

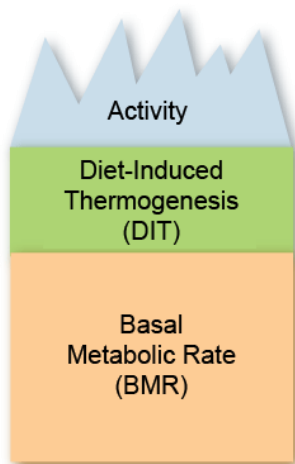
Wydatki energetyczne a wysiłek fizyczny

Każdy organizm wymaga energii do swego funkcjonowania. **Całkowite wydatki energetyczne (Total Energy Expenditure; TEE)** to ilość energii, jaka jest zużywana na wszystkie czynności wykonywane w ciągu doby. Są to nie tylko procesy przebiegające na poziomie komórkowym, ale również takie procesy jak sen, jedzenie, czy aktywność fizyczna. Na całkowite wydatki energetyczne składają się:

Podstawowe tempo metabolizmu (Basal Metabolic Rate, BMR): Jest to ilość energii niezbędna do utrzymania podstawowych funkcji życiowych (utrzymanie potencjału spoczynkowego błon komórkowych, zmiany biochemiczne, obrót białek, itp.) Jej ilość należy zmierzyć u osoby znajdującej się w spokoju fizycznym i psychicznym (a więc nie wykonującej pracy fizycznej i umysłowej), w neutralnej temperaturze otoczenia i w stanie post-absorbcyjnym (na czczo). Jeśli warunek temperatury lub stanu post-absorbcyjnego nie jest zachowany to mówimy nie o podstawowym, ale o spoczynkowym tempie metabolizmu (resting metabolic rate; RMR). BMR jest stosunkowo stałe u poszczególnych osób, ale znacznie różni się pomiędzy różnymi osobami, ponieważ zależy m.in. od wieku, płci i beztłuszczowej masy ciała (free fat mass; FFM). Człowiek z wyższą proporcją FFM (a więc niższą zawartością tkanki tłuszczowej) ma wyższe BMR. BMR obniża się z wiekiem w związku z ubytkiem masy mięśniowej i ogólnym spadkiem aktywności.

Termogeneza indukowana dietą (Diet-Induced Thermogenesis; DIT): Przyjmowanie pokarmu podnosi tempo metabolizmu, ponieważ angażuje wzrost aktywności układu nerwowego oraz procesy związane z trawieniem i wchłanianiem pokarmu. Część energii przyjętej w formie pokarmu jest rozpraszana w formie ciepła, a pozostała przekształcana jest w inne formy energii (np. energię mechaniczną).

Aktywność: jej poziom jest wysoce zmienny



Rycina 1. Całkowite wydatki energetyczne.

Wydatki energetyczne są przeważnie mierzone w kilodżulach (kJ) lub kilokaloriach (kcal; 1 cal = 4,184 J). Przeciętny człowiek zużywa w ciągu doby 1500 - 3500 kcal (6000 - 13000 kJ). Dla porównania, wydatki energetyczne kolarza Tour de France to 6,000 kcal (24000 kJ). Jeśli wydatki energetyczne przewyższają ilość energii dostarczanej z pokarmem to organizm traci masę ciała; w przeciwnym przypadku zwiększa masę ciała.

Wysiłek fizyczny może mieć charakter aerobowy (tlenowy) lub anaerobowy (beztlenowy). Koszt wysiłku tlenowego może być określony za pomocą kalorymetrii pośredniej, czyli na podstawie tempa zużycia tlenu (L/min). Dwa kluczowe czynniki wpływające na zużycie tlenu, a tym samym na skład wydychanego powietrza, to zapotrzebowanie tkanek na tlen oraz tempo wentylacji płuc. Mierząc skład i objętość wydychanych gazów możemy określić energetyczny koszt aktywności fizycznej. W czasie maksymalnych wysiłków fizycznych wentylacja płuc wzrasta z 5-6 L/min nawet do 140-200 L/min.

