чотири типові зони.

Зона 1. Відповідає повільному мимовільному наростанню подовження волокон при постійному зусиллі P . Це явище пояснюється тим, що волокна колагену, з якого складаються зв'язки і сухожилля, в природному стані є гофрованими і під навантаженням відбувається їх випрямлення. Ця зона складає 1...4 % від початкової довжини волокна.

Зона 2. Відповідає лінійній залежності між силою і подовженням, подібно до того, як це має місце при пружній деформації багатьох еластичних матеріалів. Ця зона складає 2-5 % від початкової довжини для сухожиль і 20-40 % - для зв'язок. Пояснюється це тим, що при розтягуванні початкове закручування волокон колагену зменшується, і вони стають паралельними.

Зона 3. В якій порушується монотонність діаграми, відповідає початку процесів ушкодження зв'язок і сухожиллів. Як правило, тут реєструється їх гранична міцність.

Зона 4. Відрізняється різким падінням зусиль в зв'язках і сухожиллях, що свідчить про їх нездатність сприймати прикладене навантаження, а отже про руйнування їх основних структур.

У ряді досліджень показано, що міцність зв'язок і сухожиль істотно залежить від віку, фізичної активності людини. Міцність зв'язок і сухожиль у представників жіночої статі менша, ніж у чоловічого і їх максимальна міцність досягається до 21-25 років. В той же час, міцність зв'язок і сухожиль більш висока, ніж міцність в місці з'єднання з кістками. Тому при травмах в основному спостерігають не розриви зв'язок і сухожиль, а їх відрив від місця кріплення.

Трикомпонентна біомеханічна модель м'язів

У біомеханіці м'яз представляють трикомпонентною біомеханічною системою, що складається з наборів пружних компонент, що входять в структуру м'язів, які послідовно і паралельно сполучені між собою в єдину біомеханічну систему.

Послідовну пружну компоненту означають скорочено - ПосК, паралельно пружну компоненту - Парк і скорочувальну компоненту - СК.

Відмітимо, що скорочувальні (контракційні) компоненти (СК).

Послідовні пружні компоненти (ПосК) включають сухожилля м'язів, місця переходу міофібрил в сполучну тканину і окремі ділянки саркомерів.

У пружні паралельні компоненти (Парк) об'єднані сполучно-тканинні утворення, що становлять оболонки м'язових волокон і їх пучків.

Компоненти виду ПосК і Парк іноді називають пасивними пружними компонентами біомеханічної системи, що моделює м'язи. За своїми механічними властивостями ці компоненти аналогічні пружинам і демпфування в них практично несуттєве.

До основних біомеханічних характеристик м'яза відносять силу тяги, т.е. силу, реєстровану на кінці м'яза, подовження (скорочення), швидкість скорочення м'язів, потужність сил тяги, жорсткість і демпфування м'язів.

В той же час, збільшення площі поперечного перерізу м'яза, за інших рівних умов, збільшує силу тяги м'яза при однаковій зміні величини і швидкості її подовження (скорочення).

При збільшенні довжини м'яза зростає величина і швидкість скорочення м'яза при збереженні сили тяги.

Невантажений м'яз мимоволі прагне прийняти, так звану рівноважну довжину, і якщо довжина м'яза більша за рівноважну, то для її скорочення знадобиться велика сила тяги. В цьому випадку залежність між силою тяги і завдовжки м'язи нелінійна і помітно розрізняється для різних типів м'язів.

Довжина спокою м'яза відповідає максимальному значенню сили тяги і в цьому стані спостерігається максимум площі перекриття актинно-міозинових ниток.

При розтяганні м'язів за межею рівноважної довжини в Парк виникають пружні сили і при подальшому скороченні м'язів їх сила тяги зростає. В цьому випадку основний вклад у збільшення сили тяги вносить Парк. Чим більше в м'язі сполучно-тканинних утворень, тим раніше в Парк виникають пружні сили.

Досягши цілком певного подовження або скорочення м'яза її сила тяги може як збільшуватися, так і зменшуватися. Наприклад, зменшення сили тяги пояснюється тим, що при певному зменшенні довжини м'яза актинові нитки в саркомері упираються одні в інші, а при цьому міозинові нитки упираються в "Z" диски, що приводить їх до вигину і контакт між нитками погіршується.

