

Миколаївський національний університет
імені В. О. Сухомлинського

Факультет фізичної культури та спорту
Кафедра теорії та методики фізичної культури

Лекція на тему:
"ФІЗІОЛОГІЯ НЕРВОВО-М'ЯЗОВОГО АПАРАТУ"

Для студентів

Галузі знань – 0102 «Фізичне виховання, спорт і здоров'я людини»

Напрямам підготовки: 6.010201 – «Фізичне виховання*»
6.010202 – «Спорт»
6.010203 – «Здоров'я людини*»

Укладач:

доцент Гетманцев С. В.

Миколаїв – 2016

Мета: ознайомити студентів з основними фізіологічними закономірностями скорочення м'язів і реалізації рухової функції людини.

Завдання: охарактеризувати природу виникнення механізму м'язового скорочення, силу і роботу м'язів, енергетику скорочення м'язів та їх значення для життєдіяльності організму людини.

План.

1. Поняття про руховий апарат	с. 3
2. Проведення збудження через нервово-м'язові синапси	с.3
3. Будова м'язових волокон	с. 4
4. Механізм м'язового скорочення	с. 5
5. Механіка скорочення м'язів	с. 6
6. Характеристичні криві м'язів	с. 9
7. Сила і робота м'язів	с. 10
8. Динамічна і статична діяльність м'язів	с. 11
9. Енергетика скорочення м'язів	с. 12
10. Гладенькі м'язи	с. 13

Ключові слова: руховий апарат, м'язові волокна, нервово-м'язові синапси, гладенькі м'язи, міофібрили, протофібрили, актин, міозин, тетанус.

Поняття про руховий апарат

Вся різноманітність пристосувальних реакцій людини і тварин до зовнішнього середовища можлива лише завдяки руховій активності їх. Систему органів і тканин, що виконують функцію руху, називають руховим апаратом.

У людини і хребетних тварин руховий апарат складається із кісток скелета, з'єднаних між собою суглобами і зв'язками, скелетних м'язів, прикріплених до кісток, і рухових нервових клітин мотонейронів.

Рухові реакції здійснюються за рахунок скорочення скелетних м'язів під впливом імпульсів, що надходять з мотонейронів, розташованих у спинному мозку. Аксон мотонейрона при вході в м'яз розгалужується на гілочки, які в місцях контакту з м'язовими волокнами утворюють нервово-м'язові синапси. Один мотонейрон - може мати різну кількість гілочок і іннервувати різну кількість м'язових волокон. Наприклад, в м'язах очного яблука один мотонейрон іннервує 3...6 м'язових волокон, а у великих м'язах ніг число їх і досягає 200. Мотонейрон і група м'язових волокон, що іннервуються його аксоном, утворюють функціональний елемент рухового апарату — його рухову одиницю. Скелетні м'язи, залежно від їхніх розмірів, складаються з багатьох сотень і навіть тисяч рухових одиниць. При цьому чим менша кількість м'язових волокон входить до складу рухової одиниці, тим більш тонке управління можливе силою скорочення м'яза. Сила скорочення м'яза визначається кількістю одночасно збуджених рухових одиниць. Так, малі рухові одиниці переважно входять до складу дрібних м'язів обличчя, пальців рук, частково вони є у великих м'язах.

Малі рухові одиниці іннервуються відносно малими мотонейронами з тонким аксоном. Поріг збудження малих мотонейронів і нижчий, ніж у великих. Тому при дії подразника в першу чергу збуджуються малі мотонейрони і скорочуються малі рухові одиниці, що має важливе значення для узгодження сили скорочення м'яза з силою діючого подразника. Управління діяльністю рухового апарату здійснюється складною взаємодією нервових центрів, розташованих у різних відділах центральної нервової системи.

Проведення збудження через нервово-м'язові синапси

Механізм передачі збудження з кінцевих розгалужень мотонейронів на м'язові волокна в принципі схожий з механізмом передачі збудження в синапсах центральної нервової системи. Нервово-м'язовий синапс утворюється синаптичним гудзичком нервового закінчення мотонейрона і постсинаптичною мембраною, або кінцевою пластинкою, м'язового волокна. Між ними знаходиться синаптична щілина.

