

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ФІЗИЧНОЇ КУЛЬТУРИ

Кафедра біохімії та гігієни

Сибіль М.Г.

БІОФІЗИКА М'ЯЗОВОГО СКОРОЧЕННЯ

Лекція з навчальної дисципліни «Медична та біологічна фізика»

Галузь знань 22«Охорона здоров'я»

Спеціальність 227 Фізична терапія, ерготерапія

Факультет фізичної терапії та ерготерапії

“ЗАТВЕРДЖЕНО”

на засіданні кафедри

біохімії та гігієни

, „31” серпня 2018 р. протокол № 1

Зав.каф _____ Борецький Ю.Р.

Лекція

БІОФІЗИКА М'ЯЗОВОГО СКОРОЧЕННЯ

План

1. Структура скелетного м'яза.
2. Скорочення м'язів.
3. Біофізичні методи дослідження м'язів в нормі та при патологіях різної етіології.

Всі різноманітні форми рухів у живій природі, починаючи з биття війок одноклітинних організмів і руху листя рослин і закінчуючи скороченнями скелетних м'язів, мають деякі спільні риси. Всі рухи пов'язані з перетворенням хімічної енергії, що звільняється при гідролізі аденозінтрифосфату (АТФ), в механічну енергію. Крім того, всі вони відбуваються в клітинах за участю спеціалізованих білкових молекул. Скелетні м'язи відіграють надзвичайно важливу роль в життєдіяльності організму. Завдяки їх скороченням людина здатна не тільки переміщатися в просторі і підтримувати позу тіла, але й виражати свої думки і почуття за допомогою мови, міміки та жестів.

Структура скелетного м'яза

Скелетний м'яз складається з окремих пучків м'язової тканини, кожен з яких включає в себе велику кількість м'язових волокон - клітин, здатних скорочуватися і здійснювати механічну роботу. М'язове волокно представляє собою багатоядерну клітину, діаметр якої може складати від 10 до 100 мкм, а довжина, як правило, дорівнює довжині м'яза в цілому. М'язові волокна оточені плазматичною мембраною. Кожне м'язове волокно включає в себе від декількох сотень до двох тисяч тонших витягнутих волоконець – міофібрил діаметром 1-2 мкм, що безпосередньо беруть участь в м'язовому скороченні. Міофібрили знаходяться в цитоплазмі м'язового волокна поряд зі звичайними внутрішньоклітинними органелами. Кожна міофібрila складається з менших субодиниць - міофіламентів, які утворені з білкових молекул, відповідальних за скорочення м'язів. Існують два види скорочувальних білків: актин і міозин. Кожна з міофібрил містить близько 1500 міозинових і 3000 актинових філаментів, які лежать паралельно один одному. Міозинові філаменти є більш товстими, ніж актинові. Їх діаметр становить 15 нм, а у актинових - 10 нм. Міозинові і актинові філаменти розташовані геометрично впорядковано. Міофібрила по усій своїй довжині

рівномірно поділена поперечними Zмембраними. Вони розташовані на одному рівні в усіх міофібрилах м'язового волокна. Частина міофібрили (або м'язового волокна в цілому) між двома сусідніми Z-мембраними називається саркомером. Його довжина у стані спокою м'язового волокна становить близько 2,5 мкм. В саркомері актинові філаменти прикріплюються до Z-мембрани, а міозинові - розташовані в його центрі. В спокої кінці актинових і міозинових філаментів трохи перекриваються між собою. Завдяки їх впорядкованому розташуванню міофібрили, які складаються з багатьох саркомерів, в мікроскопі виглядають як сукупність світлих і темних дисків, тобто мають поперечну смугастість. Світлі диски містять тільки актинові філаменти і називаються ізотропними (І-дисками). В темних дисках, які називаються анізотропними (А-дисками), представлена міозинові і актинові філаменти. Зона перекривання актинових і міозинових філаментів в анізотропному диску виглядає темнішою, ніж центральна Н - зона, в якій знаходяться тільки міозинові філаменти (рис. 6.1). У центрі саркомера видно тонку темну М-лінію - мережу опорних білків, які утримують міозинові філаменти в складі єдиної впорядкованої в просторі структури. У м'язовій клітині є дві специфічні мембральні системи: Т-система і саркоплазматичний ретикулум (СПР), які мають пряме відношення до м'язового скорочення. Т-система являє собою канали, які утворюють плазматична мембрана в поперечному напрямку м'язового волокна. Т-система контактує з СПР - системою витягнутих каналів і цистерн, всередині яких міститься висока концентрація іонів кальцію, яку створює кальцієвий насос. СПР охоплює міофібрили на зразок муфти. Для розуміння молекулярного механізму м'язового скорочення має велике значення структура міозинових і актинових філаментів, яка на теперішній час детально вивчена. Міозиновий філамент складається з молекул міозину (білок $M=500000$). Кожна з них сформована шістьма поліпептидними ланцюгами: двома важкими і чотирма легкими (рис. 6.2 А). Два важкі ланцюги переплетені між собою, формуючи подвійну спіраль, яка називається хвостом. Кінці кожного з важких ланцюгів згорнуті в дві грушоподібні глобулярні структури - голівки. Складовими частинами голівок є також чотири легкі ланцюги міозину (по 2 в кожній). Голівки містять центри зв'язування АТФ і в присутності актину здатні катализувати реакцію гідролізу АТФ. Частина спіралі кожної молекули міозину разом з голівками формують поперечні містки. Вони можуть приєднуватись до актинових філаментів при ініціації м'язового скорочення. Близько 200 молекул міозину утримуються разом електростатичними силами і формують структуру міозинового філаменту (рис. 6.2 Б). Хвости молекул міозину формують середню частину філаменту - стрижень, а голівки розташовані з