З іншого боку, збільшення довжини м'яза до певної величини призводить до зменшення площі перекриття актино-міозинових ниток, що також веде до зменшення сили тяги м'язів. У обох випадках погіршується

контакт ниток через поперечні містки і, отже, зменшується ефективність взаємодії актиноміозинних ниток м'язів.

Залежність між силою тяги і швидкістю скорочення м'язів визначається з рівняння Хілла

$$(F + a) \cdot (V + b) = (F_0 + a) \cdot b = \text{const}$$

де F - сила тяги, реєстрована на кінці м'яза, V - швидкість укорочення, F_0 - максимальна ізометрична сила, яка може розвинути м'яз, а a і b - стали сили, що мають розмірність, і швидкості скорочення м'яза, відповідно.

З рівняння Хілла виходить, що між силою тяги і швидкістю скорочення м'яза має місце обернено пропорційна залежність

Жорсткість м'яза залежить від її натягнення і в початкових стадіях розтягання м'яза (при довжинах м'язів менших рівноважних) їх жорсткість вища.

Це пояснюється тим, що в такому стані в м'язі збільшена кількість поперечних актино-міозинних містків, що підвищують жорсткість м'яза. У початковій стадії залежність між жорсткістю і силою тяги має характер близький до лінійного.

Це пояснюється тим, що в натягненні беруть участь тільки послідовні пружні компоненти. У цій стадії жорсткість м'яза не залежить від її довжини. Ця обставина використовується для накопичення енергії в процесі руху людини при різній довжині активних м'язів. Жорсткість активного м'яза в 4-5 разів більше жорсткості пасивного м'яза.

Демпфування м'язів - ця їх властивість розсіювати енергію. Величину демпфування (коефіцієнт демпфування) визначають по розсіюванню енергії в системі м'яза з суглобом. Якщо при русі визначається демпфування м'язів те демпфуванням в суглобі нехтують. Для великих суглобів тертям в суглобах можна нехтувати. Демпфування в дрібних суглобах віднімають із загального демпфування визначеного для системи м'яза з суглобом.

Моменти і плечі сил тяги м'язів. Моментом сили тяги відносно осі суглоба ми називатимемо твір алгебри рівнодійною сил тяги усіх волокон м'яза на плече рівнодійної сили тяги. Плече - це перпендикуляр від осі суглоба, опущений на лінію дії рівнодійної цих сил. Очевидно, що значення моменту сил тяги залежатиме від розміру плеча, яке у свою чергу змінюватиметься залежно від значень між суглобових кутів. У загальному випадку визначення плечей рівнодійних сил тяги м'язів є дуже складним завданням. Тому спрощено приймають м'яз у вигляді нерозтяжної нитки, що сполучає серединні точки місць прикріплення м'язів. Потім визначають розміри плечей сил тяги для різних змін між суглобових кутів.

Дослідження біомеханіки м'язів і опорно-рухового (кістково-м'язового апарату) допомагає вирішити задачі руху біомеханічних систем.

3.3. Біомеханічні особливості м'язового скорочення

Як уже підкреслювалось, живий скелетний м'яз людини – надзвичайно складне утворення: він демонструє свої механічні характеристики лише у випадку його підключення до системи кровообігу та центральної нервової системи, причому зовнішня подібність його поведінки до механічних властивостей неживих матеріалів обумовлена зовсім іншими і набагато складнішими внутрішніми причинами.

Тому говорити про традиційні механічні властивості матеріалів (як то пружність, твердість, в'язкість, міцність, текучість тощо) відносно живих м'язів людини – просто некоректно (порівняйте: говорити про міцність чи текучість комп'ютера або твердість чи міцність на розрив електронних деталей).

У біомеханіці розглядають два основні біомеханічні показники роботи м'яза: силу тяги на його кінцях та швидкість його скорочення.

Основна функція м'язів – це перетворення хімічної енергії макроергічних сполук у механічну роботу (так звана механо-хімічна реакція). Скорочення м'язів відбувається внаслідок взаємодії актинових та міозинових міофіламентів. Активатором механохімічної реакції є іони кальцію. Енергія для роботи поперечних мостиків молекул міозину постачається АТФ.

Розглядаючи будову скорочувальних елементів скелетного м'яза людини, можна зауважити, що він складається з окремих м'язових пучків, пучки – з волокон (клітин довжиною від кількох мм до 10-ти і більше см), а волокна – з міофібрил - тонких ниток товщиною 2 мкм. Міофібрили поділяються на товсті нитки – молекули міозину і тонкі нитки – білкові молекули актину. Поперечні z-мембрани розділяють міофібрили на маленькі волокна – саркомери – елементарні утворення м'яза, що проявляють його властивість скорочуватись (приблизно на 20 %, або на 5 мкм).