Передача збудження відбувається таким чином: потенціал дії, що надходить по нервовому закінченню, деполяризує пресинаптичну мембрану. Деполяризація викликає зміни її проникності і виділення в синаптичну щілину медіатора — ацетилхоліну. Ацетилхолін шляхом дифузії проходить через щілину, деполяризує мембрану кінцевої пластинки і викликає її збудження — потенціал кінцевої пластинки. Зміна потенціалу кінцевої пластинки внаслідок виникнення колових струмів автоматично призводить до появи локальних змін потенціалу м'язової мембрани. Величина потенціалу дії м'язового волокна 130 мВ, тривалість його — 2 мс. По поверхні мембрани м'язового волокна збудження розповсюджується із швидкістю 5... 12 м/с. Майже одночасно з деполяризацією постсинаптичної мембрани ацетилхолін дуже швидко (за кілька мілісекунд) руйнується під впливом ферменту холінестерази, яка знаходиться в області кінцевої пластинки. Таким чином, деполяризація постсинаптичної мембрани триває короткий час, і вона швидко відновлює свою збудливість. Але якщо мотонейрон посилає імпульси тривалий час і з великою частотою, то кількість ацетилхоліну в синапсах вичерпується і передача збудження через нервово-м'язові синапси припиняється. Припинення передачі збудження в нервово-м'язовому синапсі може при високій частоті імпульсів наступити внаслідок того, що при високій частоті імпульсів холінестераза не встигає зруйнувати ацетилхолін, і постсинаптична мембрана постійно знаходиться в деполяризованому стані. Ці зміни в нервово-м'язовому синапсі можуть виникати при інтенсивній і тривалій роботі і призводити до зниження працездатності м'язів.

Будова м'язових волокон

М'язи складаються з великої кількості спеціалізованих скоротливих клітин і сполучної тканини. Сполучна тканина утворює сухожилля, за допомогою яких м'язи прикріплюються до кісток. Скоротливими елементами м'язів є м'язові волокна.

М'язові волокна — це багатоядерні клітини завтовшки 10 .. 100 мкм і завдовжки до кількох сантиметрів. Зовні вони оточені еластичною оболонкою — сарколемою, яка з'єднується із сполучною тканиною м'яза. Мембрана м'язових волокон, як і інших клітин, двошарова, завтовшки 10 нм. Кожне волокно має велику кількість (1 тис. і більше) міофібрил — м'язових ниток діаметром 1 ... 2 мкм, які тягнуться від одного кінця волокна до другого. В свою чергу міофібрили складаються ще з більш тонких ниток — протофібрили. Розрізняють товсті протофібрили (діаметром 15 ... 25 нм), утворені скоротливим білком — міозином, і тонкі протофібрили (діаметром 4,5... 3,5 нм), утворені білком актином.

Просторове розташування протофібрил надає скелетним м'язам характерного вигляду смугастості, яку добре видно під світловим мікроскопом.

Тонкі мембрани (**Z**), до яких прикріплюються тонкі протофібрили, поділяють міофібрили на структурні одиниці — саркомери. В саркомерах

нитки актину знаходяться між нитками міозину. В області перекриття їх вони з'єднуються, поперечними містками. Поперечна смугастість є результатом чергування ділянок саркомера, з сильним і слабким заломленням променів. У тій частині саркомера, де знаходяться тільки тонкі протофібрили (диск I), заломлення променів невелике. Під мікроскопом ці ділянки саркомера здаються світлими. В місцях перекриття, товстих і тонких протофібрил (диск A) заломлення променів подвійне, вони здаються темними. В середині диска A тонких протофібрил немає, тому там розташована світла зона — H. Міофібрили групуються в колонки по 4 ... 20 в кожній. Колонки оточені системою трубочок і міхурців, яку називають саркоплазматичною сіткою. Трубочки, які тягнуться вздовж міофібрил, утворюють так звану Г-систему. Біля Z-мембран трубочки Т-системи розширюються, утворюючи латеральні цистерни, в яких містяться іони кальцію. Поздовжні трубочки з'єднуються між собою за допомогою поперечних трубочок L-системи. Системи поздовжніх (Т-система) і поперечних (L-система) каналців забезпечують передачу збудження до м'язових волокон і перехід від збудження до скорочення.

У м'язах ссавців виділяють три типи м'язових волокон — **A**, **B** і **C**. Волокна типу **A** — світлі, з малим вмістом міоглобіну, високою здатністю використовувати глікоген як джерело енергії, низьким рівнем ліпідного обміну і процесів окислення. Волокна типу **C**, навпаки, темні, багаті на мітохондрії, з низькою здатністю розщеплювати глікоген, високим рівнем процесів окислення і великим вмістом міоглобіну. Волокна типу **B** за рядом властивостей займають проміжне положення. Спектр волокна від світлих до темних відповідає поступовому переходу здатності їх від анаеробного (безкисневого) розщеплення вуглеводів до аеробного обміну. Функціональне значення диференціації м'язових волокон полягає в їхньому пристосуванні до слабких і тривалих (фазичних) напружень. Білі м'язові волокна мають повільний, тонічний, а темні м'язові волокна швидкий, фазичний характер скорочення.