W czasie wysiłku fizycznego, objętość wyrzutowa serca (cardiac output ;CO) również wzrasta: ze spoczynkowej wartości 5 L/min nawet do 30 L/min. Dzięki temu pracujące mięśnie otrzymują więcej krwi bogatej w tlen, który jest niezbędny do utleniania węglowodanów, tłuszczów i białek. Ponadto, w czasie wysiłku wzrastają ciśnienie parcjale tlenu w pęcherzykach płucnych i przepływ krwi przez pęcherzyki, co skutkuje szybszą dyfuzją tlenu do krwi (wzrasta pojemność dyfuzyjna płuc). Pracujące mięśnie również otrzymują więcej krwi niż w spoczynku, dzięki wzrostowi przepływu krwi przez tę tkankę.

Określenie substratów energetycznych

Ponieważ w celu produkcji ATP utleniane są związki dostarczające energii (węglowodany i tłuszcze) to zużycie tlenu rośnie. Znając ilość pobieranego tlenu i ilość wydychanego dwutlenku węgla możemy obliczyć **współczynnik wymiany oddechowej (RER)**. Jest to stosunek objętości wytworzonego dwutlenku węgla (CO₂) do objętości zużytego tlenu (O₂) w jednostce czasu.

$$RER = VCO_2 / VO_2$$

Wartości RER poniżej 1 wskazują na metabolizm tlenowy, natomiast wartości powyżej 1 wskazują, że zaangażowany jest również metabolizm beztlenowy (glikoliza beztlenowa), ponieważ zapotrzebowanie energetyczne przewyższa ilość dostarczanego tlenu. Wartość RER wskazuje również na rodzaj utlenianej substancji.

Współczynnik oddechowy (RQ) a współczynnik wymiany oddechowej (RER)

W czasie metabolizmu tlenowego każda komórka zużywa tlen i produkuje dwutlenek węgla. Stosunek zużywanego przez komórkę tlenu do produkowanego dwutlenku węgla nosi nazwę współczynnika oddechowego (RQ). Jeśli obliczamy go na podstawie składu wdychanego i wydychanego powietrza to RQ jest równoważne z RER.

RQ = 1 świadczy o metabolizmie węglowodanów, RQ = 0,71 o metabolizmie tłuszczów, zaś RQ = 0,82 o metabolizmie białek. Przy normalnej, mieszanej diecie RQ przyjmuje wartości między 0,7 a 1.

Zwróć uwagę, że RQ odnosi się do metabolizmu na poziomie komórkowym. Ponieważ w czasie wysiłku zużycie białka pozostaje na mniej więcej stałym poziomie, to określenie dokładnej ilości utlenionego białka możliwe jest jedynie na podstawie ilości wydalonego azotu (mocznik w moczu i pocie). Znając tę wartość można obliczyć jaka część zużytego O₂ i wyprodukowanego CO₂ przypada na utlenianie białek. Pozostałą część stanowi metabolizm węglowodanów i tłuszczów.

W miarę wzrostu intensywności wysiłku fizycznego $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ i RER rosną. RER jest ilorazem $\dot{V}CO_2$ i $\dot{V}O_2$ więc zmiany zarówno w liczniku jak i mianowniku będą powodować zmiany RER. Zmiany te są uwarunkowane wieloma czynnikami.

- Dla danego poziomu $\dot{V}O_2$, intensywność wysiłku będzie wyższa u osób wytrenowanych.
- Osoby wytrenowane mogą mieć bardziej stromy początkowy wzrost $\dot{V}O_2$, ponieważ efektywniej wykorzystują tlen dostarczany do organizmu. Osoby niewytrenowane mogą polegać na bardziej pośrednich źródłach energii (ATP-PC i beztlenowych).
- U osób wytrenowanych wartości RER będą niższe we wczesnych etapach ćwiczeń, ponieważ osoby takie wcześniej wykorzystują zapasy tłuszczu. Pozwala to na zachowanie węglowodanów dla ćwiczeń o większej intensywności.
- Kobiety mają tendencję do utleniania większej ilości tłuszczu, co daje im niższy RER.

