

РОЗДІЛ 7

Біохімічні зміни в організмі спортсмена при роботі різного характеру.

Виконуючи будь-яку роботу, в тому числі і м'язову, організм людини витрачає енергію, яка виділяється з молекул органічних речовин при їх аеробному чи анаеробному окисненні. При м'язовій діяльності, порівняно з іншими видами фізіологічної роботи, енергетичні витрати особливо великі, тому біохімічні зміни, які спостерігаються в організмі, відображають перевагу дисиміляції над асиміляцією в процесах обміну речовин. Ці біохімічні зміни включають в себе розщеплення важливих енергетичних джерел: АТФ, креатинфосфату, глікогену, при тривалій роботі-жирів і ліпоїдів, та нагромадження продуктів розпаду: АДФ, креатину, піривиноградної, молочної, янтарної кислот, кетонових тіл, вуглекислоти, аміаку та інших речовин. Обмін речовин у м'язах під час роботи проходить з великою інтенсивністю, яка забезпечується зростанням активності ферментних систем. Проміжні продукти цього обміну /метаболіти/ виділяються із м'язів у кров, досягають різних органів, викликаючи в них зміни в ході процесів обміну.

Використання потенціальної енергії органічних сполук для виконання різних видів фізіологічної роботи стає можливим лише після перетворення її в енергію макроергічних зв'язків аденозинтрифосфорної кислоти. Пластичні процеси - синтези складних органічних сполук - також вимагають затрати енергії АТФ, тому між енергетичним забезпеченням фізіологічних функцій і пластичними процесами існує постійна конкуренція за використання АТФ. Чим більша швидкість витрачання АТФ для м'язової роботи і менші можливості її ресинтезу /відновлення її запасів/, тим менша її кількість може бути використана для пластичних процесів. Цим пояснюється переваження в працюючих органах процесів розщеплення речовин над їх ресинтезом, наприклад, посилення розпаду тканинних білків і нагромадження в клітинах і крові продуктів їх розпаду: поліпептидів, амінокислот, аміаку, сечовини /останньої - при тривалій роботі/.

Посилення енергообміну в організмі спостерігається як під час самої роботи, так і перед її початком /умовнорефлекторно/.

Важливу роль в посиленні енергообміну відіграють симпатична нервова система та залози внутрішньої секреції. Імпульси із центральної нервової системи в передстартовому стані і під час роботи поступають не лише в працюючі м'язи, але і в залози внутрішньої секреції, в наднирники, які під їх впливом посилюють викид в кров гормона адреналіну. Утворення адреналіну /і кортикостероїдів/ збільшується і під дією АКТГ адренкортикотропного гормону гіпофізу /. Спільна дія симпатичної нервової системи і адреналіну

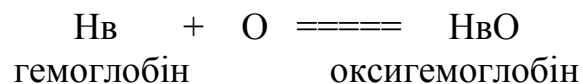
приводить до збільшення частоти серцевих скорочень і загального об'єму крові, яка циркулює по великому колу кровообігу. Утворення в м'язах і вихід у кров проміжних продуктів енергетичного обміну: АМФ, молочної кислоти, вуглекислоти, посилення викиду іонів К, поява ацетилхоліну, виявляє місцевий вплив на стінки кровоносних капілярів у м'язах, розширюючи їх. У цей же час адреналін викликає звуження судин внутрішніх органів, так що з початком м'язової роботи проходить перерозподіл кровотоку в організмі і покращення постачання кров'ю працюючих м'язів. Під дією адреналіну розслаблюються гладкі м'язи органів, що полегшує поступання кисню в легені. Всі ці зміни спричиняють посилення постачання киснем працюючих м'язів.

У розгортанні діяльності дихальної та серцево-судинної систем по забезпеченні працюючих м'язів киснем велику роль відіграє безпосередній вплив продуктів м'язового обміну /лактату, вуглекислоти/ на хеморецептори стінок кровоносних судин, які передають сигнали в центральну нервову систему, а також під дією цих речовин на рН крові, що посилює активність дихального центру.

Швидкість постачання кисню - один із важливих факторів, що визначають можливості енергозабезпечення працюючих м'язів.

Кисень - повітря, яке ми вдихаємо, дифундує в кров через стінки легеневих альвеол і кровоносних капілярів внаслідок різниці парціального тиску його в альвеолярному повітрі і в крові. В альвеолярному повітрі парціальний тиск кисню складає 100-106 мм рт. ст; в крові, яка припливає до легень, він коливається в спокої між 70-80 мм рт. ст; а при м'язовій роботі набагато нижчим.

Тільки невелика частина кисню, який поступає в кров розчиняється в плазмі /біля 0,3 мл О на 100мл крові/, більша ж його частина зв'язується в еритроцитах з гемоглобіном:



При температурі 0 С і тиску 760 мм рт. ст. 100 г гемоглобіну можуть зв'язати 134 мл О, при температурі тіла ця величина дещо нижча. Вміст гемоглобіну в крові дорослої людини біля 14-16%, тому киснева ємність крові, тобто загальна кількість зв'язаного нею кисню, при повному насиченні гемоглобіну, може складати 21-22 мл О на 100 мл крові.

Не весь кисень повітря, яке ми вдихаємо, поступає в кров, парціальний тиск його в альвеолах залишається завжди на 5-10 мм рт. ст. вищим, ніж в артеріальній крові.