Механізм м'язового скорочення

Функція м'язових волокон полягає в розвитку напруження і скороченні їх. Відповідно до сучасних уявлень, в основі механізму скорочення м'язів лежить процес втягування молекул актину в проміжки між молекулами міозину. Послідовність процесів при цьому така: потенціал дії мембрани м'язового волокна, що виник у результаті імпульсів з мотонейрона, передається по поперечних Т-каналцях в середину волокна і там активізує саркоплазматичний ретикулум. З міхурців саркоплазматичного ретикулума вивільнюються іони кальцію, які відіграють роль «спускового гачка» скорочення. Вихід іонів кальцію з міхурців починається при деполяризації мембрани — до 60 мВ — і триває протягом всього часу деполяризації.

Завдяки іонам кальцію в присутності АТФ виникає взаємодія між актином і міозином, утворюється актоміозиновий комплекс, в якому міозин

відіграє роль ферменту, що розщеплює АТФ. У актоміозиновому комплексі відбуваються конформаційні зміни (зміна форми молекул актину і міозину), і молекули починають рухатись (ковзати) одна відносно одної. Саркомер при цьому вкорочується. Припускають, що, можливо, це ковзання відбувається внаслідок зміни кута нахилу поперечних містків між товстими і тонкими протофібрилами.

Після скорочення м'яза іони кальцію за допомогою спеціальної «кальцієвої помпи» перекачуються знову в саркоплазматичний ретикулум. Настає розслаблення м'язового волокна, при цьому нитки актину виходять із проміжків ниток міозину і саркомер відновлює свою довжину.

У механізмі м'язового скорочення важливу роль відіграють також білки міофібрил тропонін і тропоміозин, які утворюють тропонін-тропоміозинову систему. Вважається, що ця система є захисним механізмом, який у відсутності іонів кальцію перешкоджає взаємодії актину з міозином і активації АТФ-азної активності міозину. Коли іони кальцію вивільнюються із саркоплазматичного ретикулуму, вони зв'язуються з тропоніном, в результаті чого усувається їх гальмівна дія на АТФ-азу і починається циклічна взаємодія актину з міозином, яка веде до скорочення.

Механіка скорочення м'язів

При збудженні у м'язах розвивається напруження і вони скорочуються. В спеціальних дослідах можна підібрати такі умови, коли м'яз буде скорочуватись, змінюючи свою довжину при постійному напруженні. Такий режим скорочення називають ізотонічним режимом діяльності м'яза. В тих випадках, коли м'яз розвиває напруження без зміни своєї довжини, тобто не скорочується, говорять про ізометричний режим діяльності м'яза. В природних умовах діяльності рухового апарату скелетні м'язи можуть одночасно напружуватись і скорочуватись. Наприклад, під час таких вправ, як ходьба, біг та інші, змінюються довжина і сила напруження м'язів. Такий режим діяльності м'язів називають ауксотонічним..

Поодинокі хвилі скорочення. Потенціал дії мембрани м'язово волокна запускає хімічні процеси, які забезпечують перехід скоротливих елементів м'яза в активний стан — скорочення, яке змінюється розслабленням.

При подразненні ізольованого м'язового волокна поодинокими імпульсами цикл скорочення — розслаблення волокна можна записати графічно, а також проаналізувати його складові частини. На графіку представлені криві ізометричного та ізотонічного поодинокого напруження і скорочення кравецького м'яза жаби при 0° С. Аналіз цих графіків показує, що скорочення м'язів починається через деякий час після нанесення подразнення, який називають латентним періодом скорочення. Цей період характеризує загальну тривалість всіх тих процесів, які відбуваються в м'язовому волокні з моменту приходу нервового імпульсу до початку скорочення волокна. Тривалість цього періоду 15 мс.

