Обмін речовин та енергозабезпечення м’язової діяльності

План

1. Поняття про обмін речовин і енергії.
2. Механізми ресинтезу АТФ у тканинах.
3. Поняття про аеробну й анаеробну продуктивність організму. Аеробна й анаеробна потужність і ємність.
4. Поняття про поріг анаеробного обміну (ПАНО).
5. Поняття про кисневий запит, споживання кисню, кисневий борг.

Обмін речовин і енергії або метаболізм (від грец. μεταβολή, «перетворення, зміна») — сукупність хімічних і фізичних перетворень речовин й енергії, які **забезпечують життєдіяльність організму**.

Обмін речовин складається з процесів асиміляції та дисиміляції.

Асиміляція (анаболізм) — процес засвоєння організмом речовин та енергії.

Дисиміляція (катаболізм) — процес розпаду складних органічних сполук, при якому витрачається енергія.

ФУНКЦІЇ:

- ◊ Забезпечення клітини (організму) енергією
- ◊ Забезпечення клітини (організму) будівельним матеріалом
- ◊ Виведення з клітини (організму) відпрацьованих продуктів життєдіяльності

Обмін речовин

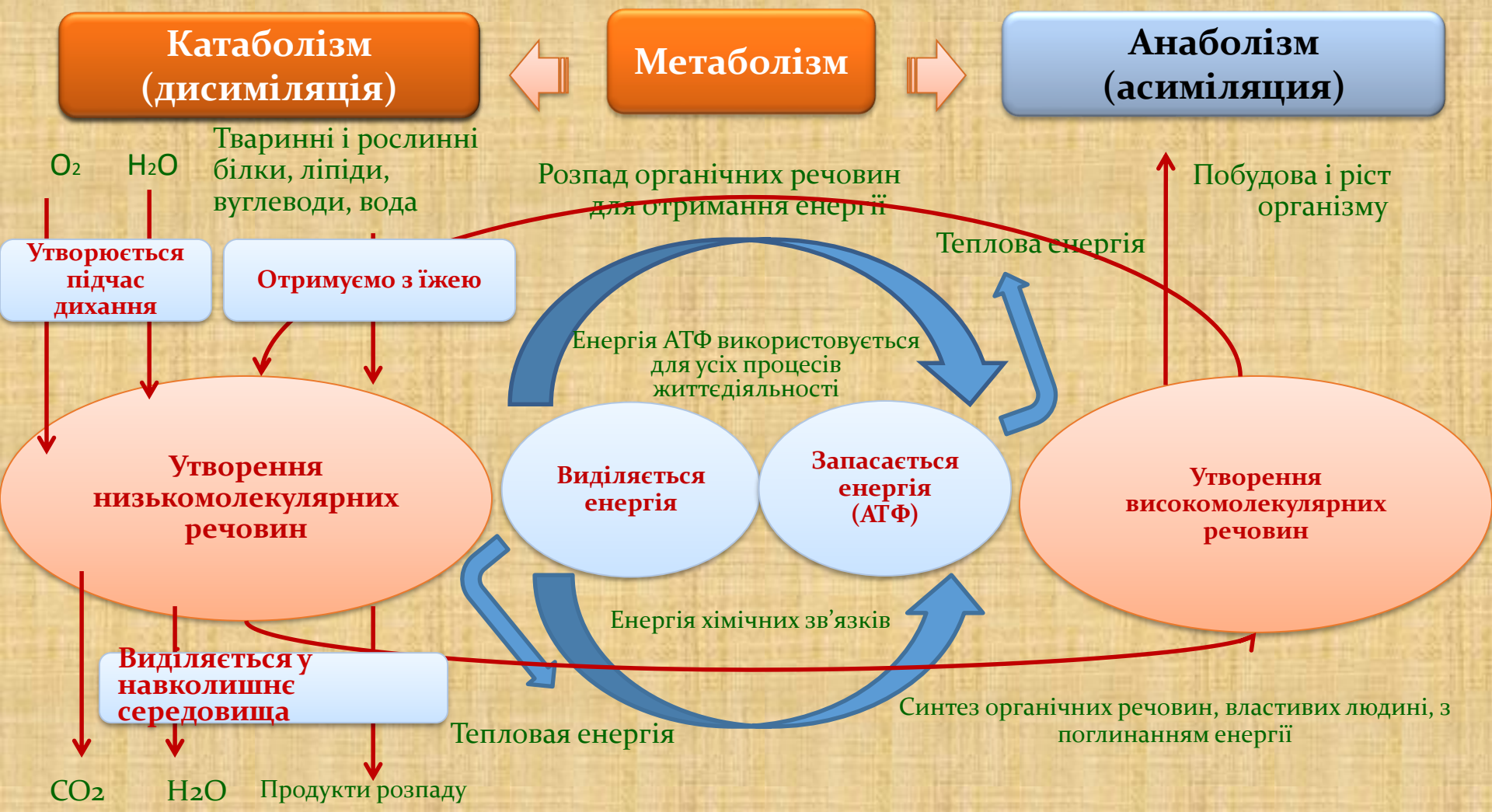
- Пластичний обмін (асиміляція, анаболізм)
- Енергетичний обмін (дисиміляція, катаболізм)
- Екскреція

Обмін речовин та енергії забезпечує пластичні та енергетичні потреби організму.
Хімічна енергія зв’язків у органічних сполуках продуктів харчування після їхнього розпаду (окислення) перетворюється на
-механічну енергію скорочення м'язів;
-електричну енергію проведення нервового імпульсу;
-променеву енергію теплового випромінювання (вивільняється під час роботи).

ЕТАПИ ОБМІНУ РЕЧОВИН

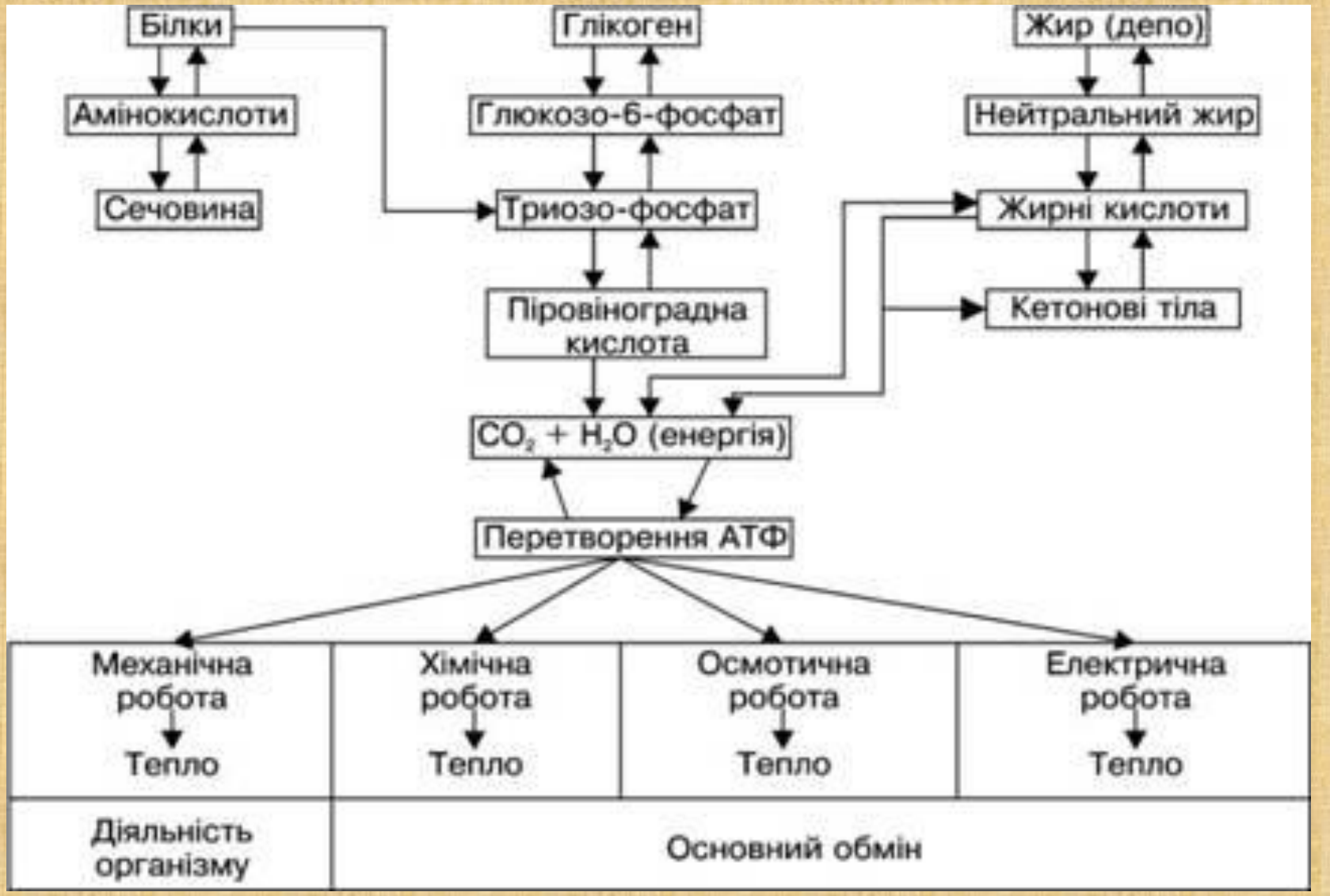
Перший етап	**Ферментативне розщеплення білків, ліпідів і вуглеводів**
Другий етап	**Транспорт поживних речовин кров'ю до тканин і клітинний метаболізм**
Третій етап	**Виведення кінцевих продуктів метаболізму у складі сечовини (сечової кислоти), калу, поту, через легені у вигляді CO_2 тощо**