обох боків від нього так, що актинові філаменти, прикріплені до Z-мембран, можуть рухатись в напрямку один одного при ініціації м'язового скорочення. Тонкі актинові філаменти також мають складну будову. Вони сформовані з трьох білкових компонентів: актину (білок $M = 42000$) і двох регуляторних білків: тропоміозину і тропоніну. У кожному актиновому філаменті дві молекули актину згорнуті, формуючи спіраль. На її поверхні розташовані активні центри - ділянки, до яких можуть прикріплятися поперечні містки молекул міозину при скороченні м'яза (рис. 6.3). В стані спокою активні центри актинового філаменту покриті тропоміозином, що запобігає взаємодії між ними і поперечними містками міозину. Молекули тропоніна прилягають до поверхні молекул тропоміозина і мають велику спорідненість до іонів кальцію. При взаємодії з ними механічні сили, які викликають «ковзання» міофіламентів, виникають при взаємодії поперечних містків міозинових філаментів з активними центрами актинових волокон (рис. 5.3). У стані спокою ці сили відсутні, але з'являються при потраплянні до саркоплазми іонів кальцію під час збудження м'язового волокна. Крім того, для процесу скорочення необхідна енергія, яка вивільняється при гідролізі АТФ. Збудження м'язового волокна відбувається під впливом потенціалів дії, які надходять від рухових нейронів спинного мозку (мотонейронів) або при прямому електричному подразненні м'яза. У відповідь на поодинокий потенціал дії або подразнення виникає поодиноке скорочення м'яза. У цілому низка подій під час поодинокого скорочення м'язового волокна є такою: 1. Через аксон мотонейрону потенціал дії надходить до м'язового волокна і передається на нього через спеціальний контакт – нервом'язовий синапс. 2. В плазматичній мембрани м'язового волокна виникає потенціал дії (збудження). Він поширюється уздовж мембрани м'язового волокна, деполяризуючи її, за тим самим механізмом, що й потенціал дії в нервовому волокні. 3. Деполяризація мембрани поширюється вглиб м'язового волокна по каналам T-системи і викликає підвищення проникності мембрани СПР для іонів кальцію. Це викликає їх вивільнення в саркоплазму через специфічні кальцієві канали. 4. Іони кальцію ініціюють взаємодію між актиновими і міозиновими філаментами, змушуючи їх переміщатися один відносно одного, що і викликає процес скорочення м'яза. 5. Через короткий час іони кальцію відкачуються з саркоплазми назад в СПР шляхом активного транспорту (роботи кальцієвого насоса). Видалення іонів кальцію з саркоплазми призводить до припинення скорочення і до розслаблення м'яза. В присутність іонів кальцію, які сприяють відкриванню активних центрів актинового філаменту, голівка кожного поперечного містка «підключається» до найближчого активного центру під прямим кутом, і тут же нахиляється