Швидкість скорочення м'язів

М'язи	Тривалість фази скорочення (мс)
Літальний м'яз колібрі	8
Довгастий розгинач пальців кішки	10
Камбалоподібний м'яз кішки	75...100
Скелетний м'яз людини	10...70
Литковий м'яз черепахи	300
М'язи щупальців слимака	2500

В ізометричному режимі діяльність (пунктирна лінія) напруження волокон наростає досить швидко і вже через 170 ... 200 мс досягає, свого максимуму, після чого повільно, протягом 700 мс спадає. При ізотонічних поодиноких скороченнях м'язових волокон процес вкорочення волокна починається тільки тоді, коли досягнуто його напруження, яке дорівнює величині навантаження. Тому, як видно із графіка, скорочення починається тим пізніше, чим більше навантаження. Розслаблення волокна завершується тим швидше, чим більше вантаж. Але навіть якщо м'яз розслабитися до початкової довжини, в ньому ще деякий час зберігається залишкове напруження (активний стан), яке триває до 400 мс.

Залежно від тривалості поодинокого скорочення, рухові одиниці поділяються на швидкі і повільні. Швидкість скорочення м'язів залежить також від довжини волокон і саркомерів, їх еластичних властивостей, активності міозинової АТФ-ази, властивостей скоротливих білків, особливостей обміну речовин в різних м'язах і впливу нервової системи. У різних тварин і різних м'язів у однієї тварини швидкість скорочення м'язів коливається у значних межах (табл. 2).

Час поодиноких скорочень рухових одиниць різних м'язів ссавців коливається від 10 до 200 мс, а сила поодинокого скорочення їх—від десятих долей грама до 100 г. Властивості рухових одиниць неоднакові і в одному м'язі. Деякі м'язи відносно однорідні і складаються переважно із швидких рухових одиниць (внутрішній прямий м'яз ока, кравецький м'яз) або переважно із повільних рухових одиниць (камбалоподібний м'яз, чотириголовий м'яз бедра). Більшість м'язів є змішаними, діапазон коливання швидкості скорочення їхніх рухових одиниць досить значний. Швидкість скорочення рухових одиниць залежить від частоти природної імпульсації мотонейронів. Одні мотонейрони дають тривалий розряд імпульсів помірної частоти, викликаючи «тонічну» реакцію, інші мотонейрони генерують відносно високочастотні залпи імпульсів і забезпечують швидкі «фазичні» скорочення м'язів. Нервові центри, викликаючи скорочення переважно повільних або швидких одиниць, регулюють швидкість скорочення м'яза. В процесі тренувань, направлених на розвиток швидкості, відбуваються морфологічні і функціональні зміни як у рухових нервових центрах, так і в м'язах.

Швидкість скорочення одного м'яза може змінюватись за відносно короткий проміжок часу. Підвищення температури в м'язах в певних межах під час їхньої діяльності зменшує тривалість часу скорочення їх. При стомленні м'язів тривалість фази скорочення збільшується.

Тетанус. Якщо зменшувати інтервал між подразненнями, тобто збільшувати частоту стимуляції, то кожне попереднє скорочення буде залишати до моменту настання наступного залишкове напруження. В результаті При, кожному новому скороченні за час активного етапу буде досягатися більше значення сили, яка буде зростати від стимулу до стимулу. Таким чином, при певній частоті подразнення м'язові волокна не встигають розслабитись, і хвилі поодиноких скорочень накладаються одна на одну. Виникає спочатку зубчасте, а при підвищенні частоти імпульсів суцільне скорочення м'яза. Тривале підтримання напруження м'яза на постійному рівні дістало назву тетанічного скорочення, або тетанусу. Частота, яка необхідна для виникнення тетанусу, обернено пропорційна швидкості поодиноких скорочень. Для виникнення суцільного тетанусу в повільних м'язових рухових одиницях достатня частота імпульсів 25 за 1 секунду, а для швидших рухових одиниць— 50 імпульсів за 1 секунду.

В цілісних; м'язах, які складаються із багатьох сотень рухових одиниць, тетанус є наслідком сумачії асинхронних (позмінних) скорочень різних рухових одиниць, В режимі такого скорочення досягається максимальне напруження м'яза. Але, як було доказано дослідженням М. Є. Введенського, максимальне скорочення м'яза настає лише при певній оптимальній частоті подразнення; надмірне збільшення частоти подразнення викликає зниження сили скорочення м'яза. Для нервово-м'язового препарату жаби оптимальна частота дорівнює 40 ... 50 імпульсів за 1 секунду, при збільшенні частоти подразнення вище 120 імпульсів за 1 секунду сила м'яза зменшується. Зменшення сили скорочений м'язів при високій частоті подразнення є наслідком стійкої деполяризації мембрани, що виникає при сумачії постсинаптичних потенціалів.