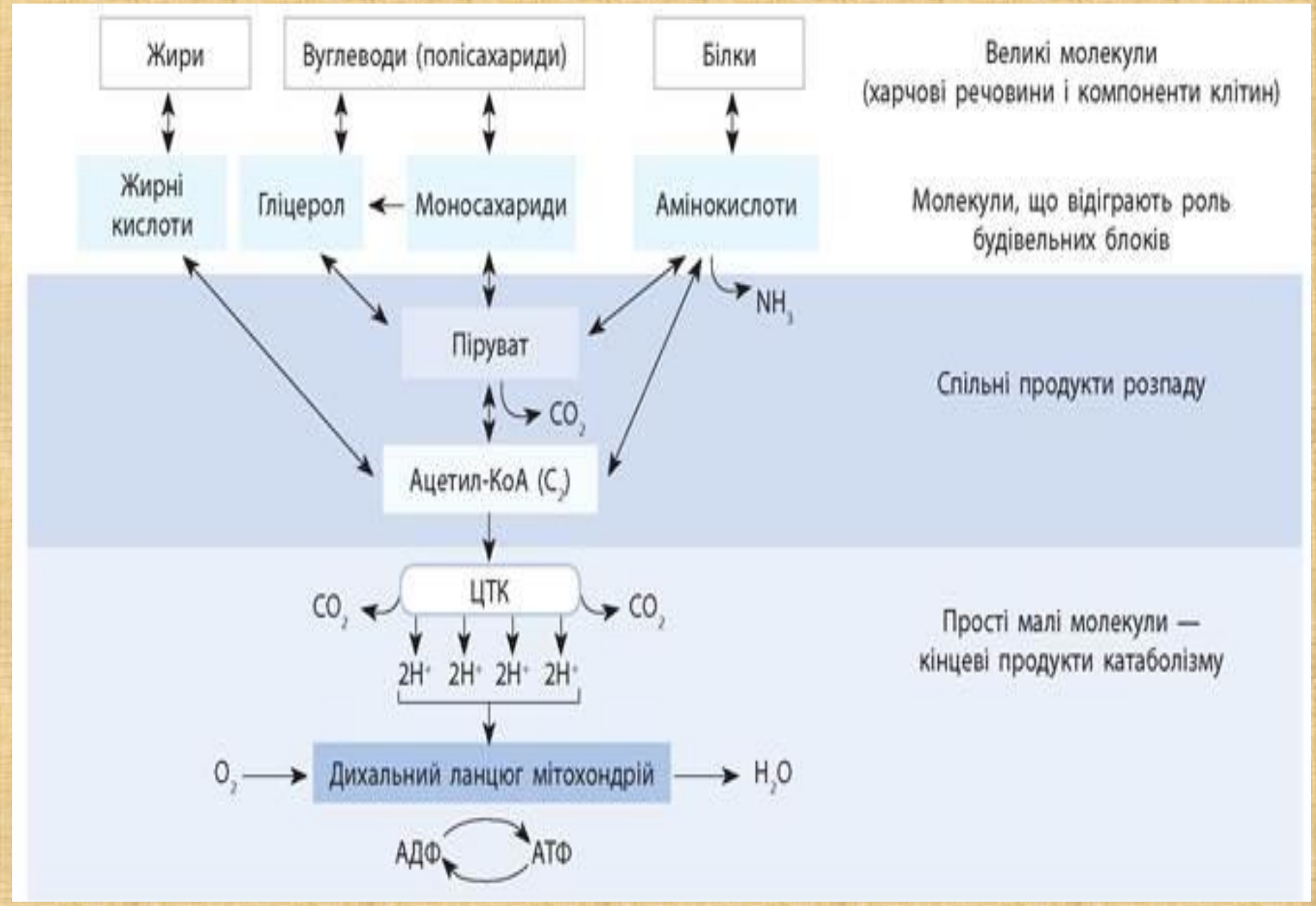
СХЕМА ОБМІНУ РЕЧОВИН



Утворення енергії з продуктів:

- **Розщеплення великих молекул на малі (*гідроліз*)**
- **з вуглеводів утворюються 3 гексози (*глюкоза, галактоза, фруктоза*);**
- **з білків - 20 амінокислот;**
- **з жирів - тригліцериди (*гліцерин і жирні кислоти*).**
- **Розщеплення шляхом неповного згоряння – утворюються CO_2, H_2O, α-кетоглутарова щавлево-оцтова кислоти і оцтова кислота (*вивільнюється 30% енергії).***
- **Розщеплення у циклі трикарбонових кислот (цикл Кребса) до кінцевих продуктів – CO_2, H_2O. При цьому вивільнюється 60-70% енергії.**


Білки
Амінокислоти
Сечовина
Глікоген
Глюкозо-6-фосфат
Триозо-фосфат
Піровіноградна кислота
Жир (депо)
Нейтральний жир
Жирні кислоти
Кетонові тіла
$CO_2 + H_2O$ (енергія)
Перетворення АТФ
Механічна робота
Тепло
Хімічна робота
Тепло
Осмотична робота
Тепло
Електрична робота
Тепло
Діяльність організму
Основний обмін

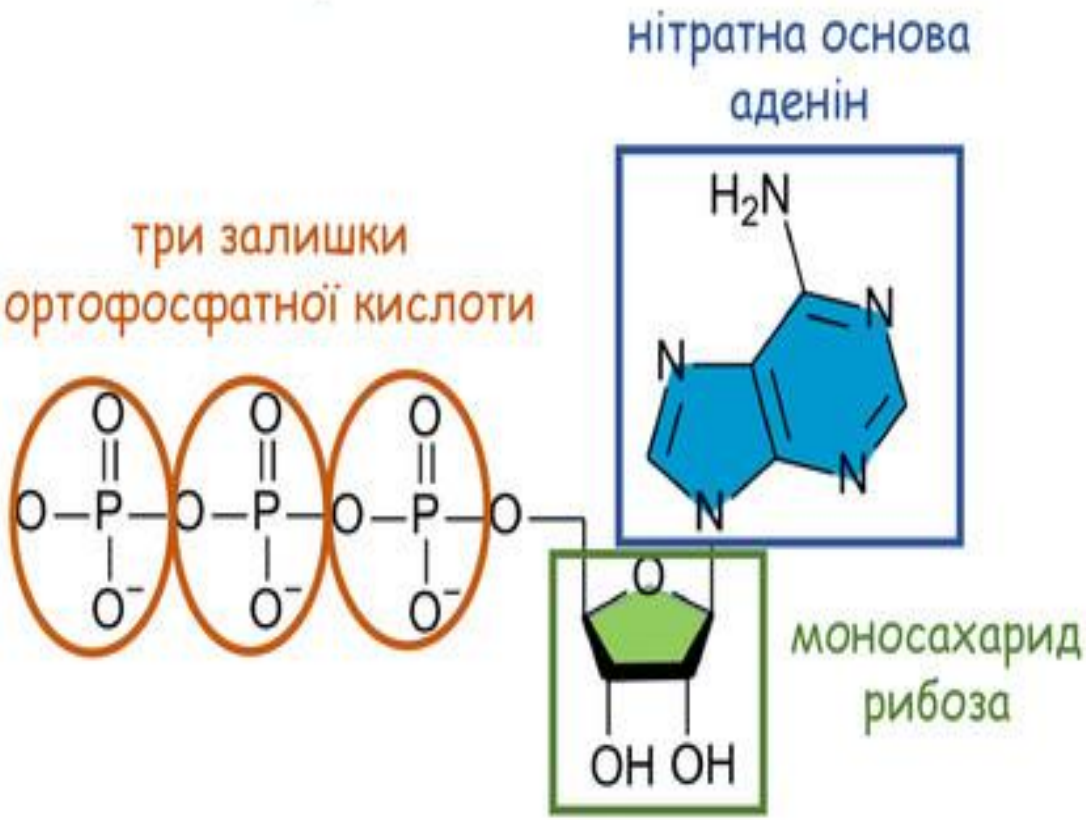

Жири
Вуглеводи (полісахариди)
Білки
Великі молекули
(харчові речовини і компоненти клітин)
Жирні кислоти
Гліцерол
Моносахариди
Амінокислоти
Молекули, що відіграють роль будівельних блоків
NH_3
Піруват
CO_2
Ацетил-КоА (C_2)
Спільні продукти розпаду
ЦТК
CO_2
CO_2
$2H^+$ $2H^+$ $2H^+$ $2H^+$
Прості малі молекули — кінцеві продукти катаболізму
O_2
Дихальний ланцюг мітохондрій
H_2O
АДФ
АТФ

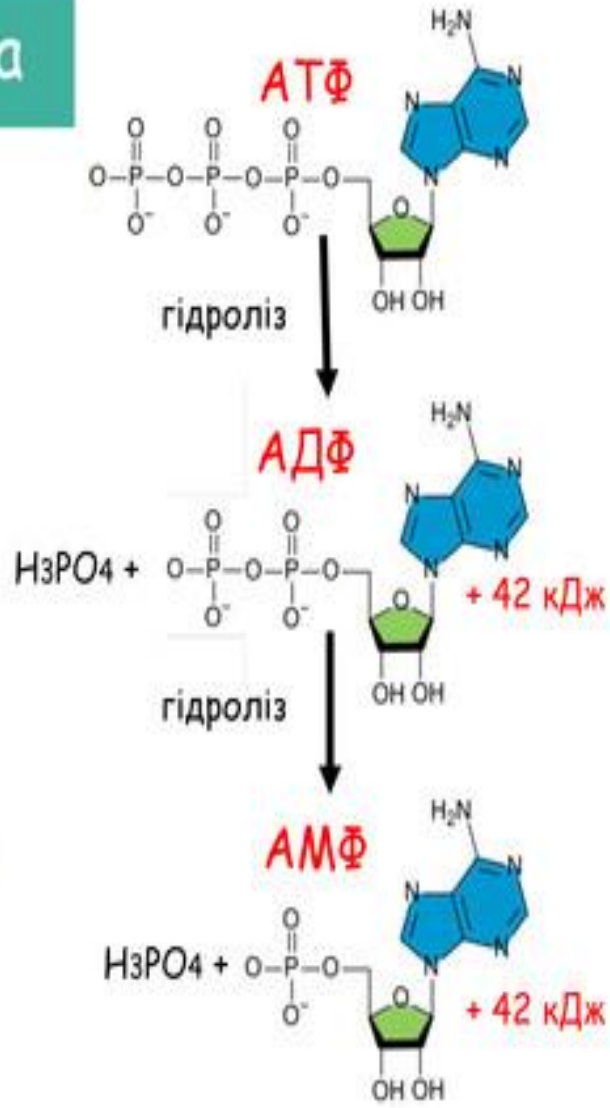
Зберігання енергії

- **Зберігання енергії здійснюється за рахунок перетворення енергії розщеплення харчових продуктів у особливу форму хімічних сполук – *макроерги*. Носіями хімічної енергії в організмі є фосфорні сполуки.**
- **Центральне місце займає *АТФ* – у формі цієї сполуки у організмі використовується від 60 до 70% усієї енергії.**
- **За 24 години у організмі утворюється і розщеплюється АТФ, кількість якої дорівнює масі тіла.**