На здатність гемоглобіну зв'язувати кисень впливає температура крові і концентрація в ній водневих іонів. Чим нижча температура і вищий рН /а, отже, і нижча концентрація водневих іонів/, тим більше кисню буде зв'язано з

гемоглобіном. Виділення CO з крові у видихуване повітря сприяє підлужненню крові і насиченню гемоглобіну киснем. В молекулі гемоглобіну міститься 4 геми і максимально може зв'язатися 4 молекули кисню, але ступінь насичення гемоглобіну киснем може змінюватися. Після взаємодії з киснем першого із чотирьох гемів спорідненість гемоглобіну до кисню виростає, і приєднання кожної наступної молекули O полегшується.

Збагачена киснем кров поступає у велике коло кровообігу. Серце в спокої щохвилини перекачує 4-5 л крові, а отже, переносить від легень до тканин 250-300 мл кисню за хвилину; під час роботи об'єм крові, яку перекачує серце за хвилину виростає до 20-25 л, а кількість кисню до 5-6 л за хвилину. Збільшення вмісту CO і інших кислих продуктів обміну та місцеве підвищення температури крові в тканинних капілярах створює умови для посиленого розпаду оксигемоглобіну і вивільнення кисню. Внаслідок того, що концентрація вільного кисню в тканинних капілярах вища, ніж всередині клітин, відбувається його дифузія в клітин, але лише 25-30% кисню, що є в крові і може бути віддана тканинам, тобто в спокої тканини можуть одержати лише 100 мл O за хвилину, а при максимальному споживанні кисню 1,25-1,5 л/хв.

В клітинах обмін кисню здійснюється з міоглобіну, який має подібну з гемоглобіном структуру. Міоглобін здійснює перенос кисню до мітохондрій, де протікають окислювальні процеси, а також має здатність депонувати кисень. З посиленням використання кисню мітохондріями під час м'язової роботи міоглобін віддає свій кисневий запас і починає одержувати його від гемоглобіну крові. Міоглобін має більшу хімічну спорідненість до кисню, ніж гемоглобін, і це забезпечує більш повне використання кисню тканинами.

Прискоренню реакцій, які забезпечують енергією працюючі м'язи, сприяє посилена мобілізація енергетичних ресурсів організму. Запаси креатинфосфату, який використовується в перші секунди роботи, швидко знижуються, після чого основним джерелом енергії стають вуглеводи. В анаеробних умовах витрачаються, головним чином, запаси м'язового глікогену. Цей процес активується дією АТФ, іонів Ca, Na, адреналіну і ацетилхоліну на фосфорилазу м'язів - фермент, який прискорює початкову стадію мобілізації глікогену. При тривалих вправах запас глікогену в м'язах може виявитися недостатнім для їх енергозабезпечення. У цьому випадку починають використовуватися позам'язові джерела енергії, в першу чергу, глікоген печінки. Для цього він повинен бути розщеплений до глюкози, яка переноситься кров'ю до працюючих м'язів. Розщеплення глікогену печінки стимулюється адреналіном і глюкагоном.

Запаси вуглеводів організму не можуть витрачатися повністю. Тому із збільшенням тривалості роботи все більшу роль в енергопостачанні м'язів набувають продукти розпаду жирів - жирні кислоти і кетонів тіла. Поки рівень глюкози і молочної кислоти в крові досить високий, мобілізація жирів із жирових депо затруднена; зрештою концентрації цих метаболітів в крові

полегшує розпад жирів (ліполіз). Ліполіз активується також адреналіном і гормоном гіпофізу - соматотропіном. Посилюється захоплення в крові і кислення жирів печінкою, в результаті чого з печінки в кров починає виділятися багато кетонових тіл. М'язи споживають з крові і окислюють значну кількість кетонових тіл і вільних жирних кислот (особливо ненасичених). Поряд зі збільшенням використання в ерів при тривалій роботі може відбуватися новоутворення вуглеводів із речовин неуглеводної природи (глюконеогенез). На цей процес виявляє великий вплив гормон наднирників - кортизол. Основний субстрат для гліконеогенезу - амінокислоти, в невеликому об'ємні може проходити утворення вуглеводів і з жирних кислот. Цей процес протікає, в основному, в печінці.

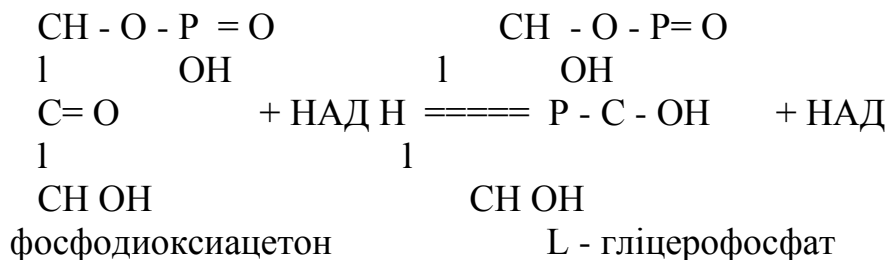
Умовою включення різних речовин в окислювальні реакції, є попадання їх в мітохондрії, а для цього вони повинні бути перенесені через клітинні мембранни - зовнішню оболонку і мембрани мітохондрії. Глюкоза переноситься у вигляді фосфорного ефіру, жирні кислоти - у вигляді сполук з карнітином. Перенос речовин через мембрани - активний процес, який проходить із затратою енергії проти градієнта концентрації. Проникливість мембран змінюється під впливом гормонів і проміжних продуктів обміну, які утворюються під час роботи, а також внаслідок часткового руйнування при роботі важливої складової частини мембран - ліпопротеїдів.

Роль активного транспорту речовин через мембрани в регуляції внутріклітинних перетворень може бути продемонстрована на прикладі глюкози. Напочатку роботи, коли в клітині існує гострий дефіцит АТФ, затруднений перенос глюкози з крові в клітину і, отже, її використання в енергетичних перетвореннях.