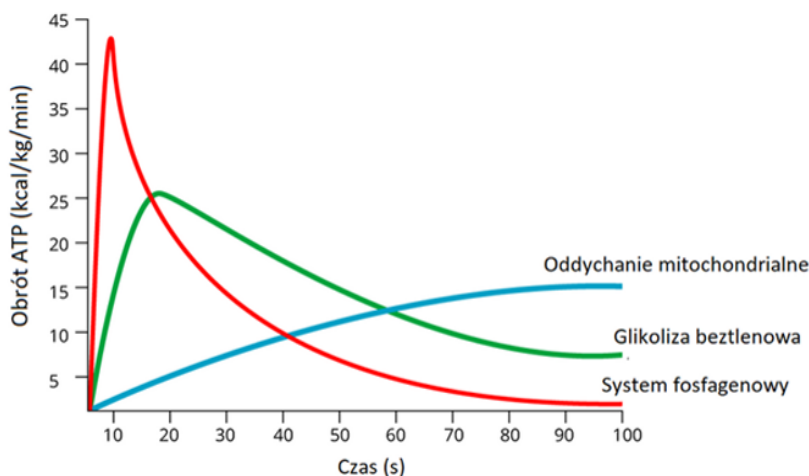
Źródła energii:

W organizmie człowieka energia może pochodzić z:

- Adenozyno-5'-trifosforanu (ATP)
- Fosforanu kreatyny (fosfokreatyny)
- Glukozy (preferowane źródło energii ośrodkowego układu nerwowego)
- Glikogenu
- Kwasów tłuszczowych (zgromadzonych w trójglicerydach)
- Aminokwasów budujących białka

Organizm wykorzystuje te źródła energii zarówno w procesach tlenowych, jak i beztlenowych. Trzy zachodzące jednocześnie na siebie systemy dostarczają organizmowi energii potrzebnej do wykonywania codziennych czynności i dodatkowej pracy. Są to:

- System fosfagenowy (ATP, fosfokreatyna)
- Glikoliza (system anaerobowy)
- Oddychanie mitochondrialne (system aerobowy=tlenowy)



Trzy systemy energetyczne

Rycina 2. Systemy energetyczne – kontinuum.

Współistnienie trzech systemów (Rycina 2) zapewnia ciągłość dostarczania energii czyli tzw. **kontinuum energetyczne**. Energia pochodząca z tych systemów różni się szybkością uzyskiwania i wydajnością. Jak widać system fosfagenowy dostarcza energii najszybciej, ale jest jej najmniej. Z kolei najwięcej energii, ale za to w najwolniejszym tempie, dostarcza oddychanie mitochondrialne.

- W spoczynku komórki mięśniowe zawierają tylko niewielką ilość ATP, która wystarcza na ok. 2 sekundy ćwiczeń.
- Energia uwolniona z szybkiego rozkładu fosforanu kreatyny powoduje odnowę zasobów ATP, które wystarczają na kolejne 10 - 15 sekund pracy.
- Następnie glikoliza beztlenowa dostarcza ATP przez około 60 sekund.
- W miarę kontynuowania ćwiczeń, metabolizm tlenowy przejmuje rolę głównego dostawcy energii we włóknach wolno-kurczliwych (czerwonych, typu I).

Chociaż w czasie metabolizmu tlenowego wytwarzane jest około 18 razy więcej ATP z jednej cząsteczki glukozy niż podczas glikolizy beztlenowej, to jest on wolniejszy. Tym samym metabolizm tlenowy nie nadaje się do sytuacji, w których wymagany jest szybki, wysoki poziom aktywności mięśni.