Це дає змогу зробити висновок, що збільшення фізіологічного перетину м'яза приводить до зростання сили його тяги без зміни швидкості скорочення, і навпаки – збільшення довжини м'яза приводить до збільшення швидкості скорочення без зміни сили тяги.

Залежність сили тяги м'яза від його довжини

Практика показує, що найбільшу силу тяги м'яз проявляє при певній оптимальній довжині. Ця довжина називається довжиною спокою.

Пояснюється це експериментальними даними, одержаними при вивченні скорочення м'язового волокна.

При великій довжині м'яза (т. А) перекриття ниток актину та міозину мале, тому мала кількість мостиків, утворених між ними при активації м'яза, які «тягнуть» (а). При малій довжині м'яза (F) нитки актину впираються в Z-мембрани молекул міозину і сила тяги різко падає. Точки В, С, D і E відповідають максимальному перекриттю актинових та міозинових ниток

переважної більшості саркомерів м'яза; ця довжина м'яза і є довжиною спокою, яка відповідає максимальній силі тяги.

Крива а) відображає силу активної тяги скелетного м'яза людини залежно від його довжини. Крива в) показує опір пасивному розтягу розслабленого м'яза зовнішньою силою.

Крива с) є сумою кривих а) і в) - $c) = a) + в)$ - і відображає реальну залежність сили тяги м'яза від його довжини.

Чим більше у м'яза з'єднувальної тканини, тим менша її рівноважна довжина (довжина розслабленого м'яза, витягнутого в одну лінію), тому характер кривої с) може бути дещо іншим, що особливо характерне більшості м'язів нижніх кінцівок.

Тобто, збільшення максимальної сили тяги м'язів при їх великій довжині обумовлене не активною тягою саркомерів, а їх попереднім пасивним розтягом за рахунок зовнішніх сил (наприклад, силами інерції тіла людини та його частин або інерцією спорядження та приладдя).

Залежність сили тяги м'яза від часу

Сила тяги на кінці м'яза з'являється не відразу після виникнення сили у скорочувальних елементах, а через деякий час, поки не розтягнуться послідовні пружні компоненти м'яза. Записані експериментально електроміограми (величина керуючих роботою м'язів електричних потенціалів) м'язів нижніх кінцівок бігунів показали, що електрична активність у них спостерігається ще до початку активної роботи – приблизно за 15-25 мс до постановки стопи на опорну поверхню.

У режимі поодинокого скорочення (один електричний імпульс збудження) сила тяги м'яза поступово зростає, а потім зменшується до нуля.

Якщо збуджуючі імпульси подаються на м'яз один за одним, м'яз може розвивати набагато більшу силу тяги, скорочуючись у так званому режимі тетануса. Для досягнення максимальної сили чи найвищої швидкості її зростання ці імпульси повинні бути певної форми, частоти та амплітуди. У висококваліфікованих фахівців якість керування своїми м'язами за рахунок досконалих збуджуючих імпульсів значно вища, ніж у новачків. Крім цього, їхні м'язи завдяки багаторічним тренуванням збуджуються значно краще, періоди розслаблення (а, значить, і витривалість людини) зростають, м'язи включаються і виключаються з роботи дуже вчасно (таку злагожену картину м'язової роботи деколи називають м'язовим ансамблем).

Звичайно максимальної сили тяги в режимі тетанічного скорочення скелетні м'язи людини досягають приблизно через одну секунду після початку їх збудження. Тому при виконанні більшості фізичних вправ м'язи не досягають своєї максимальної сили тяги, а для виконання деяких дій, як уже згадувалось вище, м'язи починають активуватися завчасно перед виконанням роботи. Для практики спорту уміння людини швидко нарощувати силу тяги м'язів часто має більше значення, ніж максимальна сила.

Механічні показники скорочення м'яза залежать від зовнішнього навантаження, із збільшенням якого зростає латентний час реакції, зменшується величина скорочення, падає швидкість скорочення.

Залежність сили тяги м'яза від швидкості його скорочення (крива Хілла)

Залежність сили тяги від швидкості скорочення м'яза надзвичайно важлива, адже добуток сили на швидкість дає потужність його роботи – основний показник при виконанні рухових дій спринтерського характеру.