З розгортанням діяльності дихальної та серцево-судинної системи і збільшенням частки аеробних реакцій в енергетичному забезпеченні роботи (внаслідок чого зменшується дефіцит АТФ), використання клітинами глюкози, яка приноситься кров'ю, посилюється. Транспорт глюкози через клітинну мембрану полегшується в присутності гормону інсуліну.

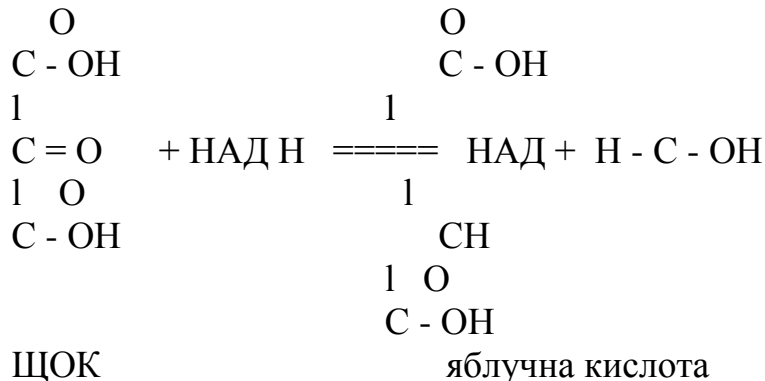
Особливе значення в регуляції співвідношення аеробних і анаеробних процесів в енергообміні має проникливість мітохондріальних мембран для субстратів біологічного окислення, коферментів і кисню. АДФ, яка стимулює розвиток окислювальних реакцій в мітохондріях, у великих кількостях утворюється в міофібрилах під час м'язового скорочення. Але АДФ не може вільно проникати через мембрану мітохондрій. На цій мембрані повинен проходити обмін макроергічним фосфатом між мітохондріальною АТФ і АДФ цитоплазми, в результаті чого підвищується кількість АДФ внутрі мітохондрії. При дефіциті кисню, коли система дихальних ферментів забита воднем, цей процес порушується. АДФ нагромаджується в цитоплазмі клітини і призводить до посилення в ній анаеробних реакцій ресинтезу АТФ.

Відомо, що аеробні окислювальні процеси в мітохондріях протікають з великою інтенсивністю, якщо їм передують значний розвиток гліколізу в цитоплазмі. В процесі гліколізу утворюється багато відновленого кофермента дегідрогенази - НАД Н. Водень від цього кофермента в процесі біологічного окислення повинен бути перенесений на кисень по мітохондріальному ланцюгу дихальних ферментів. НАД Н не може проникнути через мітохондріальну мембрану, але водень переноситься в мітохондрію особливими "човниковими" механізмами. Один із них полягає у взаємодії НАД Н з проміжними продуктами гліколізу - фосфодіоксиацетоном з утворенням L-гліцерофосфату, який легко проходить в мітохондрію.



Ця реакція зворотня. Зворотність її проходить в мітохондрії з допомогою дихальних ферментів, які відщеплюють від L-гліцерофосфату водень, а звільнений фосфодіоксиацетон виходить знову в цитоплазму клітини.

Іншим човниковим механізмом є зворотня реакція перетворення щавлево-оцтової кислоти в яблучну, яка також легко переходить через мембрану мітохондрій:



Органічні кислоти, що поступають в клітину, всередині мітохондрій обмінюються на аніони фосфату або гідроксилу, що виходять з мітохондрій в цитоплазму.

На початку будь-якої м'язової роботи переважають анаеробні процеси енергозабезпечення. Це проходить тому, що при переході від стану відносного спокою до інтенсивної м'язової діяльності потреба організму в кисні виростає в кілька разів, але відразу вона не може бути задовільнена. Запаси кисню в організмі дуже невеликі: 0,5-0,6 л його зв'язані міоглобіном м'язів; біля 1,0

літри знаходиться у сполучі з гемоглобіном крові, біля 0,3 л депоновано в альвеолах легень, стільки ж розчинено в плазмі крові і жировій тканині. Потреба ж у кисні при напруженій м'язовій роботі може досягати 30-60 л за хвилину, тому для задоволення енергозатрат, які різко посилюються з початком роботи, необхідне зростання споживання кисню із оточуючого повітря. Однак, необхідний час, щоб посилилась діяльність систем дихання і кровообігу, і щоб кров, багата на кисень могла дійти до працюючих м'язів. Початкова активація анаеробних процесів зв'язана також з тим, що дуже висока хімічна спорідненість креатинфосфату до АДФ. Вона призводить в перші секунди роботи до своєрідного "блокування" креатинфосфатом інших механізмів ресинтезу АТФ. Крім цього, має значення нервова і гормональна активація гліколітичного процесу у визначених типах м'язових волокон.

При продовженні роботи все більше посилюється роль аеробних процесів в її енергозабезпеченні. Але навіть при досягненні ними найвищої швидкості, вони не завжди можуть за одиницю часу забезпечити необхідну для виконання роботи швидкість ресинтезу АТФ. В таких випадках одночасно з аеробними в тій чи іншій мірі розвиваються анаеробні механізми ресинтезу АТФ.

Після початкової 10-секундної затримки, викликані дією креатинфосфатного механізму і використанням кисневих запасів міоглобіну проходить поступове збільшення споживання кисню в перші хвилини роботи (в період впрацьовування). При рівномірній і не надто інтенсивній роботі (з ЧСС не більше 150 ударів за хвилину) це зростання проходить до тих пір, поки не встановлюється стійкий стан метаболічних процесів, стан, при якому споживання кисню стає постійним і в кожний момент часу точно відповідає потребі організму в ньому. Такий стійкий стан називається ІНТЕНСИВНИМ. Рівень споживання кисню в стійкому стані залежить (у певних межах) від потужності роботи. По ньому можна судити про швидкість розщеплення та ресинтезу АТФ.