Електроміограма (ЕМГ). Скорочення м'язового волокна супроводжується появою потенціалу дії. При активації багатьох рухових одиниць з поверхні м'яза реєструють сумарну біоелектричну активність рухових одиниць. Сумарна електрична активність рефлекторного скорочення при слабкому напруженні складається із нерегулярних коливань потенціалу малої амплітуди, із збільшенням сили скорочення коливання стають ритмічними, амплітуда їх збільшується. Основна частота електроміограми коливається в межах 20... 50 імпульсів за 1 секунду, на яку накладаються нерегулярні хвилі. Між сумарною амплітудою електроміограми (інтегрована ЕМГ) і силою скорочення м'яза в межах від слабких до субмаксимальних напружень існує лінійна залежність.

Характеристичні криві м'язів

Крива довжини — напруження. М'язи мають певні механічні властивості, які впливають на скорочення їх. Схематично м'яз можна уявити у вигляді системи, яка складається із скоротливих і еластичних пружних елементів. Розрізняють два пружних компоненти. Один з них розташований послідовно із скоротливим елементом, другий — паралельно. Послідовний пружний компонент утворений сухожиллями і поперечними місточками між нитками актину і міозину. Він відіграє певну роль у забезпеченні плавності рухів. Паралельний пружний компонент складається із прошарку сполучної тканини, що оточує м'яз, і знаходиться всередині його. При розтягненні еластичних елементів м'яза зростає його напруження.

Напруження, яке розвиває м'яз при подразненні, залежить від його довжини. Механізм цього явища стає зрозумілим, якщо розглянути залежність напруження окремого волокна від довжини його саркомера. Аналізуючи графік кривої «довжини напруження», можна виділити на ньому п'ять критичних точок. При надмірному розтягненні волокна довжина саркомера збільшується до 3,6 мкм, активові і міозинові нитки втрачають поперечні зв'язки і тому напруження не розвивається, воно дорівнює нулю. У міру скорочення саркомера нитки актину зчіплюються з міозином — напруження збільшується і при довжині саркомера 2,25 мкм, що дорівнює 1,2 його довжини в розслабленому стані, площа зчеплення між міозином і актином найбільша. Тому і напруження волокна при цій довжині саркомера найбільше. При вкороченні саркомера до 20 мкм (розслаблений стан волокна) величина напруження суттєво не змінюється. Дальше вкорочення саркомера зменшує площу ниток актину і міозину, а, як наслідок, і ступінь напруження волокна. При довжині саркомера 1,25 мкм міозинові нитки впираються в мембрану і згинаються, волокно втрачає здатність розвивати напруження.

Крива «сили — швидкості». Швидкість скорочення є функцією навантаження: чим більше навантаження, тим менша швидкість скорочення. В граничних випадках при відсутності навантаження швидкість скорочення максимальна, а при максимальному ізометричному напруженні вона дорівнює нулю. Графічно крива «сили — швидкості» має вигляд експоненти і може бути описана рівнянням А. Хілла: $U = v (P_0 - P) / (P + a)$, де V — швидкість скорочення, P — сила (навантаження), P_0 — максимальне ізометричне напруження, яке може розвинути м'яз, v — константа швидкості, a — константа сили. Константи a і v визначаються на основі експериментальних даних. Експоненціальна залежність між силою напруження м'яза і швидкістю його скорочення зумовлена неодночасною активацією швидких і повільних рухових одиниць. При невеликій силі напруження активуються швидкі рухові одиниці з великою швидкістю скорочення. При збільшенні навантаження на м'яз необхідна величина сили напруження досягається за рахунок включення повільних рухових одиниць. Це зумовлює різке зменшення швидкості скорочення м'яза.

Сила і робота м'язів

При збудженні м'язові волокна скорочуються і в них розвивається напруження. Величина максимального напруження під час збудження характеризує силу м'яза. Сила м'яза залежить від ряду факторів: 1) сили скорочення окремих його волокон; 2) кількості волокон у м'язі; 3) початкової довжини м'яза; 4) характеру нервових впливів на м'яз. Результуюча силова дія м'язів на скелет зумовлюється процесами виникнення і регулювання тягнучих сил в самому м'язі, а також особливостями розташування м'язів на опорному апараті, геометричним прикріпленням їхніх сухожилів до кісток.

