POLITECHNIKA ŁÓDZKA
PODRĘCZNIKI AKADEMICKIE

JERZY MROZOWSKI
JAN AWREJCEWICZ

PODSTAWY BIOMECHANIKI

ŁÓDŹ 2004


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Romuald Będziński**
prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak

KOMITET REDAKCYJNY
WYDAWNICTW POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

Przewodniczący: **prof. dr hab. Piotr Wodziński**
Redaktor Naukowy Wydziału: **prof. dr hab. Tomasz Kapitaniak**



96948

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
93-005 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel./fax 684-07-93

ISBN 83-7283-116-5

Nakład 300 egz. Ark. druk. 14,0. Papier offset. 80 g 70 x 100
Druk ukończono w marcu 2004 r.
Wykonano w LEFT GRUPA Bogdan Chmielewski
92-208 Łódź, ul. Niciarniana 2/6
tel. (42) 678-11-00 wew. 2937, kom. 0-508-086-215

OK1-001/377/2004



Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Spis treści

Przedmowa 1

1 Ogólne pojęcia i zasady związane z opisywaniem położenia i ruchu ciała ludzkiego 5

1.1 Płaszczyzny ciała 6

1.1.1 Kierunki i położenie w przestrzeni 8

1.2 Osie ciała 8

2 Układ szkieletowy 9

2.1 Kości 9

2.1.1 Kształty kości 9

2.1.2 Budowa i skład kości 12

2.1.3 Właściwości fizyczne kości 16

2.1.4 Wzrastanie i regeneracja kości 19

2.2 Połączenia kości 23

2.2.1 Połączenia ścisłe 23

2.2.2 Połączenia wolne (stawy) 25

2.2.2.1 Powierzchnie i chrząstki stawowe 26

2.2.2.2 Torebka stawowa 27

2.2.2.3 Jama stawowa 27

2.2.3 Czynniki łączące kości w stawie 27

2.2.4 Rodzaje ukształtowania powierzchni stawowych 28

2.2.5 Rodzaje ruchów w stawach 30

2.2.6 Zakresy ruchów w stawach 31

2.3 Podział układu szkieletowego 32

2.4 Kręgosłup 33

2.4.1 Budowa kręgu 33

2.4.2 Połączenia kręgów przedkrzyżowych 36

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

2.4.3 Połączenia trzonów kręgów 36
2.4.3.1 Chrząstki międzykręgowe 36
2.4.3.2 Zadania chrząstki międzykręgowej 37
2.4.4 Ogólna charakterystyka kręgosłupa 38
2.4.4.1 Wymiary kręgosłupa 38
2.4.4.2 Kanał kręgowy 38
2.4.4.3 Krzywizny kręgosłupa 38
2.4.4.4 Czynności kręgosłupa 39
2.5 Klatka piersiowa 42
2.5.1 Żebra 43
2.5.2 Mostek 43
2.6 Czaszka 44
2.7 Kończyna górna 46
2.7.1 Obręcz kończyny górnej 46
2.7.2 Kończyna wolna 47
2.7.2.1 Kość ramienna 48
2.7.2.2 Kości przedramienia 48
2.7.2.3 Ręka 50
2.8 Kończyna dolna 51
2.8.1 Obręcz kończyny dolnej (obręcz miedniczna) 51
2.8.1.1 Kość biodrowa 52
2.8.1.2 Kość kulszowa 53
2.8.1.3 Kość łonowa 53
2.8.1.4 Miednica jako całość 53
2.8.2 Wolna kończyna dolna 53
2.8.2.1 Kość udowa 54
2.8.2.2 Kości podudzia 55
2.8.2.3 Stopa 55

3 Układ mięśniowy **57**
3.1 Klasyfikacja mięśni 58
3.2 Mięśnie szkieletowe 61
3.2.1 Budowa zewnętrzna mięśnia szkieletowego 61
3.2.2 Anatomia mięśnia szkieletowego 62
3.2.3 Sarkomer 64
3.3 Mięśnie gładkie 70
3.4 Mięsień sercowy 71
3.5 Skurcz mięśnia szkieletowego 73