Мал.

Зміна споживання кисню під час роботи і після неї.

При більш інтенсивній роботі (з ЧСС 160-180 і більше ударів за хвилину) стійкий стан не встановлюється, і зростання споживання кисню може проходити до кінця роботи або ж до досягнення максимуму споживання кисню. В такому випадку може спостерігатися несправжній стійкий стан, коли споживання кисню деякий час (6-10 хв) підтримується на постійному рівні не тому, що потреба організму в кисні постійно задовільняється, а тому, що витрачені можливості серцево-судинної системи по доставці кисню до тканин. Якраз ці можливості, переважно, обмежують споживання кисню м'язовими клітинами, хоч деколи лімітуючим фактором стає окислювальна здатність працюючих м'язових клітин, зокрема, активністю дихальних ферментів в мітохондріях. Частіше окислювальна здатність тканин знаходиться у точній відповідності з серцевою продуктивністю. Максимальне споживання кисню не може підтримуватись довго, вже під час роботи воно може знижуватись через втому. Кількість кисню, необхідна організму при енергетичному забезпеченні роботи лише за рахунок аеробних процесів, називається "кисневим запитом" роботи. При інтенсивній роботі реальне споживання кисню - "кисневий прихід" - складає лише частину кисневого запиту. Різниця між метаболічно необхідним і реально споживаним киснем складає "кисневий дефіцит" організму. В умовах кисневого дефіциту активуються анаеробні механізми ресинтезу АТФ. Це призводить до нагромадження в організмі недоокислених продуктів анаеробного розпаду. При виконанні роботи, за якої можливим є встановлення стійкого стану, частина анаеробних метаболітів може ліквідуватися під час роботи за рахунок посилення аеробних реакцій; інша їх частина усувається після роботи. При роботі без стійкого стану або з несправжнім стійким станом кількість недоокислених продуктів весь час збільшується по ходу роботи, і усуваються вони вже у відновному періоді. Ліквідація анаеробних метаболітів може проходити шляхом їх повного окислення до кінцевих продуктів (CO_2 і H_2O) або ресинтезу до відновних речовин. Для цих процесів потрібний кисень, тому деякий час після закінчення роботи споживання кисню продовжує бути підвищеним порівняно зі станом спокою. Цей відновний надлишок споживання кисню одержав назву "кисневого боргу". Вимірювання величин дефіциту кисню і кисневого боргу показали, що кисневий борг завжди більший дефіциту, і чим більша інтенсивність і тривалість роботи, тим більш виражені ці відмінності.

Кисень в період відновлення витрачається не лише на усунення продуктів анаеробного розпаду, але і на ліквідацію деяких інших наслідків м'язової роботи.

Якщо в організмі є достатня кількість субстратів біологічного окислення і мітохондрії одержують достатню кількість кисню (якраз такі умови створюються зразу ж після закінчення роботи), то рівень споживання кисню

залежить від кількості вільної АДФ, яка здійснює дихальний контроль в мітохондріях.

Джерелами енергії є метаболіти, які нагромадилися за час роботи в анаеробних умовах (молочна, янтарна кислоти, -гліцерофосфат, глюкоза і, на пізніших стадіях відновлення, жирні кислоти). Джерелом АДФ є поглинаючі енергію процеси ре синтезу креатинфосфату із креатину, глікогену з молочної кислоти і глюкози, відновлення порушеної під час роботи структури ліпопротеїдних клітинних мембран, енерготрати на функціонування дихальної та серцево-судинної систем; активність яких деякий час після роботи зберігається підвищеною.

Біохімічні перетворення, зв'язані з проявом м'язової активності, сильно впливають на водно-сольовий обмін організму.

Тривале збудження м'язових клітин, а також посилення розпаду глікогену і білків приводить до втрати м'язами іонів калію, більша частина яких в спокої зв'язана з глікогеном і білками. Калій посилено виділяється в сечу. Посилене потовиділення, необхідне для підтримання постійної температури тіла, викликає втрату великої кількості води і мінеральних солей, зокрема, значної кількості іонів натрію. В деякій мірі втрата води і мінеральних солей може бути знижена шляхом зменшення сечовиділення, яке спостерігається під час роботи, але при тривалій роботі вона може бути значною. Крім натрію і калію м'язові клітини втрачають також іони кальцію, що знижує їх скорочувальну здатність.

Для відновлення організму до наступної роботи в період відпочинку іонна рівновага повинна бути відновлена. Це вимагає не лише поступання мінеральних солей ззовні, але і енерготрати на роботу мембранних іонних "помп", отже, цей процес також стимулює підвищення споживання кисню після роботи. Крім цього, деяка частина надлишково спожитого в період відпочинку кисню йде на відновлення запасів його в міоглобіновому та гемоглобіновому депо. При виснажливій роботі може знизитися ефективність використання кисню внаслідок часткового розмежування процесу окислення і утворення АТФ. Це розмежування досить довго може утримуватися і після роботи і також викликати збільшення, порівняно зі станом спокою, споживання кисню. При роботі різного характеру різні фактори стають провідними в утворенні кисневого боргу. Наприклад: при виконанні однократних короткочасних вправ вирішальну роль в утворенні кисневого боргу відіграє ресинтез креатинфосфату і АТФ, а з підвищенням навантаження виростає значення ресинтезу глікогену, відновлення іонної рівноваги і інших процесів.