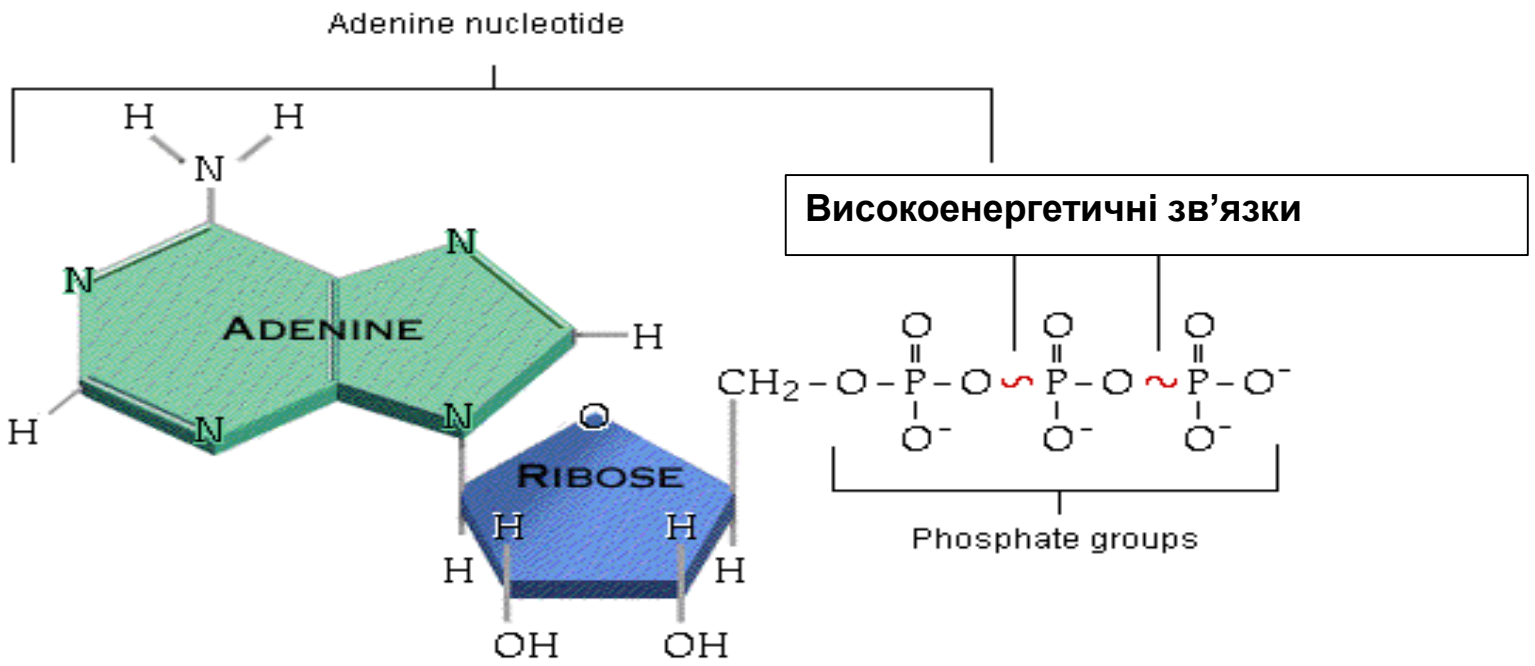
АТФ – аденозинтрифосфатна кислота

АТФ – це нуклеотид





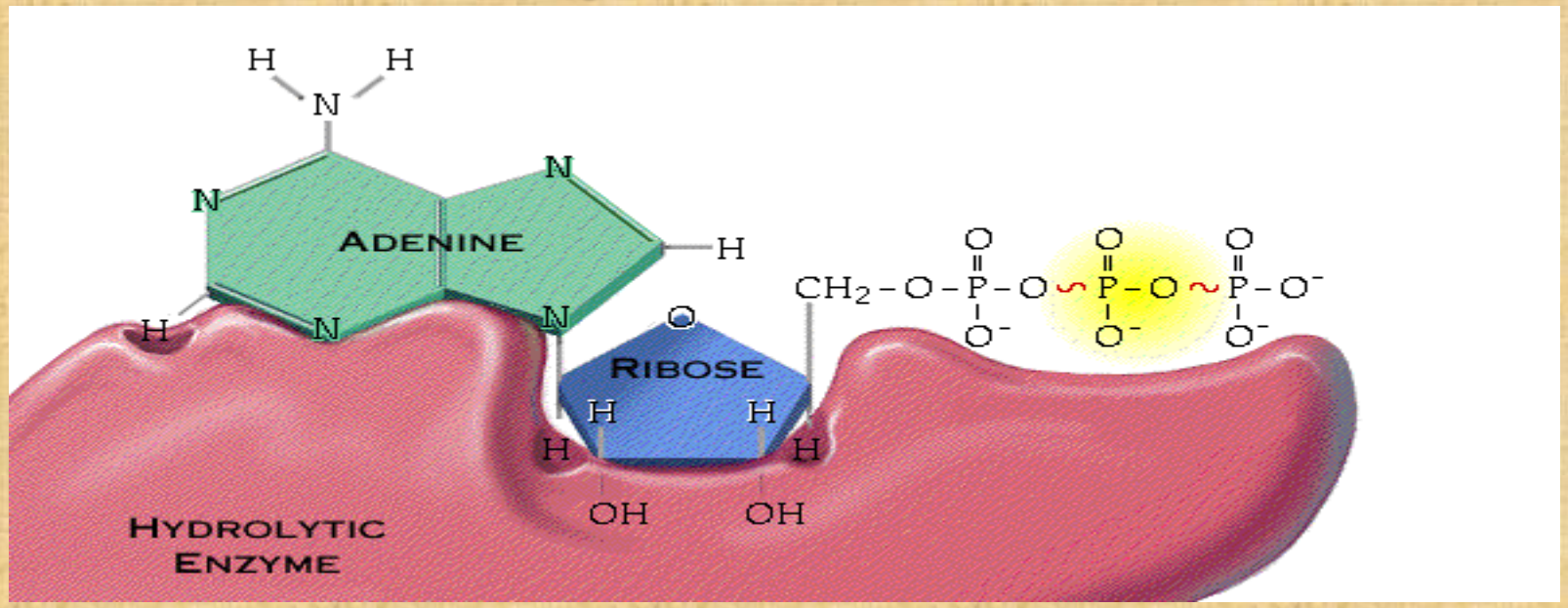
Структура АТФ



***АТФ** — це аденіловий нуклеотид, що акумулює та переносить енергію в організмі.*

АТФ є універсальною макроергічною сполукою, в якій із трьох залишків фосфорної кислоти два - **високоенергетичні (макроергічні**). Один із них або два легко відщеплюються під впливом ферментів, що супроводжується виділенням енергії, яка використовується для різноманітних процесів клітини. Відщеплення однієї грам-молекули фосфорної кислоти супроводжується виділенням приблизно 42 кДж енергії.

Гідроліз АТФ



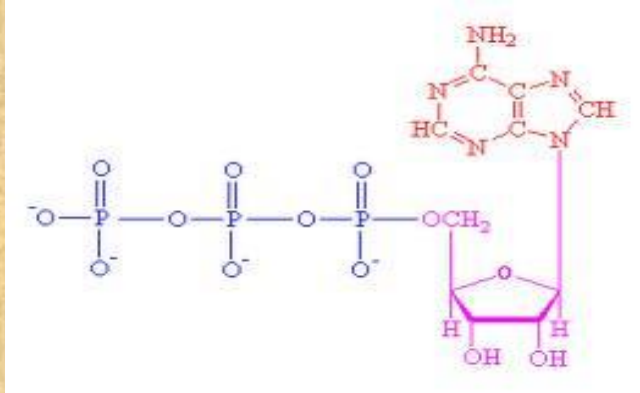
Потенційна (із запасів) енергія АТФ звільняється при розриві кінцевих високоенергетичних зв'язків гідролітичними ферментами.

фермент, 42 кДж фермент, 42 кДж

АМФ ⇄ АДФ ⇄ АТФ

АТФ + H_2O ---> АДФ + H_3PO_4 + енергія
АТФ + H_2O --> АМФ + $H_4P_2O_7$ + енергія
При гідролізі АТФ до аденозиндифосфату (АДФ) та ортофосфату або до аденозинмонофостату (АМФ) та пірофосфату виділяється велика кількість енергії.

Біоенергетика м'язової тканини



- М'язи потребують енергії АТФ.
- Запасів АТФ вистачає на 2-4 секунди роботи.
- М'язи перетворюють хімічну енергію на механічну.
- Тільки 40% енергії витрачається на роботу м'язів, решта розсіюється у вигляді тепла.
- Підтримка концентрації АТФ на певному рівні і подальше виконання м'язової роботи відбувається завдяки швидкому відновленню (ресинтезу) АТФ із продуктів її розпаду і такої кількості енергії, яка виділилася при розпаді: АДФ + H_3PO_4+ Q→ АТФ

Сигналом для початку ресинтезу АТФ є поява продуктів гідролізу АТФ

Енергетичними джерелами для ресинтезу АТФ у скелетних м'язах та інших тканинах виступають багаті енергією:

- фосфатовмісні речовини, що присутні у тканинах *(креатинфосфат, АДФ)*
- речовини, що утворюються у процесі катаболізму *глікогену*
- речовини, що утворюються у процесі катаболізму *жирних кислот*
- інші енергетичні субстрати (н-д, метаболіти *дифосфогліцеринова і фосфопіровиноградна кислоти*)
- енергія протонного (Н+) градієнту на мембрані мітохондрій, що утворюється у результаті аеробного окиснення різних речовин.

У залежності від того, за допомогою якого біохімічного процесу постачається енергія для утворення молекул АТФ, виділяють **4 механізми ресинтезу АТФ у тканинах**

Анаеробні механізми:
- ***креатинфосфокіназний*** (алактатний) механізм, що забезпечує ресинтез АТФ за рахунок перефосфорилювання між креатинфосфатом і АДФ;
- ***гліколітичний*** (лактатний) механізм, що забезпечує ресинтез АТФ у процесі ферментативного анаеробного розщеплення глікогену м'язів чи глюкози крові, що закінчується утворенням молочної кислоти, тому і називається лактатним;
- ***міокіназний*** механізм, що здійснює ресинтез АТФ за рахунок реакції перефосфорилювання між двома молекулами АДФ за участю ферменту міокінази (аденілаткінази).