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3.5.1 Ślizgowa teoria skurczu 73
3.5.2 Jednostka motoryczna 74
3.5.3 Skurcz włókna mięśniowego 75
3.5.4 Skurcz mięśnia 77
3.5.5 Źródła energii skurczu 79
3.6 Włókna wolno- i szybkokurczliwe 82
3.7 Właściwości biomechaniczne mięśnia szkieletowego 83
3.8 Modele mechaniczne mięśnia 88
3.8.1 Modele mięśnia niepobudzonego 88
3.8.1.1 Model Maxwella 89
3.8.1.2 Model Kelvina-Voigta 91
3.8.2 Modele mięśnia pobudzonego 94
3.8.2.1 Równanie Hilla dla mięśnia w stanie skurczu tężcowego 94
3.8.2.2 Bezwymiarowa postać równania Hilla 96
3.9 Anatomiczny podział mięśni 97
3.10 Narządy pomocnicze mięśni 107
3.11 Typy dźwigni występujące w układzie ruchu człowieka 107

4 Układ nerwowy 109
4.1 Tkanki układu nerwowego 109
4.1.1 Tkanka nerwowa 110
4.1.2 Uszkodzenia i regeneracja tkanki nerwowej 114
4.1.3 Tkanka glejowa 117
4.2 Przewodnictwo nerwowe 119
4.3 Zakończenia nerwowe – synapsy 121
4.3.1 Budowa synapsy chemicznej 121
4.3.2 Transmisja w synapsie nerwowo-mięśniowej 122
4.3.3 Synapsy pobudzające i hamujące 124
4.3.4 Synapsy elektryczne 125
4.4 Nerwy 125
4.5 Podział układu nerwowego 127
4.6 Ośrodkowy układ nerwowy 127
4.6.1 Mózgowie 128
4.6.1.1 Mózg (kresomózgowie) 130
4.6.1.2 Móżdżek 134
4.6.1.3 Międzymózgowie i podwzgórze 135
4.6.1.4 Śródmózgowie i most 136

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

4.6.1.5 Twór siatkowaty . . . 137
4.6.1.6 Rdzeń przedłużony . . . 137
4.6.2 Rdzeń kręgowy . . . 138
4.7 Obwodowy układ nerwowy . . . 141
4.7.1 Nerwy czaszkowe . . . 141
4.7.2 Nerwy rdzeniowe . . . 143
4.8 Odruchowe działanie układu nerwowego . . . 145
4.9 Autonomiczny (wegetatywny, trzewny) układ nerwowy . . . 146
4.10 Ośrodki i drogi nerwowe . . . 149
4.10.1 Ośrodki nerwowe . . . 149
4.10.2 Drogi nerwowe . . . 150

5 Narządy zmysłów 153
5.1 Narząd wzroku . . . 154
5.1.1 Budowa narządu wzroku . . . 154
5.1.1.1 Oczodół . . . 154
5.1.1.2 Powieki i aparat łzowy . . . 154
5.1.1.3 Spojówka . . . 155
5.1.1.4 Mięśnie poruszające gałką oczną . . . 155
5.1.1.5 Gałka oczna . . . 156
5.1.1.6 Rogówka . . . 157
5.1.1.7 Twardówka . . . 158
5.1.1.8 Tęczówka . . . 158
5.1.1.9 Ciało rzęskowe . . . 158
5.1.1.10 Naczyniówka . . . 159
5.1.1.11 Siatkówka . . . 159
5.1.1.12 Ciało szkliste . . . 161
5.1.1.13 Soczewka . . . 161
5.1.1.14 Komory oka . . . 162
5.1.1.15 Plamka ślepa (Mariotte'a) . . . 163
5.1.2 Działanie oka . . . 163
5.1.3 Oko standardowe . . . 165
5.1.4 Widzenie kolorów . . . 166
5.1.5 Widzenie stereoskopowe . . . 169
5.1.6 Wady wzroku . . . 169
5.1.6.1 Krótkowzroczność . . . 169
5.1.6.2 Nadwzroczność . . . 170
5.1.6.3 Astygmatyzm (niezborność rogówkowa) . . . 171


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

5.1.6.4 Daltonizm 171
5.2 Narząd słuchu i równowagi 171
5.2.1 Ucho zewnętrzne 173
5.2.2 Ucho środkowe 174
5.2.3 Ucho wewnętrzne 175
5.2.3.1 Błędnik błoniasty 176
5.2.3.2 Błędnik kostny 177
5.2.4 Mechanizm działania narządu słuchu (ucha wewnętrznego) 179

