

3

CIEPŁO I TEMPERATURA

3.1

Konwekcja, przewodnictwo, promieniowanie, parowanie

Ciepło przenosi się z ciała cieplejszego do zimniejszego. W przyrodzie do najważniejszych mechanizmów odpowiedzialnych za przepływ ciepła należą: konwekcja, przewodnictwo, promieniowanie i parowanie. Konwekcja spowodowana jest rozszerzalnością objętościową ciał. Ogrzane gaz lub ciecz powiększają swoją objętość, wobec tego ich gęstość maleje. Ogrzane ciecze i gazy są lżejsze i unoszą się do góry, a na ich miejsce napływa zimniejsza ciecz (lub gaz). Konwekcja powoduje powstawanie prądów wznoszących w powietrzu (cieczy) doprowadzających do wyrównywania się temperatur. Wstępujące prądy powietrza wykorzystywane są przez szybujące ptaki. Ilość ciepła oddawanego przez konwekcję jest proporcjonalna do powierzchni ciała A , czasu t oraz różnicy temperatur ciała i otoczenia ΔT :

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \cdot t$$

gdzie α to pewien współczynnik, zwany współczynnikiem ostygnięcia, który zależy od ruchu otaczającego medium, jego gęstości, lepkości oraz kształtu powierzchni oddającej ciepło itd.

Przewodnictwo jest sposobem przenoszenia ciepła przez ciała znajdujące się w bezpośrednim kontakcie. Temperatura to miara energii kinetycznej molekuł (lub atomów) manifestująca się w postaci ruchów drgających. Molekuły mające wyższą temperaturę drgają szybko, a stykając się z wolniej drgającymi (zimniejszymi) molekułami przekazują im nadmiar swojej energii kinetycznej (prowadząc do wyrównania temperatur). Przenoszenie ciepła przez różne substancje zachodzi z różną prędkością. Ilość ciepła przewodzonego przez np. prostopadłościan o wysokości l i powierzchni A zależy od różnicy temperatur ΔT :

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l} \cdot t$$

gdzie t – to czas, a λ jest przewodnością cieplną materiału wyrażoną w $J/(m \cdot s \cdot K) = W/(m \cdot K)$.

Wartości przewodności cieplnej niektórych materiałów podano w tabeli 9. Wysoka wartość przewodnictwa cieplnego metali sprawia, że są one dobrymi przewodnikami ciepła, a powietrze czy wełna są dobrymi izolatorami – źle przewodzą ciepło. Z wielkości przewodnictw wynika, że naczynia, w których gotujemy, powinny być zrobione z metalu, aby szybko przewodziły ciepło, natomiast ich uchwyty powinny być wykonane z izolatorów, np. z drewna, tak aby nie parzyły dłoni. To bowiem nie temperatura, ale ilość ciepła przechodzącego do naszego ciała decyduje o tym, czy ulegniemy poparzeniu, czy też przepływ krwi pochłonie nadmiar ciepła. Powietrze jest dobrym izolatorem, szczególnie gdy wyeliminowana zostaje

konwekcja. Dlatego futra i pierze utrzymujące przy powierzchni skóry warstwę nieruchomego powietrza są dobrymi izolatorami. Podobną funkcję spełnia wiele warstw ubrania, pomiędzy którymi znajduje się izolujące od otoczenia powietrze. Przewodnictwo cieplne można całkowicie wyeliminować, stosując próżnię pomiędzy dwoma ściankami. Drgania termiczne molekuł nie mogą bowiem przenosić się przez próżnię. Podwójne szyby przedzielone próżnią lub podwójne naczynia przedzielone próżnią (termosy) są najlepszymi izolatorami.