Після роботи, при якій можливе встановлення стійкого стану, зниження соживання кисню проходить швидко - наполовину за 27-30 сек, повністю - за 3-5 хв. При більш інтенсивній роботі у кривій зниження споживання кисню виражено 2 фази – початковий швидкий спад і більш повільний затяжний процес повернення до стану спокою. Швидкий компонент кисневого боргу (

так званий "алактатний") дає можливість приблизно оцінити вклад креатинфосфатного механізму в енергозабезпеченні роботи, повільний компонент кисневого боргу ("лактатний") при порівняно короткочасній роботі може служити відображенням розвитку гліколітичного процесу, але при тривалій роботі в його утворенні дуже значна частка і інших процесів, оцінити яку точно є досить важко. Час, протягом якого повільний компонент кисневого боргу знижується наполовину, складає 10-15 хв, а для його ліквідації повністю необхідно декілька годин. Після напруженої і тривалої роботи підвищене споживання кисню може утримуватися до 2-3 діб.

Частіші і посилені скорочення серця під час м'язової роботи вимагають збільшення швидкості енергетичного обміну в серцевому м'язі. Характер енергетичного обміну в ньому дещо інший, ніж у скелетних м'язах. Серцевий м'яз пронизаний густою сіткою кровоносних капілярів, через які протікає найбільш багата киснем кров, в ньому велика активність ферментів аеробного обміну, тому в серці переважають аеробні енергетичні реакції. У стані відносного спокою основними джерелами енергії для серцевого м'яза є жирні кислоти, кетонів тіла, глюкоза, які приносяться з кров'ю. При напруженій м'язовій роботі він починає посилено поглинати з крові і окислювати молочну кислоту, а запас глікогену в ньому майже не витрачається. Посилюється під час м'язової роботи енергетичний обмін і у головному мозку, що виражається у збільшенні споживання мозком глюкози і кисню з крові, зростанні швидкості оновлення глікогену та фосфоліпідів, посиленні розпаду білків і нагромадженні аміаку. Мозок так само, як і серце постачається енергією за рахунок аеробних процесів. При роботі дуже великої потужності або дуже тривалій може спостерігатися зниження запасу макроергічних фосфатів в нервових клітинах.

У людини під час виконання роботи важко спостерігати біохімічні зсуви, які проходять безпосередньо в працюючих м'язах. Але ці зсуви знаходять своє відображення у зміні складу крові, сечі, повітрі, яке видихається. Тому, знаючи основні закономірності протікання процесів обміну і розподілення речовин в організмі, за аналізами крові, сечі, повітря, що видихається, можна оцінити рівень розвитку енергетичних реакцій у м'язах, здатність організму протидіяти змінам внутрішнього середовища організму, швидкість мобілізації енергетичних запасів і т.п.

Найбільш точним показником інтенсивності і ємності аеробних механізмів енергозабезпечення є споживання кисню. Рівень розвитку гліколізу можна оцінити вмістом молочної кислоти, який вимірюється під час роботи і в перші хвилини відновлення; ступінь залучення креатинфосфату в енергетичне забезпечення м'язів можна визначити по вмісту в крові продуктів його розпаду - креатину і креатиніну; про включення жирів в енергетичні реакції судять по вмісту в крові вільних жирних кислот і кетонів тіл; вимірювання показників кислотно-лужної рівноваги дозволяє зробити висновок

про здатність організму протидіяти несприятливому впливу кислих продуктів анаеробного обміну і т.п.

Вміст проміжних продуктів обміну (метаболітів) в крові залежить від швидкості їх утворення в клітинах, швидкості дифузії через клітинні мембрани і швидкості їх споживання в крові різними органами і тканинами. Тому в різних умовах м'язової діяльності один і той же показник, визначений в крові, з різним ступенем достовірності може відображати зміни, які проходять в м'язових клітинах.

Швидкість мобілізації вуглеводних запасів печінки знаходить своє відображення у рівні глюкози в крові. На початку роботи, а також при короткочасній дуже потужній роботі, концентрація глюкози в крові, як правило, підвищується. Це засвідчує високу швидкість мобілізації глікогену і набагато меншу швидкість використання глюкози м'язами. При роботі в умовах стійкого стану її вміст у крові близький до рівня у стані спокою, так як швидкість поступання її в кров і швидкість використання м'язами приблизно однакові. При тривалій роботі концентрація глюкози в крові може падати нижче рівня спокою, так як запас глікогену печінки при такій роботі зменшується і швидкість його мобілізації знижується, а потреба клітин в глюкозі продовжує залишатися високою. У спокою вміст глюкози в крові складає 80-120 мг/100 мл крові, при м'язовій роботі він може вирости до 200 мг/100 мл крові.

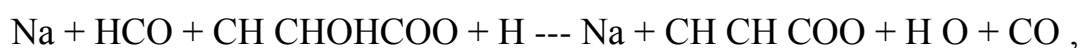
Досить повну уяву про інтенсивність гліколітичного процесу в м'язових клітинах дає вимір вмісту молочної кислоти в крові. Молочна кислота має здатність швидко дифундувати з працюючих м'язів в кров, а подальше її окислення під час напруженої роботи протікає з відносно малою швидкістю, так що її вміст в крові залежить в основному від швидкості її утворення. Переважно під час роботи вміст молочної кислоти в м'язових клітинах дещо більший ніж в крові. Але в момент, коли її концентрація стає найбільшою, між м'язовими клітинами і кров'ю встановлюється рівновага. У спокої в крові завжди є молочна кислота (8-12 мг/100 мл крові). З початком м'язової роботи утворення її в м'язах і вихід в кров різко посилюється, при цьому збільшення її концентрації в крові проходить не відразу, а через декілька секунд після початку роботи. При виконанні досить тривалих вправ з рівнем кисневого запиту 50-85% від МПК значно більший - до 100-150 мг/100 мл крові. При цьому концентрація молочної кислоти досить швидко зростає в перші 2-10 хв роботи, а потім або залишається на цьому ж рівні, або ж знижується. Таким чином, в цих умовах максимальна кількість молочної кислоти в крові міститься на початку роботи, доки не розвинулось дихання і утворення молочної кислоти не зрівнялось з її усуненням за рахунок окислення. При виконанні вправ з рівнем кисневого запиту вище 80% від максимального споживання кисню спостерігається постійне збільшення концентрації молочної кислоти в крові до максимальних величин, які при цьому можуть