6 Wpływ drgań mechanicznych i hałasu na organizm ludzki 183
6.1 Wprowadzenie 183
6.2 Wpływ drgań mechanicznych na organizm ludzki 184
6.2.1 Źródła drgań 185
6.2.2 Fizjologiczne aspekty oddziaływania drgań na organizm ludzki 186
6.2.3 Energetyczny mechanizm działania wibracji na organizm ludzki 188
6.2.4 Skutki oddziaływania drgań na organizm ludzki 190
6.2.4.1 Choroba wibracyjna 192
6.3 Wpływ hałasu na organizm ludzki 194
6.3.1 Hałas słyszalny 194
6.3.1.1 Dźwięk 194
6.3.1.2 Parametry dźwięku 195
6.3.1.3 Hałas 196
6.3.1.4 Korygowany poziom ciśnienia akustycznego . . 197
6.3.1.5 Moc akustyczna 197
6.3.1.6 Głośność 199
6.3.1.7 Poziom głośności 200
6.3.1.8 Maskowanie 202
6.3.1.9 Wysokość dźwięku 203
6.3.1.10 Hałaśliwość 205
6.3.1.11 Kryteria oceny hałasu słyszalnego 206
6.3.2 Infradźwięki 209
6.3.3 Ultradźwięki 212

Bibliografia 217

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Przedmowa

W ostatnich latach obserwujemy pojawianie się wielu nowych, a także szybki rozwój istniejących już dziedzin nauki, których nazwy poprzedzone są przedrostkiem „bio" (gr. bios – życie). Przyczyny tego zjawiska są wielorakie. Jednej z nich można upatrywać, jak się wydaje, w pewnym „zmęczeniu" współczesnego człowieka postępującą technicyzacją życia i w chęci powrotu do natury, do „prawdziwego życia", czego skutkiem jest m.in. wzrost zainteresowania człowiekiem jako takim. Inna przyczyna wiąże się z niezwykle szybkim postępem naukowo-technicznym, a co za tym idzie z koniecznością coraz większej specjalizacji, wyodrębniania coraz węższych obszarów badań z klasycznych, niekiedy bardzo rozległych, dziedzin wiedzy (np. przez dodanie jakiegoś przedrostka do nazwy tradycyjnej). Trzecim wreszcie powodem, który paradoksalnie stoi w sprzeczności z poprzednio wymienionym, jest tendencja do łączenia się różnych dziedzin wiedzy i powstawanie nauk interdyscyplinarnych. Jest to paradoks pozorny, gdyż w rzeczywistości widać tu przejaw mechanizmu samoregulacji nauki, która broni się w ten sposób przed alienacją poszczególnych jej dyscyplin w wyniku postępującej specjalizacji. Przykładem dążności do łączenia się może być fuzja dwóch dziedzin nauki tradycyjnie tak odległych, jak biologia i mechanika, czego efektem jest powstała stosunkowo niedawno *biomechanika.*

W sprawie definicji biomechaniki nie ma całkowitej zgodności. Niektórzy autorzy proponują definicję obejmującą bardzo szeroki wachlarz zagadnień z pogranicza biologii, medycyny i mechaniki, inni skłaniają się raczej ku definicji zawężonej, koncentrującej się na wybranych aspektach. Przytoczmy kilka z tych definicji.

Biomechanika – dział fizjologii zajmujący się badaniem ruchów człowieka i zwierząt z punktu widzenia praw fizyki i anatomiczno-fizjologicznych właściwości narządów ruchu (*Słownik języka polskiego* pod red. Mieczysława Szymczaka, PWN, 1978).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Biomechanika – nauka o ruchu i mechanizmach ruch ten wywołujących ze szczególnym uwzględnieniem człowieka oraz zwierząt (*Problemy biocybernetyki i inżynierii biomedycznej. Tom 5. Biomechanika*, pod red. Macieja Nałęcza, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1990).

Biomechanika – nauka zajmująca się badaniem mechanicznych właściwości tkanek i narządów oraz ruchem żywych organizmów, jego przyczynami i skutkami z punktu widzenia praw mechaniki (*Wielka Internetowa Encyklopedia Multimedialna*).

Biomechanika jest nauką badającą siły działające na struktury biologiczne i współdziałające z nimi oraz efekty wywołane przez te siły. (B.M. Nigg, W. Herzog, *Biomechanics*, Wiley & Sons, 1994).