Аеробний механізм ресинтезу АТФ включає в основному реакції ***окисного фосфорилювання***, що протікають у мітохондріях. Енергетичні субстрати - глюкоза, жирні кислоти, частково амінокислоти, а також проміжні метаболіти гліколізу та окиснення жирних кислот – молочна кислота, кетонові тіла

Кожен механізм має різні енергетичні можливості, які характеризуються за наступними <u>критеріями оцінки механізмів енергоутворення:</u>

Максимальна потужність - це найбільша швидкість утворення АТФ у даному метаболічному процесі. Вона лімітує граничну інтенсивність роботи, що виконується за рахунок даного механізму.

Швидкість розгортання оцінюється часом досягнення максимальної потужності даного шляху ресинтезу АТФ від початку роботи.

Метаболічна ємність відображає загальну кількість АТФ, що може бути отримана в даному механізмі ресинтезу за рахунок величини запасів енергетичних субстратів; ємність лімітує обсяг роботи, що виконується.

Метаболічна ефективність - це та частина енергії, що накопичується в макроергічних зв'язках АТФ; визначає економічність роботи (відношення корисно витраченої енергії до її загальної кількості, що виділилась у даному метаболічному процесі).

Креатинфосфокіназний шлях ресинтезу АТФ(алактатний)

Забезпечує ресинтез АТФ за рахунок креатинфосфату, концентрація якого у м'язах у 3-4 рази вища ніж АТФ. Це реакція перефосфорилювання між креатинфосфатом та АДФ, яку каталізує фермент креатинфосфокіназа: **КрФ + АДФ → АТФ + Кр**

Висока швидкість (висока спорідненість КрФ і АДФ, реакція протікає безпосередньо на міофібрилах). Максимальна потужність розвивається на 0,5-0,7 с інтенсивної роботи, що свідчить про **велику швидкість розгортання**

Максимальна потужність вища потужності анаеробного гліколізу в 1,5-2 рази і аеробного процесу в 3-4 рази. Швидкість розщеплення креатинфосфату пропорційна інтенсивності вправи або величині м'язового напруження.

Метаболічна ємність невелика, бо запаси КрФ перевищують запаси АТФ лише у 3 рази. На 5-ій с роботи вміст знижується на 1/3, на 15-ій с – наполовину (10-15 с у нетренованих, та 25-30 с у високо тренованих спринтерів). Після цього починається гліколітичний механізм.

Метаболічна ефективність креатинфосфокіназної реакції становить 76%.

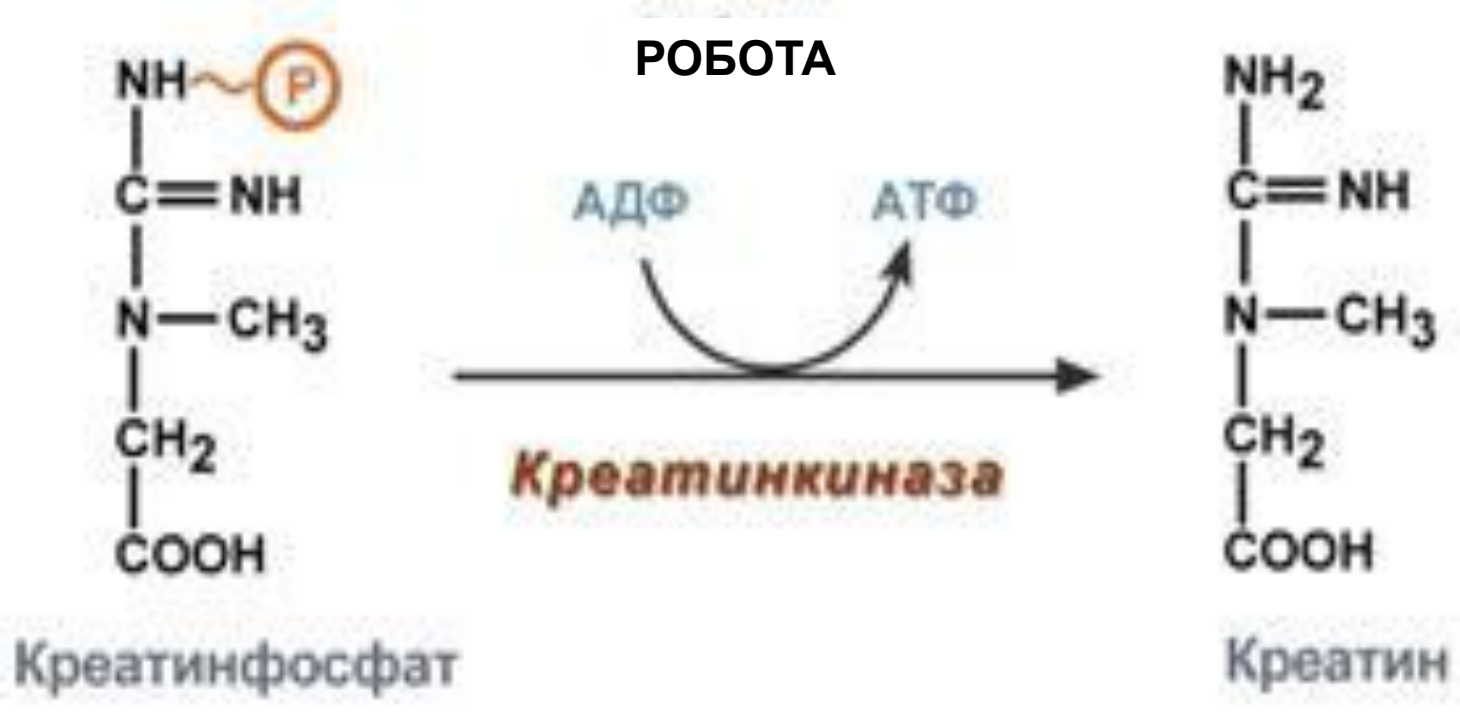
Креатинфосфокіназний шлях ресинтезу АТФ (алактатний)

Забезпечує постійність АТФ при різкому її використанні під час інтенсивної роботи та при нагромадженні АТФ у період відпочинку (перефосфорилювання АТФ і вільного креатину).

- Відіграє вирішальну роль в енергозабезпеченні короткотривалої роботи максимальної інтенсивності протягом 15-30с.
- Забезпечує можливість швидкого переходу від спокою до роботи, раптових змін темпу по ходу її виконання, а також фінішного прискорення.
- Функціонує переважно в швидкоскоротливих м'язових волокнах, (біохімічна основа швидкості та локальної м'язової сили).
- Запаси креатинфосфату в організмі залежать від вмісту креатину.
- Вміст креатинфосфату у м’язах збільшується у 1,5-2 рази під час адаптації організму до швидкісних і силових фізичних навантажень, що збільшує ємність даного механізму ресинтезу АТФ.

Роль креатинфосфату

Креатинфосфат – «депо» макроергічних зв'язків, забезпечує ресинтез АТФ у перші секунди роботи (5-10 сек), знаходиться в скелетних м'язах, міокарді, нервовій тканині.



Гліколітичний механізм ресинтезу АТФ

Використовуються внутрішньом’язові запаси глікогену, і глюкоза, що надходить з крові *(розщеплюються до молочної кислоти).* Більшість ферментів гліколізу локалізовані у саркоплазмі м’язових волокон.

За рахунок окиснення молекули глюкози утворюється 2, а глікогену – 3 молекули АТФ, які можуть бути витрачені при м'язовій роботі.

Утворення кінцевого продукту гліколізу – молочної кислоти – відбувається тільки за відсутності O_2, однак гліколіз може відбуватись і в присутності O_2 і тоді він закінчується утворенням піровиноградної кислоти.

Підключається з перших секунд роботи → ↑концентрації молочної кислоти у м’язах. Активації гліколізу сприяє зниження запасів КрФ та накопичення АМФ, що утворюється у міокіназній реакції ресинтезу АТФ.

Гліколітичний механізм ресинтезу АТФ

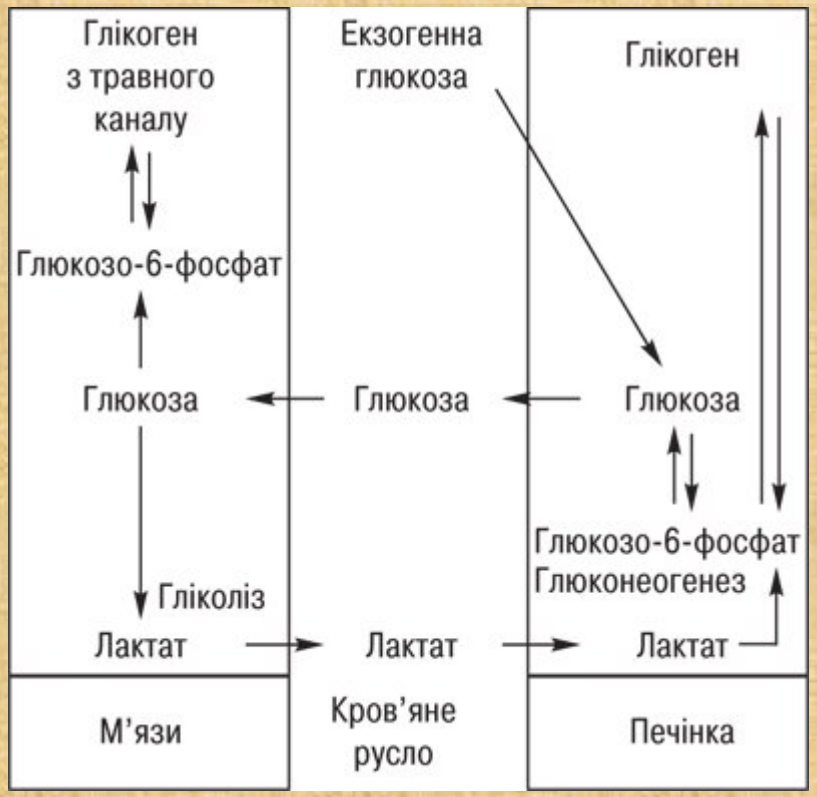
Максимальна потужність у 2 рази нижча за потужність креатинфосфокіназної реакції, та у 2-3 рази вища потужності аеробного процесу.