Tabela 9. Przewodność cieplna λ niektórych materiałów w W/(m·K)

Substancja	Przewodność cieplna	Substancja	Przewodność cieplna
Srebro	414	Bawełna	~0,06
Żelazo	67	Wełna	~0,04
Marmur	~2,8	Powietrze	0,025
Gлина	~1,3	Tłuszcz	0,168
Szkoło	~0,8	Skóra słabo ukrwiona	0,334
Cegła	~0,6	Skóra silnie ukrwiona	1,465
Woda	0,585	Mięśnie nieukrwione	0,460
Drewno dębowe równoległe do włókna	~0,33	Mięśnie normalnie ukrwione	0,544
Drewno dębowe prostopadłe do włókna	~0,12	Mięśnie silnie ukrwione	0,628

Ciepło może przenosić się od jednego ciała do drugiego także bez pośrednictwa materii - przez promieniowanie. Herschel (1800) badał zachowanie termometru umieszczonego w świetle rozszczepionym pryzmatem i spostrzegł, że poniżej światła czerwonego w niewidocznej części widma termometr rozgrzewał się najbardziej. Doszedł do wniosku, że niewidoczne promienie podczerwone przenoszą najwięcej energii cieplnej. Ilość energii cieplnej Q wypromieniowywanej przez ciało o powierzchni A w czasie t jest dana równaniem:

$$Q = \sigma \cdot \alpha \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot t$$

gdzie: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴) to stała promieniowania ciała doskonale czarnego, α to zdolność absorpcyjna, T_1 to tzw. temperatura ciała wypromieniowującego ciepło, T_2 to temperatura otoczenia. Wartość współczynnika zdolności absorpcyjnej zależy od koloru i chropowatości powierzchni oraz od długości fali promieniowania i może przyjmować wartości $0 \leq \alpha \leq 1$. Folia aluminiowa ma współczynnik absorpcji $\alpha = 0,05$, a czarna kalka $\alpha = 0,95$. W zakresie podczerwieni zdolność absorpcyjna skóry wynosi $\alpha = 0,95$. W zakresie światła widzialnego skóra ludzi białych ma $0,55 \leq \alpha \leq 0,70$, a ludzi czarnych $0,81 \leq \alpha \leq 0,84$.

Szczególnie dużo ciepła może być usuwane z organizmu dzięki parowaniu wody z jego powierzchni. Ilość ciepła wydalanego na skutek parowania Q jest proporcjonalna do wielkości powierzchni parowania A w czasie t i jest dana równaniem:

$$Q = k_p \cdot A \cdot (p_s - p_p) \cdot t$$

gdzie: k_p - współczynnik zależny od ciepła parowania, ruchu powietrza, p_s - ciśnienie cząstkowe pary wodnej przy powierzchni skóry (można przyjąć, że przy powierzchni skóry para wodna jest nasycona), p_p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu. Parowanie spada, gdy wilgotność względna powietrza zbliża się do 100%.

Zapotrzebowanie energetyczne człowieka

Każdy organizm do życia potrzebuje energii. Do podtrzymania bicia serca i oddychania oraz do utrzymania organów wewnętrznych w temperaturze 37°C średni człowiek (chodzi o wzrost i wagę) musi zużyć w ciągu sekundy 75 J energii, czyli ma moc 75 W (watów). Oczywiście ta wielkość to jedynie absolutne konieczne minimum energii. Zapotrzebowanie energetyczne zależy od aktywności człowieka – tabela 10. Człowiek zużywa na dobę od 6,5 do 15 MJ energii, co odpowiada 1550 do 3600 kcal. Gram tłuszczu spalony w organizmie daje 9 kcal, a gram białek i cukrów 4 kcal. Oznacza to, że podczas pół godziny wyczerpującej gimnastyki organizm zużywa energię zawartą w 50-gramowym ciastku.

Tabela 10. Zapotrzebowanie energetyczne człowieka w zależności od aktywności

Czynność	Zużywana moc [W]
Spanie; odpoczywanie; słuchanie wykładów	70
Niska aktywność: spacer; sprząatanie	290
Średnia aktywność: wolna jazda na rowerze	520
Wysoka aktywność: bieg; koszykówka	700
Maksymalna wydajność utrzymywana przez 1 minutę	810
Maksymalna wydajność utrzymywana przez 10 sekund	1200

Znaczna część energii wytwarzanej przez człowieka jest usuwana z organizmu w postaci ciepła. Jeżeli odpływ ciepła z organizmu zostanie uniemożliwiony, to w ciągu godziny temperatura człowieka rośnie o 1 do 2°C, co po kilku godzinach powoduje śmierć na skutek przegrzania. W zależności od temperatury otoczenia sposób usuwania ciepła z organizmu ulega zmianie. Im temperatura otoczenia staje się wyższa, tym mniej ciepła może zostać usunięte przez promieniowanie (zależne od różnicy temperatur podniesionych do potęgi czwartej) i konwekcję (zależną od różnicy temperatur), a rośnie rola parowania potu – tabela 11.