Biomechanika jest nauką, która bada struktury i funkcje systemów biologicznych przy użyciu wiedzy i metod mechaniki.

Biomechanika jest to mechanika zastosowana do biologii (Y.C. Fung, *Biomechanics. Mechanical properties of living tissues*, Springer-Verlag, 1981).

Jak widać z powyższego przeglądu, pod pojęciem biomechaniki może kryć się bardzo różny zakres tematyki badawczej. Jednak w większości definicji jako wiodący przewija się temat ruchu człowieka i zwierząt. Dlatego aspekt ruchu został również przyjęty jako podstawa wyboru tematyki niniejszego opracowania. Spośród wielu układów anatomicznych człowieka omówiono w nim te, które wydają się najistotniejsze z punktu widzenia ruchu (manipulacji i lokomocji): układy szkieletowy, mięśniowy, nerwowy oraz narządy zmysłów – wzroku i słuchu. Ponadto zamieszczono rozdział poświęcony wpływowi drgań (jako specyficznemu rodzajowi ruchu) i hałasu na organizm człowieka.

Niniejszy podręcznik został pomyślany jako pomoc dla studentów wydziałów mechanicznych uczelni technicznych w przyswojeniu podstawowych wiadomości z dziedziny biomechaniki. Jest on efektem kilkuletnich doświadczeń zebranych podczas prowadzenia wykładów dla studentów specjalności Aparatura i Sprzęt Medyczny oraz pokrewnych.

Autorzy wyszli z założenia, że studenci trzeciego roku (i wyższych lat) studiów wydziałów mechanicznych (na tym poziomie wprowadza się zazwyczaj przedmiot pt. „Biomechanika") wyposażeni są już w niezbędną wiedzę i umiejętności z zakresu mechaniki i wytrzymałości materiałów, a szerzej rzecz ujmując – dysponują wystarczającą podbudową „mechaniczno-inżynierską". Dlatego program przedmiotu i treść niniejszego podręcznika koncentrują się na pierwszym

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

członie nazwy przedmiotu – „bio", stawiając sobie za cel uzupełnienie wiedzy studentów o niezbędne wiadomości z dziedziny budowy i funkcjonowania organizmu ludzkiego w aspekcie jej wykorzystania do rozwiązywania konkretnych zagadnień technicznych.

Autorzy mają nadzieję, że oddając do rąk studentów niniejszy podręcznik ułatwią im wejście w fascynujący i kryjący jeszcze wiele tajemnic świat biomechaniki oraz zachęcą do podjęcia pogłębionych badań w tej mającej wspaniałe perspektywy dziedzinie wiedzy.


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rozdział 1

Ogólne pojęcia i zasady związane z opisywaniem położenia i ruchu ciała ludzkiego

Anatomia człowieka jest jedną z najstarszych dziedzin nauki. Przez wiele wieków swego rozwoju wykształciła pewien specyficzny język pozwalający m.in. na względnie precyzyjne określanie położenia i ruchów całego ciała człowieka, jak też poszczególnych jego części. Nazwy i pojęcia używane przez lekarzy-anatomów zostały przyjęte również przez specjalistów z innych dziedzin nauki wykorzystujących wiedzę o budowie anatomicznej organizmu ludzkiego, w tym przez biomechaników.

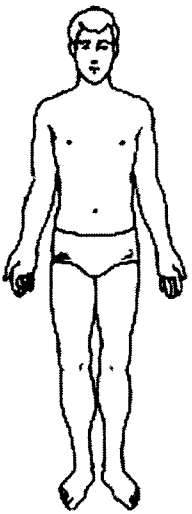
Poniżej przedstawione zostaną podstawowe określenia stanowiące pewien standard pojęciowo-nazewniczy pozwalający na dokładne opisywanie ruchów w stawach i pozycji wyjściowych do pomiarów.

Podstawowym pojęciem związanym z opisem ciała człowieka jest tzw. *pozycja anatomiczna*. Jest to pewna baza, stan odniesienia, naturalne zero, od którego mierzy się położenia i ruchy organizmu ludzkiego lub jego fragmentów. Pozycję anatomiczną charakteryzują (rys. 1.1):

- postawa stojąca,
- głowa i wzrok zwrócone do przodu,
- kończyny górne wyprostowane, ułożone wzdłuż tułowia, z dłońmi skierowanymi ku przodowi (ułożenie supinacyjne),
- palce rąk wyprostowane, kciuk przywiedziony,

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- kończyny dolne wyprostowane,
- stopy zbliżone do siebie powierzchniami przyśrodkowymi,
- palce stóp wyprostowane.