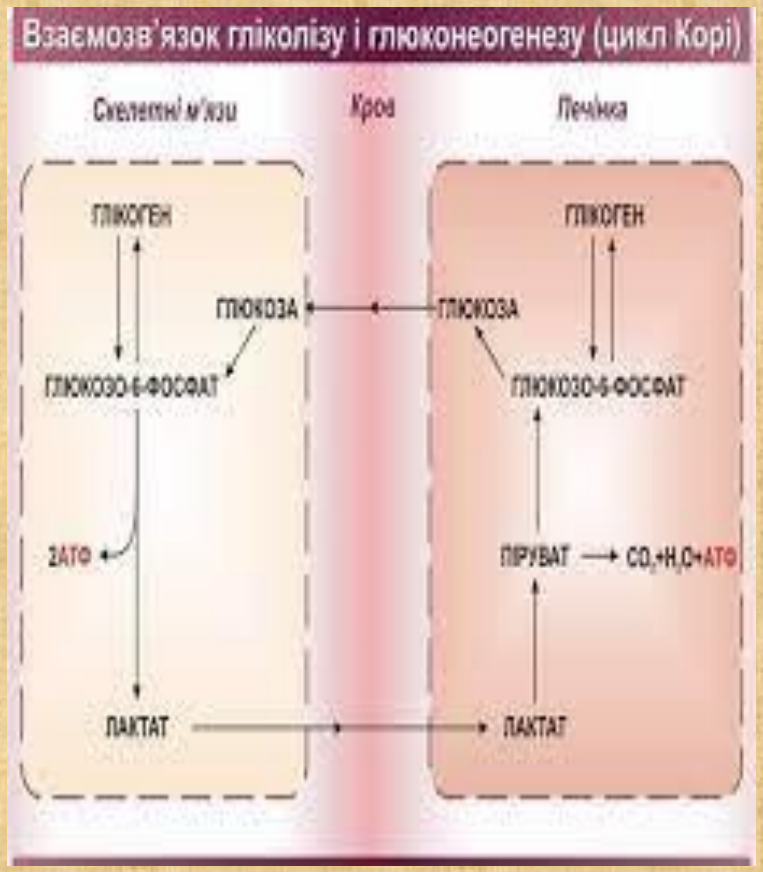
Швидкість розгортання – 20-30с. До кінця 1-ї хв. роботи це основний механізм ресинтезу АТФ. Далі відбувається ↓ активності ферментів гліколізу внаслідок дії лактату та ↓внутрішньоклітинного pH. Половинний час (час, за який швидкість процесу ↓ наполовину) - 15 хв.

Метаболічна ємність залежить від внутрішньом'язових запасів вуглеводів та ємності буферних систем, які стабілізують величину внутрішньоклітинного pH. Вона забезпечує виконання анаеробної роботи від 30 с до 2-3 хв.

За рахунок гліколізу – тривалі прискорення по ходу вправи та на фініші дистанції. Біохімічна основа спеціальної швидкісної витривалості організму.

Цикл Корі та глюкозо-аланіновий цикл

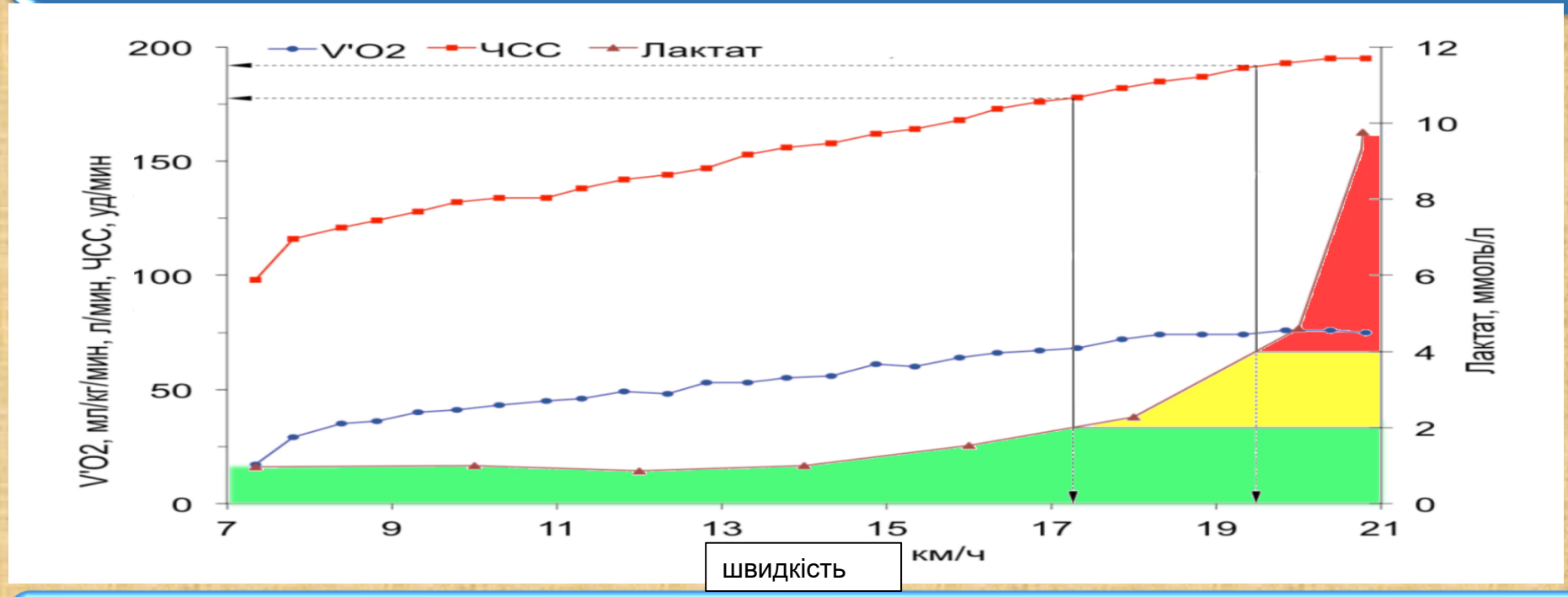




Анаеробний гліколіз

- Використовується глюкоза крові та глікогену
- Не потребує кисню
- Продукти: лактат та 2 АТФ
- Запас АТФ, креатинфосфату і гліколіз можуть забезпечити роботу м'язів протягом 1 хвилини
- Не забезпечує утворення великої кількості АТФ. Проте поєднання дії гліколітичної анаеробної і системи АТФ-КрФ забезпечують інтенсивну м'язову роботу при обмеженому надходженні кисню.
- Недолік - викликає накопичення молочної кислоти у крові і рідинах організму (до 25 моль•кг), що порушує гомеостаз. При цьому гальмується діяльність гліколітичних ферментів.

Аеробний поріг (перший анаеробний поріг) - це рівень навантаження, при якому утворення лактату в скелетному м'язі перевищує його розпад, тому лактат починає поступово накопичуватися в загальній системі циркуляції (перевищує 2 ммоль/л.) **Анаеробний поріг (лактатний) або ПАНО** спостерігається, коли лактат починає накопичуватися з дуже великою швидкістю (рівень лактату в крові перевищує 4 ммоль/л). Вимірюється у % від величини МСК (ПАНО = % від МСК).



Величина ПАНО є важливим показником ефективності процесів енергоутворення у м'язах, інтенсивності тренуючих навантажень, росту ступеня тренованості, що широко використовується при біохімічному контролі функціонального стану спортсмена.

З ростом ступеня тренованості на витривалість поріг лактату збільшується, тобто настає при більш інтенсивній роботі.

Міокіназна реакція

Відбувається у м'язах, при значному ↑ концентрації АДФ у саркоплазмі. Полягає у перенесені макроергічної фосфатної групи з однієї молекули АДФ на іншу, з утворенням АТФ. Каталізує дану реакцію фермент міокіназа.

АДФ + АДФ → АТФ + АМФ

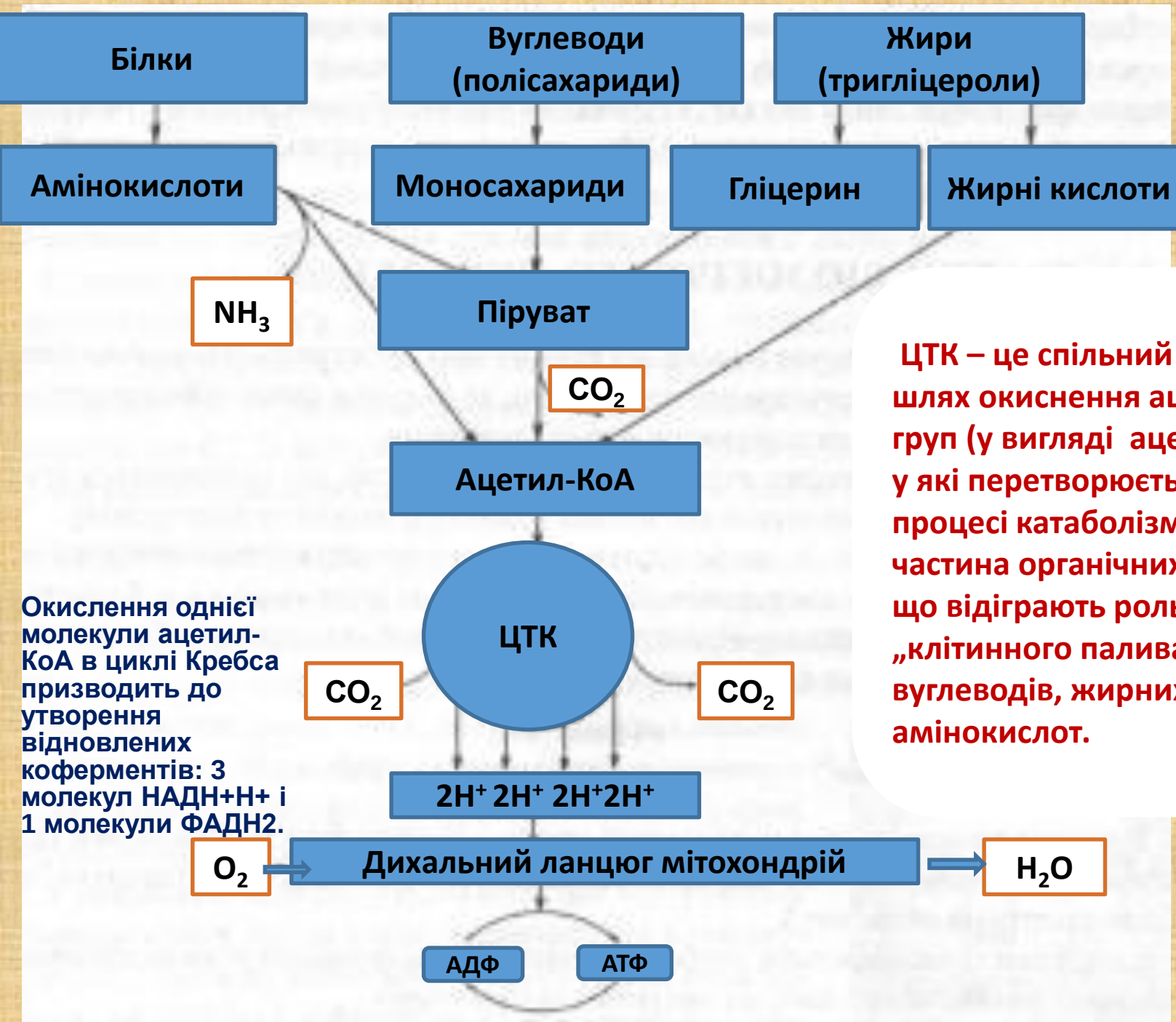
Механізм функціонує при вираженій м'язовій втомі, коли швидкість процесів ресинтезу АТФ не врівноважують швидкість розщеплення АТФ (*аварійний механізм, що забезпечує ресинтез АТФ в умовах, коли інші шляхи ресинтезу вже неможливі*).