Tabela 11. Usuwanie ciepła z organizmu człowieka w warunkach spoczynku i przy 50% wilgotności względnej otoczenia, w różnych temperaturach

Przepływ ciepła	26°C	30°C
Konwekcja	11%	15%
Promieniowanie	67%	49%
Parowanie	22%	36%

W przypadku wiatru szybkość chłodzenia powierzchni ciała rośnie na skutek konwekcji. Powoduje to (szczególnie w zimie) sytuację, w której umiarkowany wiatr przy niewielkim nawet mrozie może doprowadzić do ciężkich odmrożeń – patrz tabela 12.

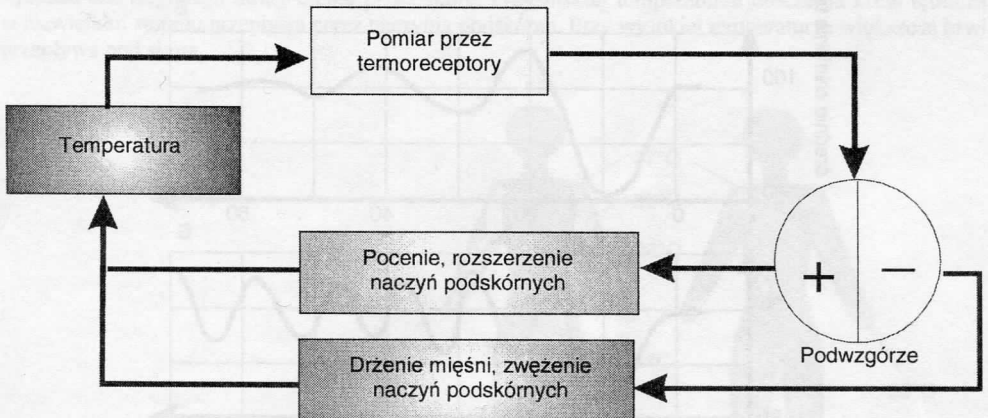
Tabela 12. Wiatr powoduje szybsze ochładzanie powierzchni ciała. W tabeli podano, w jakiej temperaturze przy bezwietrznej pogodzie towarzyszy taka sama utrata ciepła jak przy wietrze wiejącym z odpowiednią prędkością i w odpowiedniej temperaturze

Prędkość wiatru [km/godz.]	Równoważna temperatura [°C]								
	3	0	-3	-6	-9	-12	-15	-18	-21
0	3	0	-3	-6	-9	-12	-15	-18	-21
10	0	-3	-7	-10	-13	-16	-20	-23	-26
20	-7	-10	-14	-18	-21	-25	-29	-33	-36
30	-9	-14	-18	-22	-26	-30	-34	-39	-42
40	-13	-17	-21	-25	-30	-34	-38	-43	-47
50	-14	-18	-23	-27	-32	-36	-41	-46	-50