Rys. 1.1. Pozycja anatomiczna

Jak można zorientować się z powyższego opisu, nie jest to pozycja swobodna i człowiek przyjmuje ją rzadko w trakcie swojej codziennej aktywności. Niezależnie jednak od rzeczywistego ułożenia ciała osoby badanej, poszczególne struktury anatomiczne opisuje się i nazywa tak, jakby znajdowała się ona w pozycji anatomicznej.

Przy określaniu stron i kierunków ciała odnosi się je zawsze do pacjenta: prawy oznacza zawsze znajdujący się po prawej stronie pacjenta, niezależnie od tego, czy jest on zwrócony do nas twarzą czy plecami. Podobnie, mówiąc górny mamy na myśli skierowany w stronę (czy też bliższy) głowy, także wówczas, gdy osoba badana znajduje się w pozycji leżącej lub stoi na głowie.

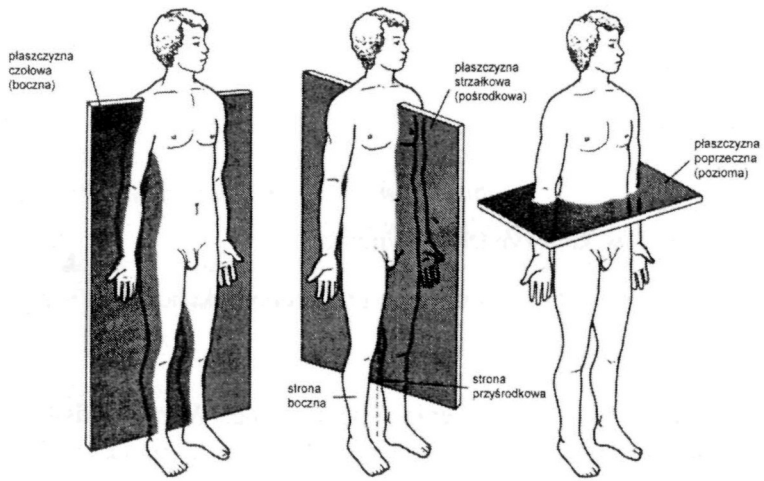
1.1. Płaszczyzny ciała

Do badania poszczególnych części ciała i analizy ich ruchów pomocne jest wprowadzenie pojęcia płaszczyzn ciała (płaszczyzn ruchu). Wyróżniamy trzy szcze-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

gólne płaszczyzny, względem których mogą być rozpatrywane ruchy poszczególnych części ciała. Są nimi (rys. 1.2):

- *płaszczyzna czołowa* lub *boczna* (łac. *planum frontale*, ang. *frontal, lateral plane*), dzieląca ciało na część przednią i tylną,
- *płaszczyzna strzałkowa* lub *pośrodkowa* (łac. *planum sagittale, planum medianum*, ang. *sagittal, median plane*), dzieląca ciało na część lewą i prawą,
- *płaszczyzna poprzeczna* lub *pozioma* (łac. *planum transversale*, ang. *transverse, horizontal plane*), dzieląca ciało na część górną i dolną.



Rys. 1.2. Płaszczyzny anatomiczne

W wielu opracowaniach mówi się o wyżej wymienionych płaszczyznach w liczbie mnogiej: płaszczyzny czołowe, strzałkowe, poprzeczne, mając na myśli rodziny płaszczyzn równoległych. Ma to szczególne uzasadnienie w dobie rozwoju nowoczesnych technik obrazowania struktur organizmu ludzkiego (takich jak np. tomografia komputerowa) pozwalających na oglądanie sekwencji „plasterków" naszego ciała.

Gdy mówimy o ruchu ciała w pewnej płaszczyźnie, to rozumiemy przez to ruch postępowy w tej płaszczyźnie lub obrót wokół osi prostopadłej do tej płaszczyzny. Chociaż każdy elementarny ruch może być sklasyfikowany jako odbywający się w jednej płaszczyźnie, to rzeczywiste nasze ruchy są zazwyczaj kombinacją kilku ruchów w różnych płaszczyznach.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

1.1.1. Kierunki i położenie w przestrzeni

Kierunki określa się względem poszczególnych płaszczyzn anatomicznych. W stosunku do płaszczyzny pośrodkowej wyróżniamy:

- *kierunek przyśrodkowy* (zwrócony ku płaszczyźnie pośrodkowej);
- *kierunek boczny* (na zewnątrz ciała).