Аеробний механізм енергоутворення

Основна частина енергії, яка необхідна для життєдіяльності організму, звільняється у аеробних окисних процесах, які називаються окисним фосфорилюванням (*90% загальної кількості АТФ, що ресинтезується в організмі).* **Ферменти окисного фосфорилювання знаходяться у мітохондріях. В якості субстрату - глюкоза, молочна та піровиноградна кислоти, гліцерин, жирні кислоти, амінокислоти, кетонові тіла та інші недоокиснені продукти метаболізму.**

***Всі ці речовини перетворюються у ацетил-КоА, який далі окиснюється у циклі лимонної кислоти (ЦТК) до кінцевих продуктів CO_2 і H_2O за участю великої кількості ферментів та O_2, що вдихається.**

***Енергія окиснення накопичується у відновленій формі переснощиків водню НАДН+Н і $ФАДН_2$, які передають високо енергетичні електрони по дихальному ланцюгу на O_2, а протони водню створюють на мембрані мітохондрій протонний градієнт (Н+), який є рушійною силою для генерування АТФ у процесі окисного фосфорилювання.**



Окислення однієї молекули ацетил-КоА в циклі Кребса призводить до утворення відновлених коферментів: 3 молекул НАДН+Н+ і 1 молекули ФАДН2.

ЦТК – це спільний кінцевий шлях окиснення ацетильних груп (у вигляді ацетил-КоА), у які перетворюється у процесі катаболізму більша частина органічних молекул, що відіграють роль „клітинного палива” – вуглеводів, жирних кислот і амінокислот.

Окисне утворення АТФ включає 3 процеси:

- **– гліколіз**
- **– цикл Кребса**
- **– ланцюжок переносу електронів.**

Гліколіз протікає однаково, незалежно від того бере участь у процесі O_2 чи ні. O_2визначає лише долю піровиноградної кислоти, що перетворюється у сполуку, що називається **ацетил-кофермент А.**

Ацетил-кофермент А, який утворився, потрапляє в **цикл Кребса** – складну послідовність хімічних реакцій, що дозволяють завершити його окислювання. Наприкінці циклу Кребса утворюється 2 моль АТФ, вуглекислий газ і водень.

Цикл Кребса пов'язаний із серією реакцій, що називаються **ланцюжком переносу електронів**, у результаті яких водень з'єднується з киснем, створюючи воду.

Окисна система утворення енергії забезпечує одержання 39 моль АТФ з однієї молекули глікогену.

Якщо окислюванню піддаються жири, утворюється 129 моль АТФ, проте для повного згорання жирів потрібна велика кількість кисню, доставка якого обмежена можливостями кисневої транспортної системи.

Енергетичний баланс при повному окисненні глюкози

Послідовність реакцій	Баланс АТФ
I. Гліколіз: перетворення глюкози у піруват (у цитозолі)	
• Фосфорилювання глюкози;	-1
• Фосфорилювання фруктозо-6-фосфату;	-1
• Дефосфорилювання 2 молекул гліцероїл-3-фосфату;	+2
• Дефосфорилювання 2 молекул фосфоенолпірувату;	+2
• *Утворення 2 молекул НАДН(H^+) при окисненні 2 молекул гліцеральдегід-3-фосфату.*	
II. Перетворення пірувату в ацетил-КоА (у мітохондріях)	
• *Утворення 2 молекул НАДН(H^+) в процесі окиснювального декарбоксилювання піувату.*	
III. ЦТК (у мітохондріях)	
• Утворення 2 молекул ГТФ із 2 молекул сукциніл-КоА;	+2
• *Утворення 6 молекул НАДН(H^+) при окисненні 2 молекул ізоцитрату, α-кетоглутарату і малату;*	
• *Утворення 2 молекул ФАДН$_2$ при окисненні 2 молекул сукцинату.*	
IV. Окиснювальне фосфорилювання (у мітохондріях)	
• В результаті перетворення глюкози на I, II та III етапах утворюється 10 молекул НАДН(Н+), кожна з яких дає по 3 молекули АТФ;	+30
• 2 молекули ФАДН$_2$, що утворилися в ЦТК дають по 2 молекули АТФ кожна.	+4
Загальний вихід АТФ на одну молекулу глюкози	38

Аеробний механізм енергоутворення

Метаболічна ємність – при повному окисненні одного глюкозного еквіваленту глікогену в аеробних умовах (38 АТФ).

У 12-18 разів **більш ефективний**, ніж гліколіз (2-3 молекули АТФ) → на окиснення жирів потрібно на 12% O_2 більше, то при використанні однакової кількості O_2, об'єм роботи буде більшим, якщо субстратом окиснення будуть вуглеводи.

Швидкість утворення АТФ у процесі окисного фосфорилювання залежить від наступних факторів: співвідношення АТФ/АДФ; кількості O_2 в клітині, та ефективності його використання; кількості систем дихальних ферментів у мітохондріях; цілісності мембран; кількості мітохондрій; концентрації гормонів, іонів Ca2+

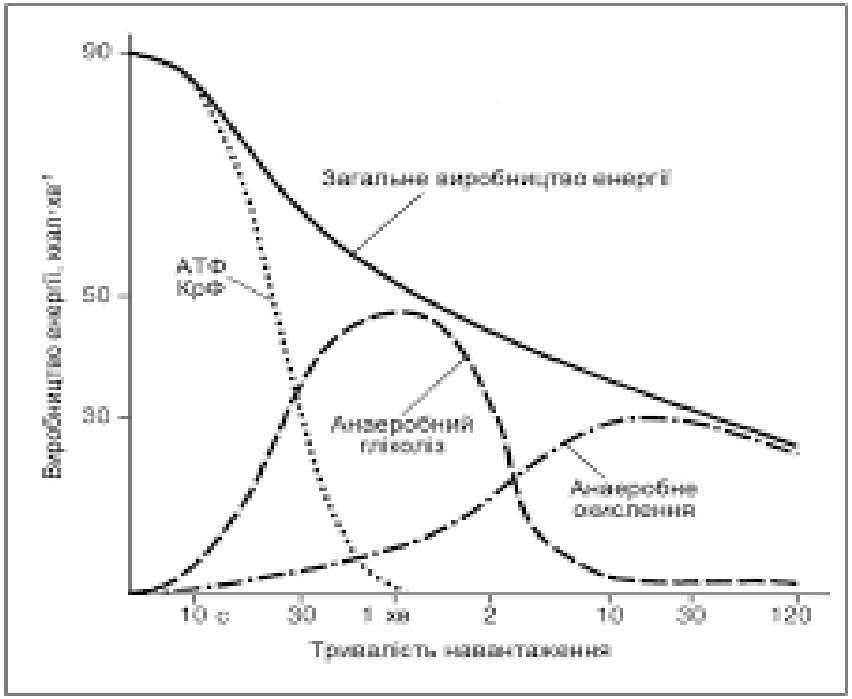
Киснева (окисна) енергетична система

Максимальна потужність залежить від швидкості надходження та утилізації O2 у клітині. Вона досягається на 2-3 хв неінтенсивної роботи у спортсменів та 4-5 хв у неспортсменів.

Процес активно протікає у повільноскоротливих волокнах.

Метаболічна ємність – безмежна, оскільки існують великі запаси енергетичних джерел.

Є біохімічною основою загальної витривалості.