Встановлено, що одне м'язове волокно може розвинути напруження в 100... 200 мг. Товсті волокна розвивають більше напруження, ніж тонкі. Для порівняння сили м'язів визначають абсолютну силу їх. Абсолютна сила вимірюється в ньютонах на 1 см^2 фізіологічного поперечника м'яза. Фізіологічний поперечник — це площа поперечного розрізу всіх волокон м'яза, проведеного перпендикулярно їх розташуванню. В перистих м'язах фізіологічний поперечник значно більший від анатомічного (площі м'яза по його найбільшому діаметру), тому вони сильніші, ніж м'язи з паралельним розміщенням волокон. Абсолютна сила м'язів людини характеризується такими величинами (в кілограмах на 1 см^2): литковий м'яз — 5,9; згиначі плеча — 8,63; жувальні м'язи — 10,0; двоголовий м'яз плеча — 11,4; триголовий м'яз плеча — 16,8.

Регуляція напруження м'язів здійснюється в основному двома факторами: зміною числа активованих рухових одиниць і частотою нервових імпульсів. Чим більша кількість рухових одиниць збудження, тим більше напруження розвиває м'яз. Підвищення частоти імпульсів від мотонейронів також збільшує силу скорочення м'язів.

Робота м'язів. Під час скорочення м'язи виконують певну роботу. Розрізняють внутрішню роботу, пов'язану з витратами енергії на процеси, які забезпечують саме скорочення (розтягання еластичних тіл, проведення збудження, ре-синтез АТФ), і зовнішню роботу, під час якої енергія скорочення м'яза перетворюється на потенціальну або кінетичну енергію. Зовнішню роботу називають ще механічною роботою. Величина її (A) в найбільш простих випадках визначається добутком величини сили (F) на відстань її дії (S), тобто $A = FS$. Наприклад, якщо важкоатлет прикладає силу у 150 Н для підняття штанги на відстань у 2 м, то його м'язи виконують роботу, що дорівнює 2940 Нм. Але це приближена цифра, оскільки не враховується робота, яка виконується при розгинанні тулуба, піднятті рук, підтриманні певної пози тіла. Визначити цю додаткову роботу досить важко. Величина механічної роботи, виконуваної м'язом залежить від навантаження м'яза. Максимальна робота досягається при середніх величинах навантаження.

Встановлено, що величина зовнішньої роботи залежить від швидкості скорочення м'язів і максимальна вона при середній швидкості скорочення. Ці залежності між величиною роботи м'яза і навантаженням та швидкістю його

скорочення у відповідності носять назву закону середніх навантажень і швидкостей.

Більш точним і важливим показником ефективності роботи м'язів є коефіцієнт корисної дії (ККД), який є відношенням виконаної механічної роботи (A) до загальних енергетичних витрат (Q). Загальні енергетичні витрати складаються із витрат на механічну, роботу і на утворення тепла (H), тобто $Q = A + H$, звідки $ККД = A/Q$.

Як показують дослідження, ККД м'язів людини може досягати 25 ... 30%, тобто тільки 30% всієї енергії скорочення витрачається на механічну роботу, а 70% розсіюється у вигляді тепла. ККД також залежить від величини навантаження і швидкості скорочення. ККД максимальний при навантаженнях, що дорівнюють половині від максимальної сили м'язів і при швидкості скорочення 0,35 від максимальної.

Закони середніх навантажень і середніх швидкостей визначають продуктивність роботи рухового апарату і мають важливе значення для трудової і спортивної практики. В процесі тренування і росту дітей збільшуються функціональні можливості рухового апарату, збільшуються і абсолютні значення середніх навантажень і швидкостей. Тому величину середніх навантажень і швидкостей визначають експериментально в кожному окремому випадку (для дітей різного віку, для різних м'язів і різних рухів).

Динамічна і статична діяльність м'язів

Діяльність м'язів проявляється у виконанні рухів, пов'язаних з переміщенням тіла або його частин у просторі (динамічна діяльність) і в утриманні тіла або його частин в певному положенні (статична діяльність).

Динамічна діяльність. Супроводжується вона позмінними скороченнями і розслабленнями м'язів і виконанням роботи, яку називають динамічною роботою. Динамічна робота завжди характеризується певною потужністю (N), яка може бути визначена як відношення величини виконаної роботи (A) до часу її виконання (t) або як добуток сили (F) на швидкість скорочення м'яза (v), тобто $N = A/t = Fv$. Експериментально встановлено, що максимальну потужність м'яз розвиває, коли навантаження і швидкість скорочення становлять 30% від максимальної величини, тобто

$$N_{\text{макс.}} = 0,3F_{\text{макс.}} \cdot 0,3 v_{\text{макс.}}$$

Тривалість виконання динамічної роботи залежить від її потужності. Ця залежність виражається гіперболічною кривою, з якої видно що динамічна робота невеликої потужності може виконуватись необмежено довго, а при збільшенні потужності до максимальних величин динамічна робота триває секунди.