W stosunku do płaszczyzny czołowej:

- *kierunek przedni* (*brzuszny*);
- *kierunek tylny* (*grzbietowy*).

W stosunku do płaszczyzny poprzecznej:

- *kierunek górny*;
- *kierunek dolny*.

Opisując położenie w kończynach mówimy o:

- *kierunku bliższym* (zwróconym ku przyczepowi kończyny do tułowia);
- *kierunku dalszym*.

Ręka i stopa mają własne określenia topograficzne. W przypadku ręki są to kierunki *grzbietowy* i *dłoniowy*, zaś w przypadku stopy kierunki *grzbietowy* i *podeszwowy*.

1.2. Osie ciała

Oprócz płaszczyzn ciała wyróżnia się też osie ciała. Są to:

- *oś pionowa* (*podłużna, długa*) – biegnąca od szczytu głowy do stóp, będąca miejscem przecięcia płaszczyzn czołowej i strzałkowej;
- *oś poprzeczna* (*pozioma*) – przechodząca poziomo od strony lewej do prawej, będąca miejscem przecięcia płaszczyzn poprzecznej i czołowej;
- *oś strzałkowa* (*przednio-tylna*) – skierowana poziomo od przodu do tyłu, będąca miejscem przecięcia płaszczyzn poprzecznej i strzałkowej.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rozdział 2

Układ szkieletowy

Układ szkieletowy (rys. 2.1) jest bierną częścią układu ruchu człowieka, a jednocześnie osłoną i podporą miękkich części organizmu. Decyduje on również o kształcie i wielkości ciała ludzkiego. Składa się on z kości, które różnią się kształtem, rozmiarami oraz pełnionymi funkcjami. Różnice w ich wielkości mogą być znaczne. Kość udowa – największa w szkielecie człowieka – ma około 0,5 m długości, podczas gdy najmniejsza kosteczka ucha środkowego – strzemiączko – mierzy zaledwie 2,6 mm.

2.1. Kości

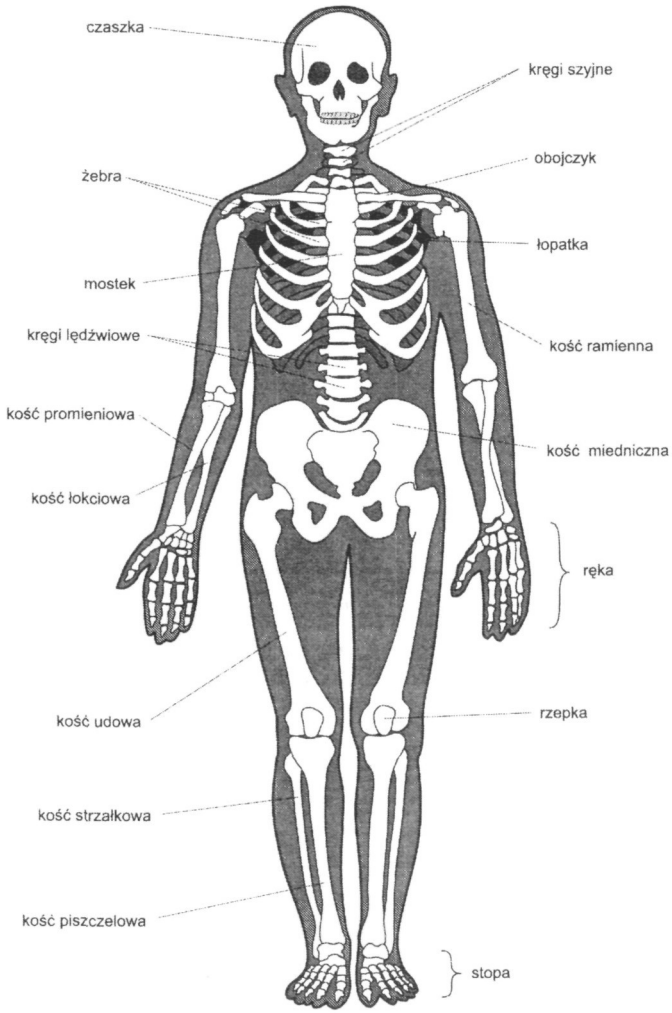
2.1.1. Kształty kości

Ze względu na kształt kości możemy podzielić na cztery grupy (patrz rys. 2.2):