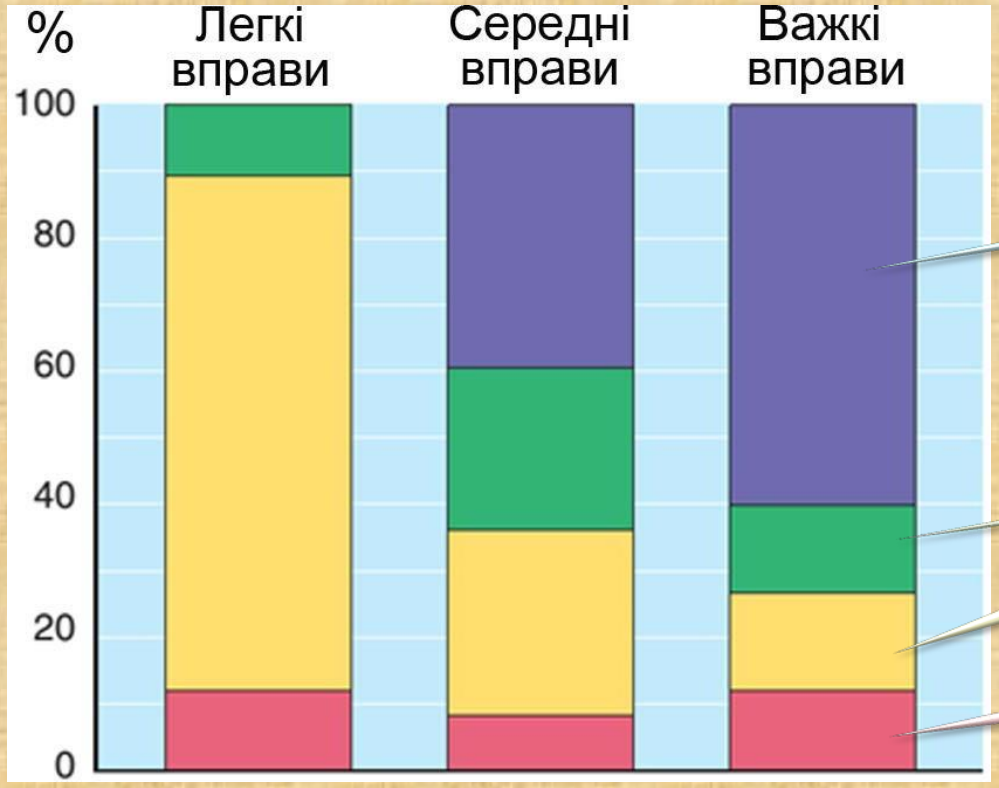
Анаеробна алактатна ємність (АЛАКє) - інтенсивність виробництва енергії за допомогою алактатного анаеробного метаболізму (*виражається величинами абсолютного вмісту Кф і АТФ в організмі).*
Анаеробна алактатна потужність (АЛАКп) - max обсяг фізичного навантаження, який людина може виконати в анаеробних алактатних умовах енергозабезпечення м'язової діяльності *(виражається - час виконання* max *можливого фізнавантаження або к-ть зовнішньої роботи, проведеної під час виконання фізнавантажень в max темпі).*
Анаеробна лактатна ємність (ЛАКє) - інтенсивність виробництва енергії за допомогою лактатного анаеробного метаболізму *(*max *величина вмісту молочної к-ти в організмі, яка може бути нейтралізована його буферними с-ми).*
Анаеробна лактатна потужність (ЛАКп) — max обсяг фізнавантаження, який людина може виконати *в* анаеробних лактатних умовах енергозабезпечення м'язової роботи *(час виконання фізнавантаження субмакс. потужності або к-ть виконаної при цьому зовнішньої роботи).*
Аеробна потужність — max обсяг фізнавантаження, який людина може виконати в аеробних умовах енергозабезпечення м'язової діяльності *(значення абс. і відносної величин* PWC_{170} -«physical working capacity», зона оптимального функціонування ССС у процесі виконання м’язового навантаження знаходиться в межах 170-190 уд/хв*).*
Інтегральним показником величини поточної аеробної ємності організму *є значення максимального споживання кисню (МСК).*

Співвідношення анаеробних і аеробних джерел енергії при різній тривалості фізичних вправ *(за: P. Astrand et al., 1970; І. В. Аулік, 1979, 1990).*

Шлях енергопродукції	Тривалість роботи							
	10 с	1 хв	2 хв	4 хв	10 хв	30 хв	1 год	2 год
Анаеробний	85	70	50	30	10	5	2	1
Аеробний	15	30	50	70	90	95	98	99

Відносний внесок (у%) енергетичних систем (I - фосфагенної, II - лактацидної, III - кисневої)

ЕНЕРГЕТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СКОРОЧЕННЯ М'ЯЗІВ



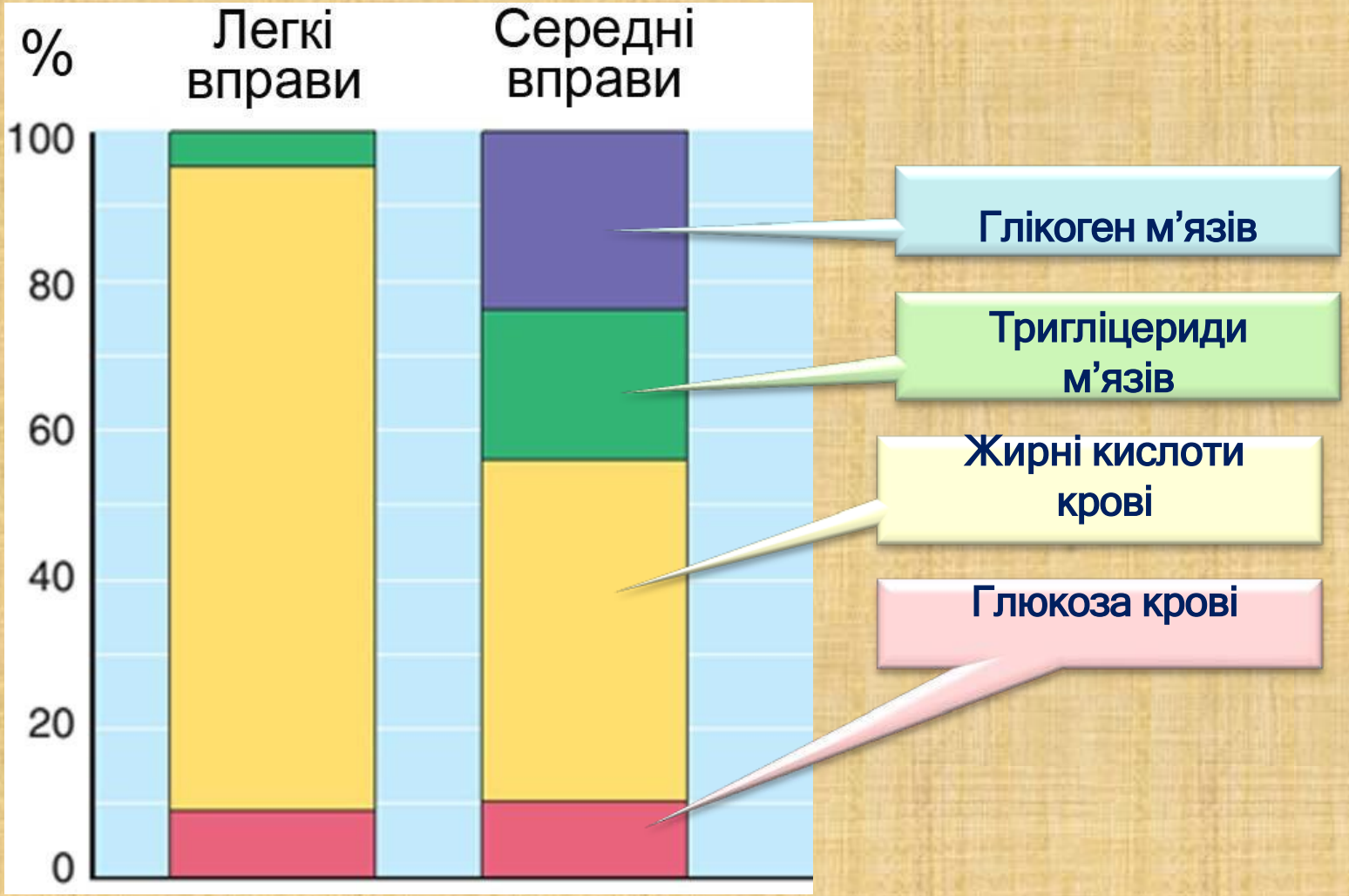
Глікоген м’язів

Тригліцериди м’язів

Жирні кислоти крові

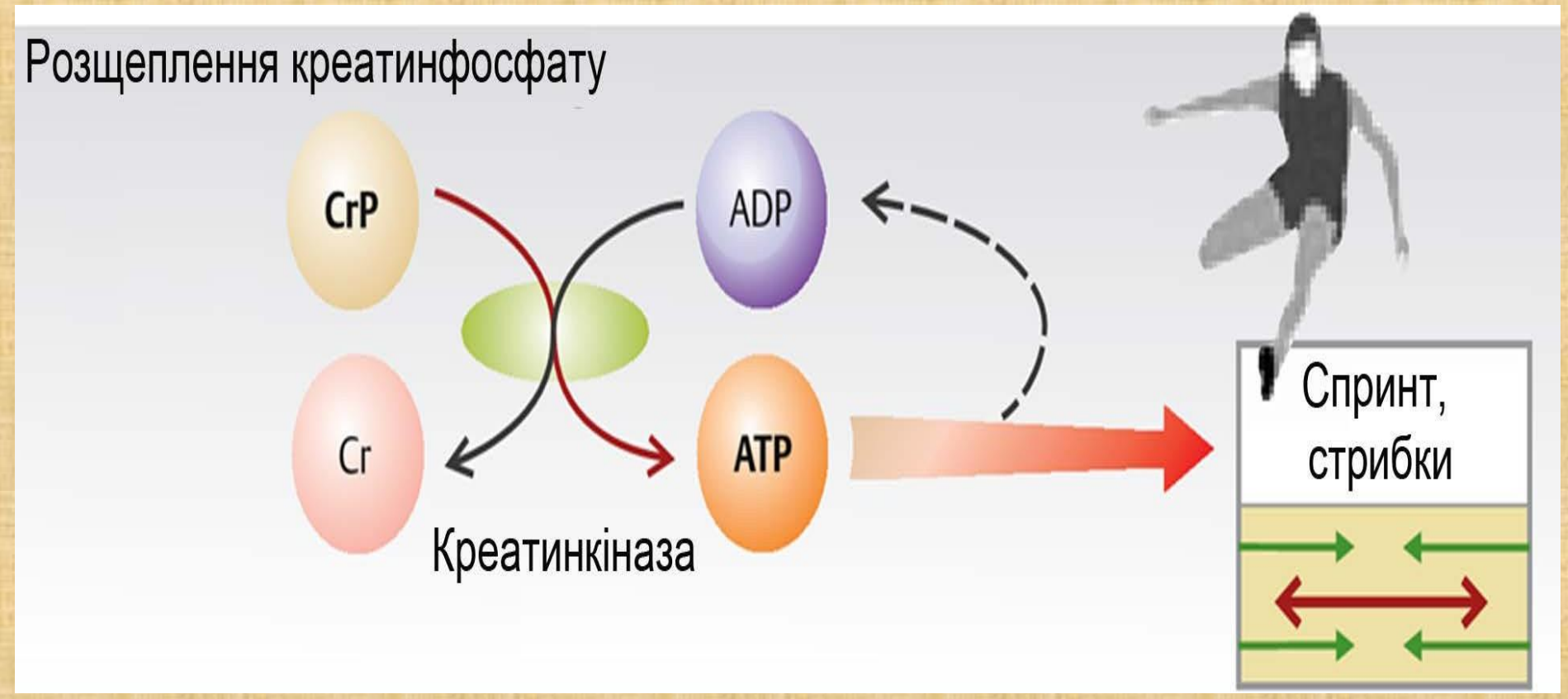
Глюкоза крові

Фізичне навантаження тривалістю до 30 хв.