3.3

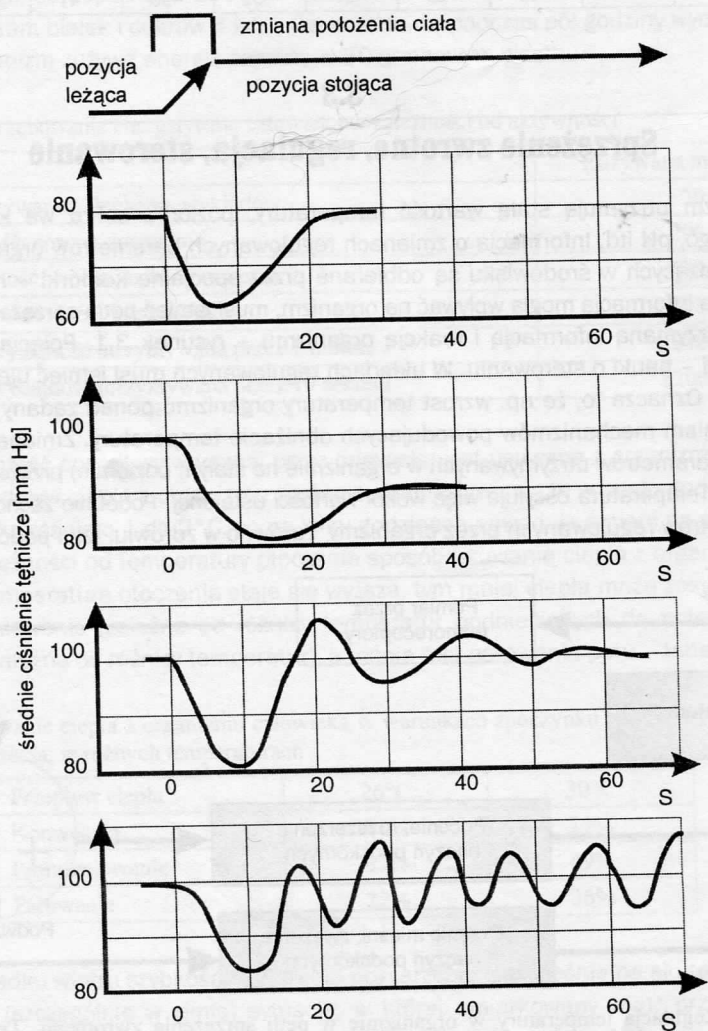
Sprzężenie zwrotne, regulacja, sterowanie

Organizm utrzymuje stałą wartość temperatury, poziomu cukru we krwi, ciśnienia osmotycznego, pH itd. Informacja o zmianach regulowanych parametrów organizmu i zmianach zachodzących w środowisku są odbierane przez specjalne komórki – receptory. Aby przetworzona informacja mogła wpływać na organizm, musi istnieć pętla sprzężenia zwrotnego pomiędzy otrzymaną informacją i reakcją organizmu – rysunek 3.1. Pojęcia te pochodzą z cybernetyki – nauki o sterowaniu. W układach regulowanych musi istnieć ujemne sprzężenie zwrotne. Oznacza to, że np. wzrost temperatury organizmu ponad zadany poziom skutkuje włączeniem mechanizmów powodujących obniżanie temperatury. Zmiana temperatury (lub innych parametrów utrzymywanych w organizmie na stałym poziomie) przebiega w sposób periodyczny. Temperatura oscyluje więc wokół wartości ustalonej. Podobnie zachowują się wartości parametrów regulowanych przez organizmy zarówno w zdrowiu, jak i podczas choroby.



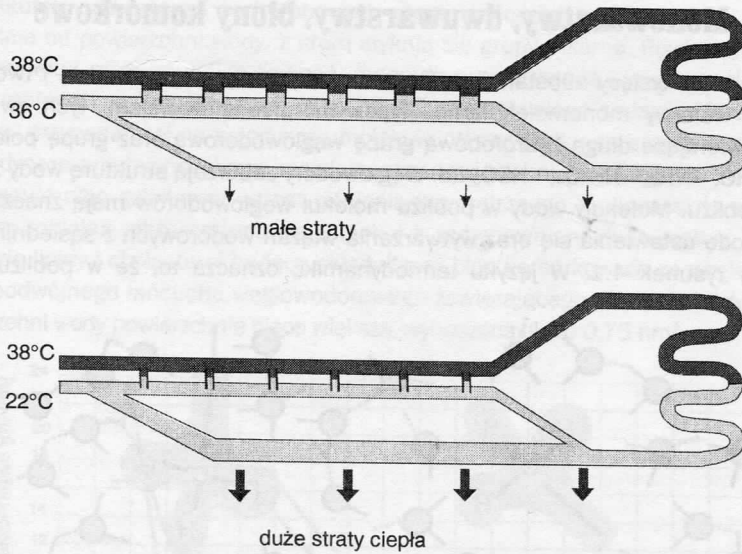
Rysunek 3.1. Regulacja temperatury w organizmie w pętli sprzężenia zwrotnego. Termoreceptory mierzą temperaturę w różnych miejscach ciała. Informacja o temperaturze jest wysyłana do podwzgórza. Gdy temperatura jest wyższa niż optymalna, w organizmie uruchamiane są procesy chłodzenia, a gdy jest niższa niż optymalna – procesy ogrzewania