- *Kości długie* – w których jeden z trzech wymiarów jest znacznie większy od pozostałych. Do grupy tej należą przede wszystkim kości kończyn, tzn. kość ramienna, udowa, kości przedramienia, podudzia, śródręcza, śródstopia i palców. Składają się one z części środkowej – trzonu, o kształcie wydrążonego walca lub graniastosłupa, i dwóch, zwykle nieco zgrubiałych, części końcowych: końca bliższego (czyli górnego) i końca dalszego (czyli dolnego). Wewnątrz trzonu znajduje się przestrzeń, tzw. *jama szpikowa*, wypełniona szpikiem.

- *Kości krótkie* – mają mniej więcej jednakowe wymiary we wszystkich trzech kierunkach. Występują zwykle tam, gdzie masywna i silna budowa

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



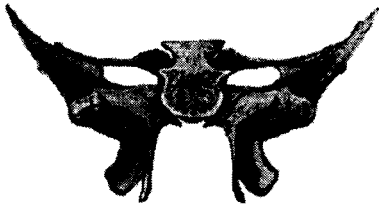
Rys. 2.1. Szkielet człowieka – widok z przodu

łączy się z ograniczoną ruchomością, np. w nadgarstku czy w kościach stępu.

- *Kości płaskie* – są wydłużone w dwóch kierunkach, zaś zdecydowanie spłaszczone w trzecim. Przykładem kości tego typu są kości czaszki, łopatka, mostek, żebra, kość biodrowa i kości miednicy.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- *Kości różnokształtne (nieregularne)* – charakteryzują się bardzo zróżnicowaną budową i nie kwalifikują się do żadnego z poprzednich typów (np. kość klinowa, kręgi).

Rodzaj kości	Przykład anatomiczny
Kość długa	 kość udowa
Kość krótka	 trzeszczka kość skokowa
Kość płaska	 kość ciemieniowa
Kość różnokształtna (nieregularna)	 kość klinowa

Rys. 2.2. Podział kości wg kryterium kształtu

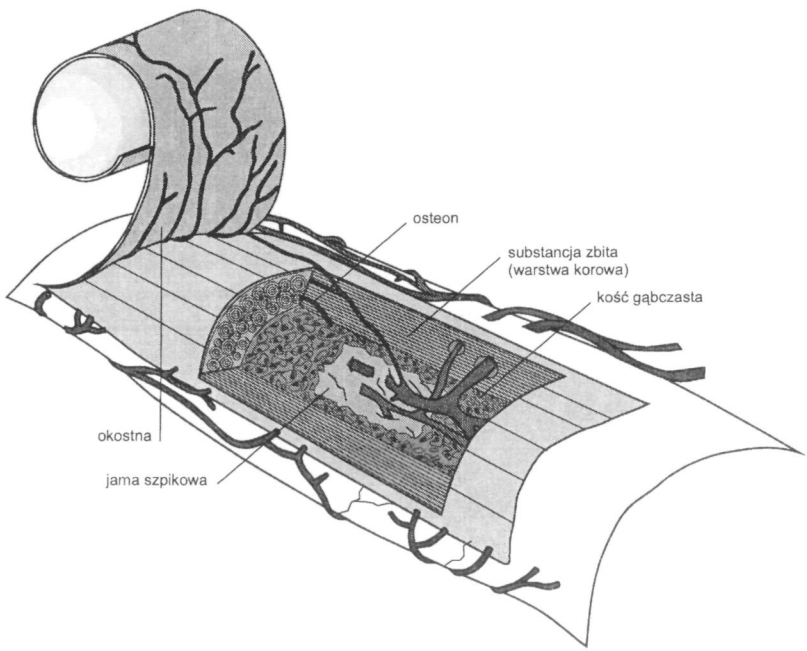
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Poza wymienionymi wyżej czterema grupami wyróżnia się także specjalny rodzaj kości, tzw. *kości pneumatyczne*, w których występują wysłane błoną śluzową przestrzenie wypełnione powietrzem (np. kość sitowa czy szczęka).