Mleczan (kwas mlekowy)

Krótki, ekstremalny wysiłek opiera się w dużej mierze na metabolizmie beztlenowym. W czasie intensywnego wysiłku w mięśniach zaczynają występować również procesy beztlenowe, i z glukozy powstaje mleczan. Nie jest on przyczyną "zakwasów", jak się powszechnie uważa. Jest on cennym związkiem wykorzystywanym przez organizm.

- Mleczan jest substratem energetycznym dla serca.
- Mleczan jest substratem energetycznym dla mięśni, w tym mięśni oddechowych.
- Mleczan przenika do krwi, jest wychwytywany przez wątrobę i w procesie glukoneogenezy jest ponownie przekształcany w glukozę. Glukoza jest następnie uwalniana z wątroby i wraz z krwią przenoszona z powrotem do komórek mięśni szkieletowych, gdzie jest ponownie wykorzystywana na szlaku glikolitycznym. Jest to tzw. cykl Corich; nazwany tak na cześć Carla i Gerty Cori, którzy jako pierwsi go opisali i którzy wspólnie otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny w 1947 roku w uznaniu ich pracy nad zrozumieniem metabolizmu glukozy.

Wydatki energetyczne

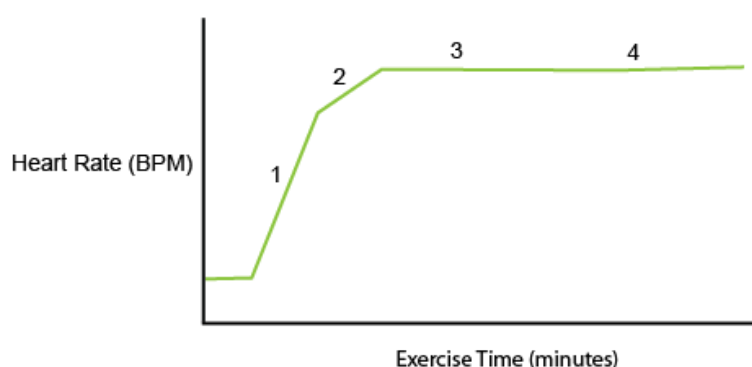
Praca mechaniczna w jednostce czasu to moc. Jej jednostką w układzie SI jest wat ($1\text{ W} = \text{J/s}$).

1 wat (1 W) to moc, przy której praca wykonana w ciągu jednej sekundy (1 s) jest równa jednemu dżulowi (1 J)

Dzięki kalorymetrii pośredniej możemy określić wydatki energetyczne w czasie pracy mechanicznej (tlenowego wysiłku fizycznego). Możliwe jest to dzięki zależności między ilością zużytego tlenu a powstającą energią. Tzw. **równoważnik energetyczny tlenu** mówi, że przy zużyciu 1 litra tlenu powstaje ~ 20 kJ energii cieplnej, bez względu na rodzaj utlenianej substancji.

Substancja	Ilość wytworzonej energii (kJ/L O ₂)
Węglowodany	21,12
Tłuszcze	19,61
Białka (mocznik)	20,09

Aby używać miary zużycia tlenu jako wskaźnika metabolizmu tlenowego należy ćwiczyć w stabilny sposób, zapewniający utrzymanie równowagi organizmu w wysiłku.



Rycina 3. Krzywa przedstawiająca osiągnięcie stanu równowagi podczas wysiłku (na przykładzie tempa pracy serca).

Stan równowagi w czasie wysiłku można określić jako "poziom wysiłku, na którym parametry fizjologiczne pozostają na względnie stałym poziomie przez dłuższy czas" (McArdle, Katch i Katch, 1994).

W czasie wysiłku fizycznego, parametry życiowe takie jak tempo pracy serca, oddychanie, zużycie tlenu czy objętość wyrzutowa serca stopniowo ulegają zmianie. Cztery etapy tych zmian, na przykładzie zapisu tempa pracy serca, są przedstawione są na rycinie 3.