Істотний внесок у вивчення згаданої залежності зробив відомий спортсмен-легкоатлет і вчений А.В.Хілл (1938 р.), іменем якого часто називають залежність "сила тяги – швидкість скорочення м'яза". Між цими показниками роботи м'яза – обернено-пропорційна залежність, яка може бути описана формулою:

Максимальну потужність м'яз людини розвиває в режимі скорочення з швидкістю, що становить третину від максимальної.

При цьому сила тяги на його кінцях також становить приблизно третю частину від максимальної ізометричної сили. У випадку максимальної швидкості скорочення чи максимальної сили тяги м'яза (які, згідно кривої Хілла, ніколи не можуть виникнути одночасно), потужність його роботи рівна нулю, що пояснюється формулою для розрахунку потужності скорочення м'яза:

Максимальна економічність м'язової роботи спостерігається при швидкості його скорочення, рівній двадцяти відсоткам від V_{max} : у вказаному режимі співвідношення енерговитрат м'яза на виконання зовнішньої роботи і її розсіювання при теплоутворенні – найбільше.

Хоча для функціональних м'язових груп залежність сили тяги від швидкості їх скорочення не зовсім відповідає описаним вище, проте в основному її загальний характер зберігається, що активно використовуються при виконанні різних фізичних вправ. Наприклад, велосипедисти-спринтери використовують частоту педалювання 135–150 об/хв, в той час як їх колеги-стайери надають перевагу частоті 56–87 об/хв, що при максимальній частоті педалювання на велоергометрі без навантаження (яка досягає 240 об/хв), якраз відповідає значенню $1/5$ (20%) від V_{max} . Подібна картина спостерігається в інших видах спорту (плаванні, лижних перегонах, веслуванні тощо), де на різних дистанціях приходиться вирішувати конкретно спринтерські або стайерські рухові завдання.

Розрахунок додаткових енерговитрат на переміщення частин тіла показує, що при частоті рухів, яка відповідає швидкості скорочення м'язів $1/3$ від максимальної, потужність переміщення біологів тіла у більшості випадків значно перевищує потужність корисної зовнішньої роботи. Тому спринтери стараються ні в якому разі не перевищувати частоту рухів, а велосипедисти-трековики вибирають завищене передавальне число трансмісії лише з метою підвищення ефективності стартових дій (внесок яких у загальний спортивний результат досягає 60%).

Питання для самоконтролю

1. Що таке ОРА людини?
2. Що обмежує рухомість кожної біоланки у парі?
3. Як визначити кількість ступенів свободи у будь-якій біокінематичній парі?
4. Чим відрізняються одна від одної біокінематичні пари різних класів?
5. Що таке біокінематична пара?
6. Що таке біокінематичний ланцюг?
7. Чим відрізняються один від одного прості й складні біокінематичні ланцюги?
8. Чим відрізняються один від одного замкнені й незамкнені біокінематичні ланцюги?

Використані джерела інформації

1. Азнакаєв Е. Г. Біофізика : [навч. посіб.]. – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 308 с
2. Баженов В. А., Перельмутер А. В., Шишов О. В. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології. Підручник. — К. : Каравела, 2009. — 696 с
3. Біофізика : Підруч . для студ . біолог ., медичних та фізичних факультетів ВУЗів / Під ред . П.Г.Костюка . - К.: Обереги , 2001. – 544 с.
4. Біофізика і біомеханіка : підручник / В. С. Антонюк, М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко та ін. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 346 с.
5. Лапутін А.М., Хаменко Б.Г., Хабінець Т.О., Гамалій В.В. Методичні розробки з теоретичного курсу “Біомеханіка” – тези лекцій з біомеханіки”” КДПІ ім. М.П. Драгоманова, КДІФК,1993. – 22 с.
6. Літнарівч Р.М. Біофізика. Медична фізика, теоретична і прикладна фізика. – Рівне: МЕРУ, 2011. – 208 с.
7. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512с
8. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів: Підручник/ За ред. Г. С. Писаренка. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.

Навчальне видання

Панченко Сергій Павлович

БІОМЕХАНІКА

Конспект лекцій для здобувачів ступеня бакалавра
спеціальності 132 Матеріалознавство

У редакційній обробці автора

Підготовлено до виходу в світ
у Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19