спостерігатися не під час роботи, а на 2-10 хвилині віовного періоду. Цей "віддалений максимум" молочної кислоти може існувати як через затримку виходу молочної кислоти в кров, коли при роботі її утворюється дуже багато, або через використання енергії гліколізу у відновному періоді для ресинтезу креатинфосфату. Максимум молочної кислоти, який може витримати добре тренувана людина, складає 200-250 мг/100 мл крові і дещо більше - в м'язах. Дальше посилення гліколізу не проходить, так як великі концентрації молочної кислоти несприятливо впливають на організм. Молочна кислота - сильна кислота, яка при дисоціації створює значну кількість іонів водню. Частина їх може бути зв'язана буферними системами клітин і крові, при цьому в крові головну роль відіграє бікарбонатний, а у клітинах - білковий буфер. Коли ємність буферних систем вичерпується, проходить зсув реакції середовища в кислу сторону. У підкисленні середовища приймають участь і інші кислоти, які утворюються при роботі: вугільна, фосфатна, піровиноградна і т.п., але найбільш значною в цьому процесі є роль молочної кислоти. Між концентрацією молочної кислоти і рН крові існує чітко виражена оберненопропорційна залежність.

При зниженні рН більш як на 0,2 порівняно з рівнем спокою знижується активність багатьох ферментів, в першу чергу, фосфофруктокінази - фермента, який визначає швидкість гліколізу; тому швидкість гліколізу знижується. Зниження рН призводить також до порушення діяльності нервових клітин і розвитку в них захисного гальмування, погіршенню передачі збудження з нерва на м'яз, зниженню аденозинтрифосфатазної активності міозину і падінню швидкості розщеплення АТФ. Висока концентрація молочної кислоти у м'язових клітинах викликає підвищення в них осмотичного тиску і, як наслідок, їх набухання. Набухлі клітини стискають нервові закінчення через що в м'язах можуть виникати болі.

У спокої рН артеріальної крові дорівнює 7,4, венозної 7,35 через великий вміст у ній вуглекислоти. При м'язовій діяльності рН може знижуватися до 7,0. Велика кількість тренуваних спортсменів здатна витримати зниження рН до 6,8, але при цьому може спостерігатися нудота, сильні болі в м'язах, запаморочення голови. Зсув рН крові в лужну сторону який організм може перенести без різких порушень процесів обміну, набагато менший, ніж в кислу - до 7,8. Зміна рН у м'язових клітинах завжди дещо більша ніж в крові. Показниками величини лужних буферних основ і "стандартний бікарбонат", при цьому перша величини відображує зміни при роботі сумарної ємності бікарбонатного, фосфатного і різних білкових буферів, а друга - тільки запас бікарбонатів.

Надлишок молочної кислоти викликає розпад бікарбонатних буферів клітин і крові:



в результаті чого утворюється так званий "неметаболический" надлишок вуглекислоти, тобто такої, яка не зв'язана з процесами біологічного окислення. Визначаючи "неметаболический" надлишок CO₂ у повітрі, яке видихається, можна дати досить достовірну оцінку рівня розвитку гліколітичного процесу.

У спокої у людини існує строго визначене відношення між кількістю виділеної вуглекислоти і кількістю спожитого кисню ("дихальний" коефіцієнт), які залежать від характеру субстрату, що окислюється. При окисленні вуглеводів коефіцієнт дорівнює 1, жирів 0,7-0,75, білків - 0,8; при збалансованій білково-вуглеводно-жировій дієті - біля 0,75. Таким чином, за величиною дихального коефіцієнта у спокої до певної міри можна судити про характер окислювальних речовин і умови протікання окислювального процесу.

Однак, при напруженій м'язовій роботі дихальний коефіцієнт може перевищувати 1, засвідчуючи про появу надлишка молочної кислоти. Вміст в крові жирних кислот і кетонових тіл змінюється в оберненопропорційній залежності від вмісту цукру та молочної кислоти; їх використання зростає із збільшенням тривалості роботи. При тривалій роботі в крові значно знижується кількість фосфатидів, так як вони інтенсивно розподіляються в різних органах, а синтез їх у печінці протікає під час роботи з малою швидкістю. М'язова робота викликає зміни у кількості в крові білків та продуктів їх розпаду. Ці зміни полягають у збільшенні вмісту білків у плазмі крові (зокрема, білків-ферментів) за рахунок виходу їх із працюючих клітин і зміни співвідношення між різними білками крові. Збільшується також кількість продуктів білкового розпаду (аміаку, сечовини), які поступають із м'язових клітин і печінки. Ці зміни різні при тривалій і короткочасній роботі. Вихід білків в кров при короткочасній роботі незначний, а при тривалій, коли проникливість мембран дуже змінюється, він збільшується так, що при деяких видах роботи білок може навіть з'явитися в сечі. Рівень аміаку особливо виростає в роботі, при якій не встановлюється стійкий стан метаболічних процесів, а також при тривалому втомлюючому навантаженні. Тривала робота приводить до збільшення вмісту в крові сечовини, концентрація якої може зрости в 4-5 разів. Розщеплення білків особливо посилюється при тих видах роботи, в енергозабезпеченні яких переважають аеробні процеси.