1. Gwałtowny wzrost w czasie pierwszej minuty.
2. Stopniowy wzrost w czasie drugiej minuty.
3. Pomiędzy trzecią a szóstą minutą osiągniany jest stan równowagi, który dalej jest utrzymywany przy danym obciążeniu wysiłkiem.
4. Jeśli wysiłek trwa kilka godzin to następują stopniowe zmiany, takie jak np. wzrost temperatury wnętrza ciała.

Czynniki wpływające na osiągnięcie stanu równowagi:

- Dostarczanie O₂ do pracujących mięśni
- Wykorzystanie O₂ przez komórki w czasie metabolizmu tlenowego
- Zdolność do rozpraszania ciepła.

Przy większej intensywności wysiłku, gdy pojawia się również metabolizm beztlenowy, tempo zużycia tlenu nie odzwierciedla w pełni wydatków energetycznych. Wyniki są nieco zaniżone,

ponieważ metoda kalorymetrii pośredniej nie uwzględnia ATP pochodzącej z glikolizy beztlenowej.

Wydolność tlenowa organizmu

Wydolność fizyczna to maksymalna zdolność organizmu do pokrywania zwiększonego zapotrzebowania na energię w czasie wysiłku oraz zdolność do likwidacji jego skutków. Energia ta może pochodzić z procesów tlenowych i beztlenowych. Wydolność tlenowa to zdolność do długotrwałego, umiarkowanego wysiłku opartego na procesach tlenowych (**pułap tlenowy = $\dot{V}O_2\text{max}$**). Natomiast wydolność beztlenowa to zdolność do krótkotrwałego, intensywnego wysiłku opartego na procesach beztlenowych.

Powszechną metodą określania wydolności tlenowej jest test maksymalnego zużycia tlenu ($\dot{V}O_2\text{max}$). Mierzy on zdolność danej osoby do wykorzystania tlenu (O_2) podczas wysiłku tlenowego (aerobowego). Test $\dot{V}O_2\text{max}$ polega na stopniowym zwiększaniu intensywności ćwiczeń (tempa pracy). Trwa to aż do momentu, gdy dana osoba stwierdzi, że jest całkowicie wyczerpana i nie może kontynuować wysiłku albo gdy osiągnie przewidywane dla wieku maksymalne tempo pracy serca. Wysokie $\dot{V}O_2\text{max}$ wskazuje, że dana osoba jest lepiej przygotowana do zaspokojenia zapotrzebowania organizmu na tlen podczas ćwiczeń.

$\dot{V}O_2\text{max}$ jest określane na podstawie pojemności funkcjonalnej i integracji systemów dostarczających, transportujących i wykorzystujących O_2 . Systemy te obejmują:

- Wentylację płuc
- Hemoglobinę
- Objętość krwi i pojemność minutową serca
- Metabolizm tlenowy

$\dot{V}O_2\text{max}$ jest specyficzne dla rodzaju ćwiczeń, ponieważ zaangażowane są różne mięśnie szkieletowe. Na przykład ta sama osoba może uzyskać różne wyniki $\dot{V}O_2\text{max}$ podczas pływania i biegania.

Pomiędzy mocą (intensywnością) ćwiczeń a tempem pracy serca może istnieć zależność liniowa. Przy takim założeniu maksymalne tempo pracy serca można wykorzystać do oszacowania mocy, przy której prawdopodobnie zostanie osiągnięte $\dot{V}O_2\text{max}$. Odbywa się to poprzez ekstrapolację tempa pracy serca względem mocy, aż do osiągnięcia tempa maksymalnego. Jednakże związek ten może nie być tak liniowy. Dzieje się tak, ponieważ osoby wytrenowane mogą nie osiągnąć maksymalnego tempa pracy serca, podczas gdy osoby niewytrenowane mogą je przekroczyć (gdyby pozwolono im kontynuować test).