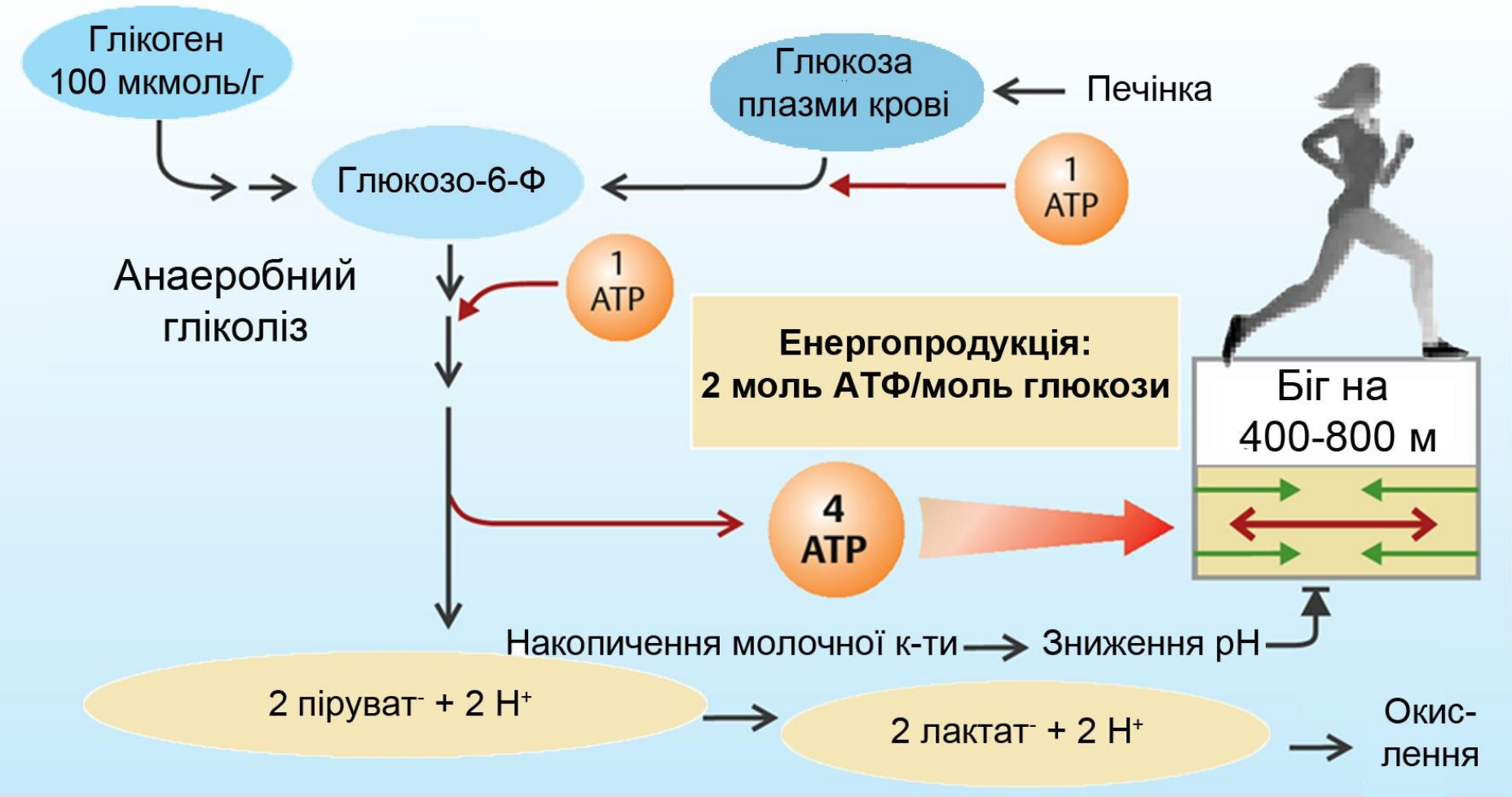


Фізичне навантаження тривалістю до 90-120 хв.

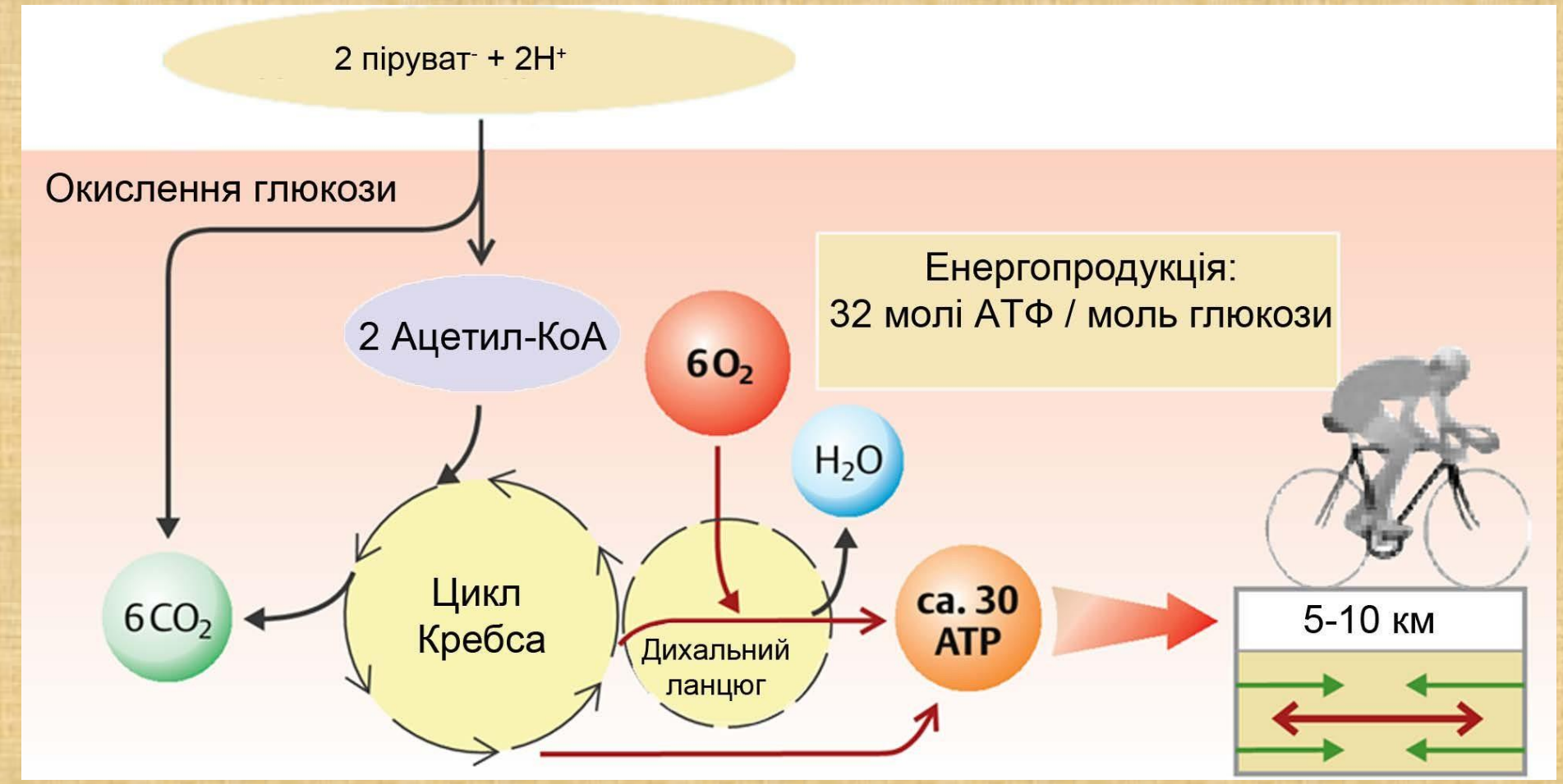
Креатинфосфокіназна система енергетичного забезпечення (короткочасні вправи дуже високої інтенсивності)



Гліколітичне фосфорилювання (тривалі вправи високої інтенсивності)



Окисне фосфорилювання
(тривалі вправи низької інтенсивності)



Кисневий запит - загальна к-ть O_2, необхідна для окислювальних процесів, що забезпечують ту чи іншу роботу.

Споживання кисню (СК, л) – к-ть O_2, яку може споживати організм в конкретний період часу в залежності від розвитку своєї кардіореспіраторної системи.

Кисневий борг - різниця між кисневим запитом і фактичним споживанням O_2, що ліквідується у відновлювальному періоді (к-ть O_2, яку людина поглинає після кінця роботи понад рівень споживання у спокої).

а) **алактатний кисневий борг** - це к-ть O_2, який необхідно витратити для ресинтезу АТФ і КФ та поповнення тканинного резервуара кисню (O_2, зв'язаний у м'язовій тканині з міоглобіном) - усувається на перших хв. після закінчення роботи.

б) **лактатний кисневий борг** - це к-ть O_2, яка необхідна для усунення накопиченої під час роботи молочної к-ти (усунення може тривати 30 хв і >).

	Повільні аеробні Тип I	Швидкі аеробні Тип II a	Швидкі анаеробні Тип II b
Швидкість скорочення	Повільна	Швидка	Швидка
Швидкість втоми	Низька	Проміжна	Висока
Діаметр волокна	Малий	Середній	Великий
Вміст міоглобіну	Високий (червоні волокна)	Високий (червоні волокна)	Низький (білі волокна)
Головний шлях утворення АТФ	Окиснювальне фосфорилювання	Окиснювальне фосфорилювання	Гліколіз
Запас глікогену	Низький	Середній	Високий
Активність міозинової АТФ-ази	Низька	Висока	Висока
Кількість мітохондрій	Багато	Багато	Мало