Rysunek 3.2 pokazuje regulację ciśnienia krwi. Skomplikowany układ regulacji temperatury naszych organizmów opiera się na pomiarach temperatury w międzymózgowiu, na powierzchni skóry i wewnątrz organizmu, np. w przełyku. Ta sieć termoreceptorów powoduje, że znany jest dokładny rozkład temperatury w organizmie i prędkości wydalania ciepła przez skórę. Termoreceptory skóry potrafią zarejestrować zmianę temperatury nawet o $0,003^{\circ}\text{C}$ w ciągu sekundy. Mechanizm regulacyjny działa więc przewidując wielkość zakłócenia z pewnym wyprzedzeniem. Istnieje możliwość „oszukania” organizmu. Na przykład pijąc bardzo zimny płyn w celu ochłodzenia się powodujemy, że poprzez termoreceptor w przełyku dociera do organizmu sygnał o konieczności rozpoczęcia ogrzewania organizmu.

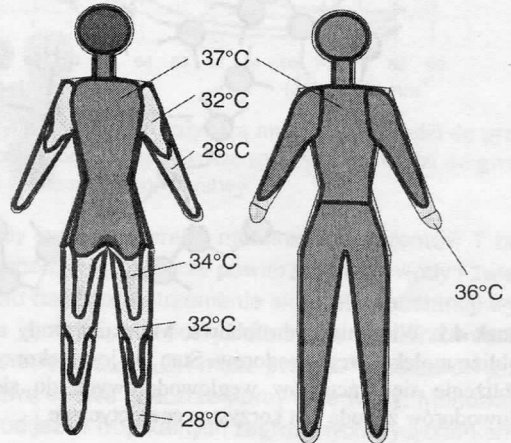


Rysunek 3.2. Stabilizacja ciśnienia krwi w organizmie. Zmiana ciśnienia tętniczego krwi po zmianie położenia ciała. Górna krzywa – stan prawidłowy, pozostałe – chorobowe

Organizm wykorzystuje kilka mechanizmów sterowania ciepłem wydalanych z organizmu – rysunek 3.3. Pierwszy sposób to zmiana ukrwienia skóry i mięśni podskórnych. Skóra silnie ukrwiona przewodzi ciepło 4 razy lepiej niż skóra nieukrwiona (tabela 9). Drugi sposób to zwiększenie wydzielania potu, który parując unosi ciepło z organizmu. Trzeci to pobudzenie mięśni przywłosowych, których podniesienie się u naszych owłosionych przodków powodowało unieruchomienie grubszej warstwy powietrza izolującej organizm przed utratą ciepła. Czwartym sposobem jest zwiększenie lub zmniejszenie wydzielania ciepła przez płuca. Piątym sposobem pobudzenie (lub zahamowanie) procesów egzotermicznych zachodzących w wątrobie. Szóstym sposobem jest obniżanie temperatury powierzchni skóry, tak aby zmniejszyć straty ciepła uciekającego z organizmu – rysunek 3.4.



Rysunek 3.3. Regulacja utraty ciepła przez skórę. Przy niskiej temperaturze otoczenia krew tętnicza w niewielkim stopniu przepływa przez naczynia podskórne. Przy wysokiej temperaturze większość krwi przepływa pod skórą



Rysunek 3.4. Temperatura powierzchni skóry, gdy w otoczeniu jest zimno lub gorąco