Bezwzględne i względne $\dot{V}O_2\text{max}$

$\dot{V}O_2\text{max}$ może być zdefiniowane jako bezwzględne (L/min) lub względne (mL/kg/min). Bezwzględne $\dot{V}O_2\text{max}$ odnosi się do ilości O_2 zużywanego przez całe ciało i jest ważne w sportach nieobciążeniowych (np. kolarstwo i wioślarstwo). Względna wartość $\dot{V}O_2\text{max}$ pozwala na porównania między ludźmi poprzez uwzględnienie masy ciała i jest ważna w **sportach obciążeniowych** (na przykład bieganie i piłka nożna), w których ciężar ciała sportowca przejmowany jest bezpośrednio przez ciało, przy czym większość głównych grup mięśniowych jest wykorzystywana do zachowania dobrej techniki i prawidłowej postawy (na przykład bieganie). Masa ciała jest więc ważnym czynnikiem, dlatego względne $\dot{V}O_2\text{max}$ (jednostki: mL/kg/min) jest najbardziej odpowiednią miarą wydolności tlenowej. **Ćwiczenie nieobciążeniowe** należy tu rozumieć jako niewymagające pracy wbrew grawitacji czyli dźwigania ciężaru własnego ciała. Ciężar człowieka spoczywa na sprężynie a więc masa

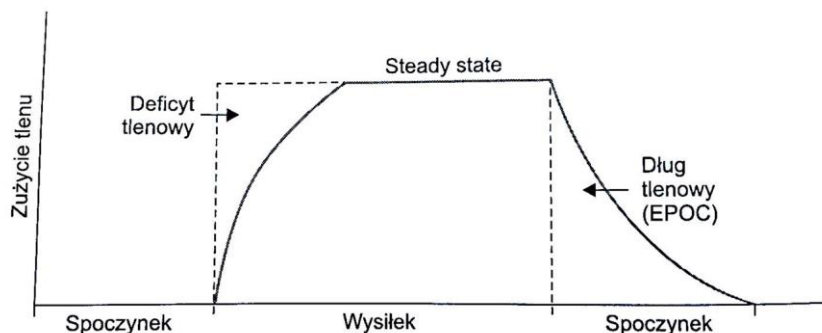
ciała sportowca staje się mniej ważna. Dla tych sportów bezwzględne $\dot{V}O_2\text{max}$ (jednostki: L/min) jest równie dobre jak względne $\dot{V}O_2\text{max}$.

Nadmierne powysiłkowe zużycie tlenu

Przez pewien czas po wysiłku fizycznym utrzymuje się wyższe zużycie tlenu niż w spoczynku. Kiedyś określano je mianem długu tlenowego. Nie jest to nazwa poprawna, ponieważ organizm nie może zaczerpnąć długu. Dlatego stan ten określa się jako nadmierne powysiłkowe zużycie tlenu.

Kiedy zaczynamy ćwiczyć, początkowo zużywamy energię szybciej niż ją produkujemy z metabolizmu tlenowego.

- W tym okresie wykorzystujemy zasoby ATP i fosfokreatyny w mięśniach, produkujemy mleczan w glikolizie beztlenowej i wykorzystujemy O_2 dostępny w pęcherzykach płucnych, hemoglobinie i mioglobinie. We krwi żyłnej opuszczającej ćwiczące mięśnie jest mniej O_2 .
- Po około 2-6 minutach submaksymalnych ćwiczeń o stałej intensywności osiągamy stan równowagi, w którym pobór i wykorzystanie O_2 są zrównoważone.
- Kiedy kończymy ćwiczenia, wchodzimy w okres, w którym zużycie O_2 przekracza stan spoczynku przed treningiem. Okres ten nazywany jest czasem nadmiernego powysiłkowego zużycia tlenu. W tym czasie następuje stopniowy powrót zużycia O_2 do wartości spoczynkowych.