приблизно до кута 45 (рис. 6.5). При цьому голівка діє як важіль, приводячи в напруженій стан шийку поперечного містка. В результаті розвивається пружний натяг, що зміщує актиновий філамент приблизно на 10 нм. Після цього голівка від'єднується від активного центру актинового філамента, і, повертаючись в свою нормальну позицію, формує зв'язок з новим активним центром. На кожний крок поперечного містка витрачається енергія гідролізу 1 молекули АТФ. Такий процес настає знову і знову до тих пір, поки актинові філаменти не втягнуться повністю між міозиновими філаментами, підтягуючи до їх кінців Z-мембрани. Скорочення кожного саркомера здійснюється роботою великого числа поперечних містків. Чим більша їх кількість формує кон з актиновими філаментами, тим сильніше скорочення. Зв'язок швидкості скорочення м'яза з доданим навантаженням За відсутності навантаження скелетний м'яз скорочується швидко. При його навантаженні швидкість м'язового скорочення зменшується. Коли величина навантаження зростає до значення максимальної сили, яку здатний розвинути м'яз, то скорочення припиняється. Його швидкість стає рівною нулю, незважаючи на активацію м'язових волокон. Залежність між швидкістю скорочення м'яза і навантаженням визначається рівнянням Хілла. Англійський фізіолог А.В. Хілл досліджував термодинаміку м'язового скорочення (Нобелівська премія з фізіології за 1922 р). Вченому вдалося виміряти з великою точністю теплоту, яка виділяється м'язом при його скороченні. В результаті було встановлена закономірність, яка виражається основним рівнянням м'язового скорочення. У цьому рівнянні P - навантаження м'яза, v – швидкість скорочення а і b – коефіцієнти пропорційності. Рівняння Хілла вказує на зворотну залежність між прикладеним навантаженням і швидкістю скорочення м'яза. Максимальна ефективність м'язового скорочення може бути $(P + a) \cdot (v + b) = \text{const}$ 67 реалізована в умовах помірної його швидкості. Коли м'яз перебуває у стані напруги за відсутністю його вкорочення, велика кількість енергії розсіюється у формі теплоти. Робота в такому випадку мала або взагалі не виконується. Це зменшує ефективність м'язового скорочення. При надто швидкому скороченні м'яза велика кількість енергії використовуються на подолання в'язкого тертя всередині нього. Це також зменшує ефективність скорочення. Зазвичай вона є максимальною, коли швидкість скорочення становить близько 30% максимальної. Взаємодія м'язів з кістковою системою М'язи передають зусилля кісткам скелета. Це служить основою виконання найрізноманітніших рухів, які може здійснювати людина. При цьому діапазон зусиль і швидкостей, які може розвивати той чи інший м'яз, міг би виявитися недостатнім. У природних умовах він розширюється за допомогою перетворювачів сил і швидкостей - важелів. Важіль - це тверде тіло, яке не

деформується і має точку опори (обертання). В організмі функцію важелів виконують кістки скелета. На одне плече важеля діє сила, що розвивається м'язом, а на інше - навантаження, проти якого працює м'яз (найчастіше сила тяжіння окремих компонентів тіла – голови, плеча, тулуба і т.д.). Розрізняють важелі першого і другого роду (рис. 6.6). У важелі першого роду точка опори розташована між лініями діючих сил. Прикладом важеля першого роду в тілі людини служить шийно-потиличне зчленування і сукупність м'язів, прикріплених до основи черепа спереду і ззаду від нього. Це зчленування можна розглядати як точку опори, вагу голови – як навантаження. Урівноважує її сила м'язів, які забезпечують збереження положення і рухи черепа і розташовуються ззаду від точки опори. У важеля другого роду лінії діючих сил знаходяться по один бік від точки опори. Ці важелі дуже широко представлені в опорно-руховому апараті людини. Практично всі елементи кінцівок (кисть, передпліччя, плече, стопа, голівка, стегно) є важелями другого роду. Прикладом такого важеля може служити система м'язів, за допомогою яких людина стає на носки. У цій системі точкою опори служать плюснові кістки стопи, навантаженням – вага тіла, прикладена до голівковостопного суглоба, а протидіє їй сила спрямована вгору, яку створює літковий м'яз у місці прикріplення Ахіллова сухожилля до п'яткової кістки. Ще одним прикладом важеля другого роду в тілі служить ліктьовий суглоб. Його можна розглядати як точку опори. При згинанні в суглобі сила створюється в результаті скорочення двоголового м'яза плеча. Вона прикладена недалеко від точки опори, а навантаження створюється вагою передпліччя і будь-якого предмета, який людина тримає в руці. Два важеля можуть утворювати кінематичну пару, яка збільшує обсяг їх руху. Більш складними системами з декількох важелів є кінематичні ланцюги (наприклад, верхня кінцівка, ланками якої є плече, передпліччя, кисть, фаланги пальців). Обсяг рухів у кінематичних ланцюгах значно вище, ніж в кінематичній парі. Будова організму людини характеризується деякими особливостями, що забезпечують певні переваги його опорно-рухового апарату. Прикладом може служити система прикріplення сухожиль згиначів до фаланг пальців. При скороченні цих м'язів сили, що розвиваються ними, прикладаються через сухожилля до фаланг пальців. Система зв'язок утримує сухожилля в положенні, приблизно паралельному осі пальців. При такому устрої скорочення м'язів призводять до згинання пальців, що дозволяє захоплювати предмети. У ряді випадків м'язи перекидаються не через один, а через два 69 суглоби. Це також створює певні переваги. Наприклад, під час бігу нога одночасно згинається в тазостегновому суглобі і розгинається в коліnnому.

Роботу при цьому виконує лише один м'яз, що дозволяє отримати економію енергії, яка витрачається.