Статична діяльність. При статичній діяльності м'язи скорочуються, тому їх зовнішня робота дорівнює нулю. Але розвиток і підтримання ізометричного напруження потребують певних витрат енергії. Тому у фізіології тривале ізометричне напруження позначають як статичну роботу. Величина статичної роботи визначається добутком сили напруження (F) на

тривалість його підтримання (t). Максимальна тривалість, статичної роботи у значній мірі залежить від величини напруження. Ця залежність представлена на графіку, з якого видно, що коли сила Напруження (F) дорівнює 20% від максимальної, статична робота Може виконуватись досить тривалий час (десятки хвилин). Збільшення сили напруження всього на 10% призводить до різкого зменшення тривалості статичної роботи. Коли сила напруження досягає 80% від максимальної, тривалість статичної роботи дорівнює 15 ... 20 с. Залежність тривалості статичної роботи від сили напруження може бути представлена аналітично спрощеною формулою $t_{\text{макс}} = \frac{K}{(F / F_{\text{макс}})^n}$, де K —

константа, n — показник ступеня, що дорівнює приблизно 2,5. Статична робота швидко викликає стомлення і не може продовжуватись тривалий час. Особливо стомлюючою статична робота є для дітей. Але існують види статичної діяльності м'язів, які можуть продовжуватись досить довго. Це напруження м'язів, що забезпечують положення тіла в полі сили земного тяжіння або підтримання певної пози при виконанні фізичних вправ, трудової діяльності. Такі тривалі напруження називають тонічною формою статичної діяльності, або м'язовим тонусом. Тонус м'язів має рефлекторне походження. Тонічне напруження м'язів виникає внаслідок почергової роботи різних: рухових одиниць під впливом імпульсів від мотонейронів. Активність мотонейронів підтримується і регулюється імпульсами від пропріорецепторів м'язів і імпульсів від вищих відділів центральної нервової системи.

Тонічні напруження перш за все підтримуються завдяки скороченню повільних і спеціальних тонічних рухових одиниць, які, як відомо, можуть перебувати в режимі тетанічного скорочення при невеликій частоті подразнення. Здатність працювати при низькому ритмі і великі енергетичні ресурси забезпечують їм можливість перебувати в напруженні тривалий час.

Енергетика скорочення м'язів

Безпосереднім Джерелом енергії для скорочення м'язів є розщеплення АТФ ($\text{АТФ} \rightarrow \text{АДФ} + \text{H}_3\text{PO}_4 + 42 \text{ кДж}$). Але кількості АТФ у м'язах (приблизно $5 \cdot 10^{-6}$ моль/г) вистачає лише для кількох поодиноких скорочень. Тому ресинтез АТФ повинен йти безперервно. АТФ синтезується в результаті перенесення багатого на енергію фосфату з креатинфосфату на АДФ. Ця реакція каталізується креатинкіназою. Креатин фосфорилується в результаті окислювального (аеробного) або гліколітичного (анаеробного) розщеплення глюкози м'язового глікогену.

Але анаеробний шлях ресинтезу креатинфосфату дуже неефективний. Він триває лише до того часу, поки не вичерпається запас глікогену в м'язах. При цьому в м'язових волокнах, а потім і в крові накопичується молочна кислота, яка при певних концентраціях зменшує активність ферментів і тим самим порушує обмін речовин у м'язах.

В аеробних умовах вуглеводи розщеплюються до кінцевих продуктів (CO_2 і H_2O), а звільненої при цьому енергії вистачає для ресинтезу креатинфосфату і утворення АТФ.

Анаеробні умови в організмі людини виникають при виконанні роботи великої і максимальної потужності, коли киснево-транспортна система не забезпечує доставку м'язові необхідної кількості кисню.

Теплопродукція м'язів. Як уже зазначалось, коефіцієнт корисної дії м'язів не перевищує 30%, тобто більша частина енергії хімічних перетворень витрачається не на механічну роботу, а перетворюється на тепло. Процеси теплопродукції м'язів і нервів було детально вивчено А. Хіллом за допомогою високочутливих термопар.