Rycina 4. Zmiany zużycia tlenu w czasie wysiłku

Nadmierne powysiłkowe zużycie tlenu można podzielić na trzy fazy:

Faza 1 trwa tylko kilka minut. W tym czasie następuje odbudowa zasobów ATP i fosfokreatyny, zapasów tlenu związanego z mioglobina i tlenu rozpuszczonego w płynie pozakomórkowym w pracujących mięśniach. W fazie 1 trwa to tylko kilka minut:

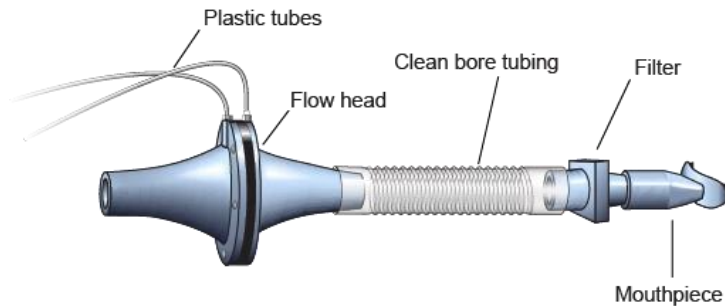
Faza 2 trwa około 15 minut. Podwyższone zużycie tlenu wynika z:

- Wzmocnionej pracy mięśni oddechowych w wyniku hiperwentylacji.
- Podwyższonej temperatury ciała po ćwiczeniach.
- Podwyższonego poziomu katecholamin, które nadal stymulują metabolizm.
- Przemiana mleczanu w glukozę w wątrobie.

Faza 3 może trwać do 12 godzin lub dłużej. W tym czasie następuje regeneracja tkanki mięśniowej uszkodzonej podczas ćwiczeń, w tym produkcję nowych białek.

Podstawy metodyki - pomiar objętości gazów

Przepływ powietrza (F) mierzony jest za pomocą pneumatometru.



Rycina 5. Pneumatometr.

Głowica oddechowa zawiera w sobie cieką siateczkę. Powietrze oddechowe przepływające przez tę siateczkę podnosi niewielką różnicę ciśnienia w sposób proporcjonalny do tempa przepływu. Dwie rurki biegnące do Poda Spirometru przekazują tam tę różnicę ciśnienia, która za pomocą przetwornika jest przekształcana w sygnał napięcia, który jest zapisywany przez PowerLab i wyświetlany w LabTutorze. Objętość powietrza (V) liczona jest na podstawie przepływu:

$$V = \int F dt$$

Rycina 6. Równanie pozwalające określić objętość przepływającego powietrza

Oddychanie polega na naprzemiennych wdechach i wydechach. W czasie jednego oddechu pobieramy do płuc objętość powietrza zwaną objętością oddechową (VT). Podczas spokojnego oddychania częstotliwość (tempo) oddychania (f) wynosi około 15 oddechów na minutę. Mnożąc VT przez f otrzymujemy minutową objętość oddechową (VE) czyli ilość powietrza wydychanego w ciągu minuty. Objętość minutowa i objętość oddechowa zmieniają się w zależności od intensywności wysiłku.

Obliczanie tempa zużycia O₂ i produkcji CO₂

Zużycie O₂

Objętość zużytego O₂ w ciągu 1 minuty jest obliczona na podstawie różnicy między objętością tlenu wdychanego (VI O₂) i wydychanego (VE O₂).

$$VO_2 = VI O_2 - VE O_2$$

Wiedząc, jaką proporcję objętości zajmuje tlen warunkach STPD,

$$VO_2 = VI \times FIO_2 - VE \times FEO_2$$

I zakładając $RQ = 1$,

$$VO_2 = VI (FIO_2 - FEO_2)$$

Produkcja CO₂

Objętość CO₂ wydychanego w ciągu 1 minuty również jest obliczana na podstawie różnicy między objętością CO₂ wdychanego i wydychanego. Równanie jest jednak prostsze, ponieważ w powietrzu wdychanym zawartość CO₂ jest znikoma i można ją pominąć.

$$VCO_2 = VE \times FECO_2$$

I zakładając $RQ = 1$,

$$VCO_2 = VI \times FECO_2$$