Для того, щоб м'язова робота могла тривати далі, необхідно, щоб процеси ресинтезу АТФ протікали з тією ж легкістю, з якою здійснюється її розщеплення. При роботі різного характеру цього можна досягнути різним поєднанням аеробних та анаеробних процесів ресинтезу АТФ. Зміни співвідношень різних реакцій ресинтезу АТФ є проявом зміни метаболічного стану організму.

Метаболічні стани - це динамічні стани реакцій обміну речовин, які представляють собою певне співвідношення різних реакцій утворення і

споживання енергії. Регулюються ці реакції співвідношення АДФ:АТФ і залежать від розвитку механізмів, що підтримують постійну реакцію внутрішнього середовища (гомеостазис). Кількісно метаболічні стани можуть бути охарактеризовані рівнем розвитку процесів анаеробного і аеробного енергозабезпечення.

Зміни метаболічних станів в процесі м'язової діяльності залежать від кількості м'язів, які приймають участь у виконанні роботи, режиму роботи (статичного і динамічного), інтенсивності (потужності роботи), її тривалості, числа повторень вправ і пауз відпочинку між ними.

В залежності від кількості м'язів, які приймають участь в роботі, вона поділяється на локальну, регіональну та глобальну. Коли робота вимагає участі більше 3/4 усіх м'язів тіла, вона називається глобальною; якщо в роботі приймає участь менше, ніж 1/4 усіх м'язів тіла, вона називається локальною. Проміжне положення займає регіональна робота. Глобальна робота (ходьба, біг, плавання, гонки на лижах, біг на ковзанах, і т. п.) викликає великі біохімічні зсуви в усіх органах і тканинах організму. Локальна робота (натискування пальцем на курок при стрільбі, перестановка шахматних фігур і т.п.) може викликати зміни у працюючому м'язі, але в організмі в цілому біохімічні зсуви будуть невеликими. Регіональна робота (елементи різних гімнастичних вправ, удар по м'ячеві і інш.) викликають набагато інші біохімічні зміни, ніж локальна. Чим більша локальна м'язова робота при однаковому об'ємі зовнішньої роботи, тим більша частка анаеробних реакцій в її енергозабезпеченні. Глобальна робота викликає більш посилену діяльність дихальної і серцево-судинної систем, м'язи краще забезпечуються киснем, в її енергозабезпеченні більша частка аеробних реакцій ре синтезу АТФ.

Дуже впливає на метаболічний стан, режим м'язової діяльності. Статичний (ізометричний) режим скорочення призводить до перетискування капілярів (у випадку, коли сила скорочення досить велика і перевищує тиск крові в артеріолах) і, отже, до погіршення постачання м'язів киснем і поживними речовинами. У такій роботі переважають анаеробні реакції в енергообміні.

Динамічний (ізотонічний) режим роботи набагато краще забезпечує постачання тканин киснем, ніж статичний, так як м'язи, які скорочуються переривчасто, діють як своєрідний "насос", що проштовхує кров через капіляри. Для кращого відпочинку після статичної роботи потрібний не спокій, а динамічна робота; наприклад, штангіст після підняття великої ваги повинен походити, щоби швидше відпочити.

Потужність м'язової роботи і її тривалість також виявляють великий вплив на біохімічні процеси, які протікають під час роботи.

Чим вища потужність, а, отже, більша швидкість розщеплення АТФ, тим менша можливість задовільнити енергетичний запит за рахунок дихальних процесів, і тим більше виражені процеси анаеробного ресинтезу АТФ. Це добре

видно на графіку, де показана зміна швидкостей аеробного і анаеробного виробництва енергії в залежності від потужності виконуваної роботи (по вертикалі показана швидкість вивільнення енергії в калоріях на кг ваги тіла за хвилину, по горизонталі - потужність роботи у відсотках від максимально можливої).

Залежність між швидкістю утворення енергії і потужністю роботи.

З графіка видно, що зі збільшенням потужності виконуваної роботи рівень споживання кисню і швидкість аеробного утворення енергії зростає, доти, поки не досягне максимальних величин, а з подальшим ростом потужності в деякому інтервалі потужностей залишається постійним; з підвищенням потужності до максимальної частка аеробного процесу в енергозабезпеченні роботи знижується, але не тому, що зменшується потреба в енергії, а тому, що робота такої потужності порівняно короткочасна і аеробні процеси не встигають розвинути повністю.

Потужність вправи, при якій досягається максимум споживання кисню, називається " критичною потужністю". До досягнення критичної потужності всяке збільшення важкості роботи супроводжується посиленням аеробних процесів ресинтезу АТФ; при підвищенні критичної потужності збільшення важкості роботи може проходити лише за рахунок анаеробних процесів. Але розвиток анаеробних процесів починається при потужностях більш низьких ніж критична.

Потужність вправи, при якій вперше виявляється посилення анаеробних реакцій, називається " порогом анаеробного обміну. "Для людей, котрі займаються спортом, ПАНО спостерігається при потужності, що дорівнює 45-50% від критичної; у спортсменів він дещо вищий і складає 60-75% від критичної потужності. Після перевищення порогу анаеробного обміну сильно зростає роль анаеробних реакцій з підвищенням потужності роботи. Особливо сильно виростає енергопродукція гліколізу. Найбільшу роль відіграє гліколіз як енергетичне джерело при потужності 60-85% від максимальної.