Встановлено, що в скелетних м'язах при короточасному тетанусі, одночасно з ростом напруження, звільняється значна кількість тепла. Це тепло називають початковою теплопродукцією. За механізмом виникнення початкову теплопродукцію поділяють ще на теплоту активації, теплоту скорочення і теплоту розслаблення. Теплота активації — це сума термохімічних процесів, які підготовляють скорочення (вивільнення іонів кальцію, приєднання їх до активних центрів актину і міозину, розпад АТФ). Теплота скорочення утворюється в результаті перетворення хімічної енергії на механічну. Утворення теплоти розслаблення пов'язують із хімічними реакціями, оберненими тим, які відбулися при скороченні.

Після повного розслаблення м'яза ще деякий час спостерігається виділення тепла. Його називають запізненим теплом, або теплотою відновлення. Воно пов'язане з хімічними процесами, що забезпечують ресинтез АТФ. Теплота відновлення за своєю величиною дорівнює теплоті скорочення.

При тривалих тетанічних напруженнях виділяється невелика кількість тепла, яка називається теплом підтримання; напруження, таким чином, при динамічній, роботі утворюється значно більше тепла ніж при статичній. Утворене в м'язах тепло використовується для підтримання температурного гомеостазу в організмі.

Гладенькі м'язи

В стінках внутрішніх органів, судин і шкіри знаходяться м'язи, які не мають смугастості і; тому дістали назву гладеньких. Гладенькі м'язи складаються з м'язових клітин завдовжки 50 ... 200 мкм і діаметром 4 ... 8 мкм. Волокна тісно прилягають одне до одного і тому збудження, що виникає в одному волокні, легко розповсюджується на весь м'яз. Гладенькі м'язи відрізняються від скелетних і за функціональними властивостями. Вони здатні виконувати відносно повільні рухи і підтримувати тривалі тонічні скорочення. Швидкість проведення збудження менша, ніж в скелетних м'язах, і дорівнює від 0,02 до 0,15 м/с. Тривалість скорочення велика, (до кількох секунд), а період розслаблення може тривати хвилини. Гладенькі м'язи здатні до автоматії. Діяльність гладеньких м'язів регулюється парасимпатичними і симпатичними нервами.

Контрольні питання

1. З чого складається руховий апарат людини?
2. Що таке рухова одиниця?
3. Опишіть механізм проведення збудження через нервово-м'язові синапси.
4. З чого складаються м'язові волокна?
5. Визначте фізіологічний механізм м'язового скорочення.
6. У чому полягає тетанічне скорочення м'язів?
7. Що реєструє електроміограма?
8. Які ви знаєте характеристичні криві м'язів?
9. Від чого залежить сила і робота м'язів?
10. Які існують відмінності між динамічною і статичною діяльністю м'язів?
11. У чому полягають особливості енергетики скорочення м'язів?
12. Опишіть особливості скорочення гладеньких м'язів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Солодков А.В., Сологуб Е.Б. Физиология человека: Общая. Спортивная. Возрастная. - М.: «Терра –Спорт», «Олимпия –Пресс», 2001.-520 с.
2. Бабский Е.Б., Зубков А.А., Косицкий Г.И., Ходоров Б.И. Физиология человека. - М.: «Медицина», 1992. –655 с.
3. Кучеров І.С., Шабатура М.Н., Давиденко І.М. Фізіологія людини. – К.: «Вища школа», 1991. – 340 с.
4. Кучеров І.С. Фізіологія людини і тварин.- К.: «Вища школа». –1991.-320с.
5. Фомин Н.А. Физиология человека. -М.: «Просвещение», 1982.
6. Физиология человека / Под.ред. Н.В. Зимкина./- М.: «Фізкультура и спорт», 1975. – 382 с.
7. Ноздрачев А.Д. Общий курс физиологии человека и животных, т.1,2 – М.: «Высшая школа», 1991.-417с.
8. Нормальная физиология / Под.ред. А.В.Коробкова./- М.: «Высшая школа», 1980.- 412 с.
9. Хрипкова А.Г., Антропова М.В., Фарбер Д.А. Возрастная физиология и школьная гигиена - М.: «Просвещение», 1990. – 423 с.
10. Леонтьева Н.Н., Маринова К.В. Анатомия и физиология детского организма. М.: «Просвещение», - 1986. –278 с.
11. Старушенко Л.І. Анатомія та фізіологія людини.- К.: «Вища школа», 1992.- 378 с.
12. Хрипкова А.Г. Вікова фізіологія. – К.: «Вища школа» – 1982. – 290 с.
13. Ермолаев Ю.А. Возрастная физиология. – М.: « Высшая школа.» – 1986.- 420 с.
14. Физиология человека / Под ред. Р.Г. Шмидта и Г. Тевса/ –М.: «Мир», 1985., Ч.1-4, - 530 с.