Потужність, при якій досягається найвищий розвиток гліколітичного процесу називається, " потужністю виснаження".

Максимально можлива для людини потужність одержала назву максимальної анаеробної потужності.

І при її досягненні граничних меж досягає швидкість утворення енергії в креатинфосфатній реакції.

Потужність роботи зв'язана оберненопропорційною залежністю з граничною тривалістю: чим більша потужність роботи, тим швидше проходять біохімічні зміни, які ведуть до втоми, і тим менший час роботи.

Якщо цю залежність представити графіком, на якому по вертикалі відкладений логарифм потужності (чи швидкості), а по горизонталі-логарифм граничного часу роботи з цією потужністю, то графік набирає вигляд ламаної лінії, розділеної на чотири відрізки, які відображають різний ступінь залежності

граничного часу роботи від її потужності. Ці чотири відрізки відповідають чотирьом зонам відносної потужності (за класифікацією, яка застосовується в фізіології і біохімії спорту) максимальної, субмаксимальної, великої та помірної. Гранична тривалість робіт в зоні максимальної потужності складає 15-20 сек, в зоні субмаксимальної потужності від 20 сек до 2-3 хв, в зоні великої потужності - до 10 хв і в зоні помірної потужності - до 1-5 год.

Логарифмічна залежність між відносною потужністю і граничним часом роботи наявність декількох компонентів у логарифмічному графіку залежності "потужність - граничний час" засвідчує про те, що фактори, які визначають працездатність організму в різних зонах відносної потужності різні. Це можна також побачити на графіку, який показує зміну швидкості анаеробних процесів енергоутворення в залежності від граничної тривалості вправи (по вертикалі відкладена швидкість енергоутворення в калоріях на кг/хв, по горизонталі - час в хвилинах).

Робота в зоні максимальної потужності забезпечується енергією в основному, за рахунок АТФ і креатинфосфату, частково за рахунок гліколізу. Однак швидкість гліколізу в цій зоні не досягає свого найвищого значення, тому вміст молочної кислоти в крові переважно не перевищує 100-150% мг, мобілізація глікогену печінки майже не проходить; вміст глюкози в крові майже не змінюється порівняно зі станом спокою, а якщо і збільшується, то лише за рахунок предстартової рефлексорної реакції. Кисневий запит може складати 7-14, а кисневий борг - 6-12л, тобто 95% від кисневого запиту. Зміна швидкості енергоутворення у залежності від граничної тривалості.

Енергетичне забезпечення роботи у зоні субмаксимальної потужності проходить в основному, за рахунок анаеробного гліколізу, і в крові у великій кількості з'являється молочна кислота. Концентрація її може досягати 250 і більше мг/100 мл крові. Кисневий запит при такій роботі може досягати 20-40 л. При цьому рівень енергетичних затрат в 4-5 разів перевищує максимум аеробної продукції енергії. До кінця такої роботи зростає частка аеробних реакцій в її енергозабезпеченні. Кисневий борг у цій зоні потужності найбільший за абсолютним значенням (до 15л) і складає до 50% від кисневого запиту.

Посилюється мобілізація глікогену печінки, рівень глюкози в крові може досягати 200 мг/100 мл. Під впливом продуктів анаеробного розпаду змінюється проникливість мембран для білків, їх вміст в крові збільшується вони можуть виходити в сечу, де їх концентрація досягає 1,5%.

В зоні потужності основне значення мають аеробні джерела енергії при досить ще високому рівні розвитку гліколізу. Участь анаеробних процесів в енергозабезпеченні роботи швидко зменшується зі збільшенням тривалості роботи. При такій роботі кисневий запит може досягати 50-150 л, а рівень енергозатрат у 1,5-2 рази перевищує максимум аеробної продукції енергії.

Вміст молочної кислоти в крові при такій роботі складає біля 150-180 мг/100 мл крові, глюкози - біля 150 мг/мл крові. Білок в сечі є, але його вміст нижчий, ніж при роботі субмаксимальної потужності (біля 0,6%).

Найбільш інтенсивні вправи у зоні помірної потужності здійснюються при максимумі аеробного виробництва енергії. Кисневий запит може досягати 500-1500 л, кисневий борг не перевищує; вміст молочної кислоти в крові складає 60-80 мг/100 мл крові. Внаслідок посиленого витрачання глікогену печінки вміст глюкози в крові падає нижче 80 мг/100мл крові; в сечі у значних кількостях з'являються продукти розпаду білків, спостерігається велика втрата організмом води та мінеральних солей.

Для оцінки здатності людини виконувати роботу в різних зонах потужності застосовуються поняття " аеробної" та " анаеробної продуктивності".

Аеробна продуктивність - це здатність людини виконувати тривалу напружену м'язову роботу в умовах граничного напруження в діяльності серцево-судинної та дихальної системи і максимального споживання кисню. Остання величина застосовується для кількісної оцінки аеробної продуктивності. На аеробну продуктивність дуже впливає активність тканинних дихальних ферментів, стан мітохондріальних мембран, величина запасів енергетичних речовин, які включаються в аеробні перетворення.

Анаеробна продуктивність - це здатність виконувати напружену м'язову роботу в умовах дефіциту кисню. Вимірюється вона максимальною величиною кисневого боргу і максимумом концентрації молочної кислоти в крові. На анаеробну продуктивність великий вплив має активність креатинфосфокінази і ферментів гліколізу, величина м'язових запасів глікогену і креатинфосфату та лужних буферних резервів організму.