Kształt każdej kości jest zdeterminowany funkcją, jaką pełni ona w organizmie. Na przykład, kości długie stanowią dźwignie poruszane za pomocą mięśni, kości krótkie tworzą potrzebne pomosty lub sklepienia, podczas gdy kości płaskie spełniają zadania ochronne lub tworzą powierzchnie oparcia dla szerokich mięśni (np. łopatka).

2.1.2. Budowa i skład kości

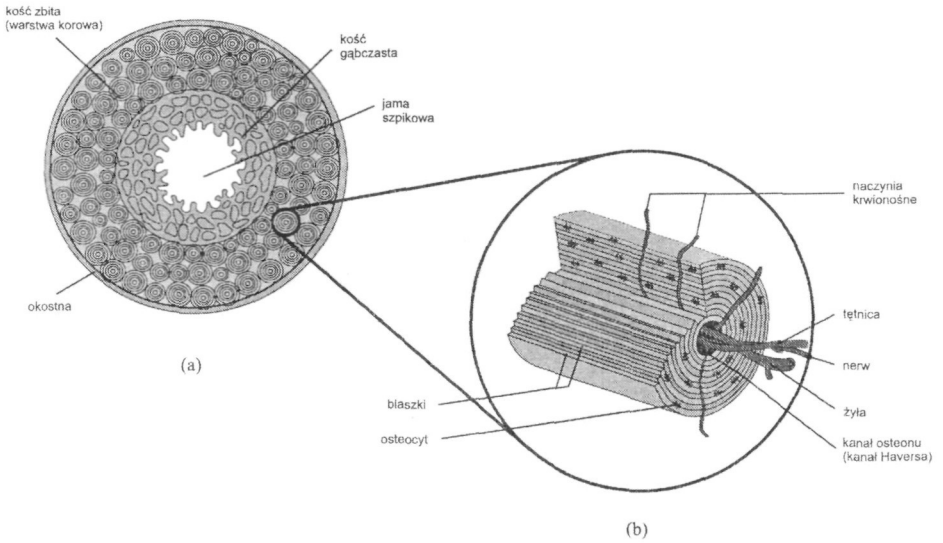
Typowa kość długa zbudowana jest z tkanki kostnej oraz szpiku (rys. 2.3). Tkanka kostna występuje w dwóch postaciach – *substancji kostnej zbitej* oraz *substancji kostnej gąbczastej*. Ponieważ pierwsza z nich znajduje się zawsze na powierzchni kości, to nosi ona też nazwę *warstwy korowej*.



Rys. 2.3. Budowa kości (na podst. [25])

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Substancja kostna zbita (rys. 2.4) utworzona jest z gęsto ułożonych słupów o przekroju walcowym, tzw. *osteonów*. Każdy z nich zbudowany jest z blaszek kostnych ułożonych współśrodkowo wokół kanału centralnego (tzw. *kanału Haversa*), w którym przebiegają naczynia krwionośne i nerwy. Między blaszkami kostnymi leżą jamki kostne zawierające komórki kostne (*osteocyty*). Substancja zbita jest najgrubsza w trzonach kości długich, natomiast jej warstwa pokrywająca nasady tych kości jest dużo cieńsza.

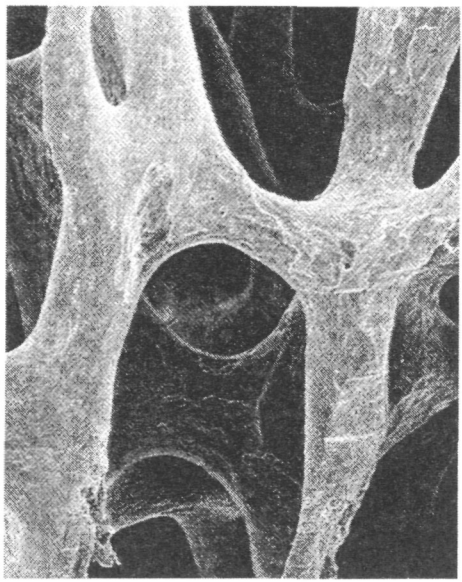


Rys. 2.4. Przekrój trzonu kości długiej (a) i osteon będący podstawowym elementem budowy substancji zbitej (b) (na podst. [25])

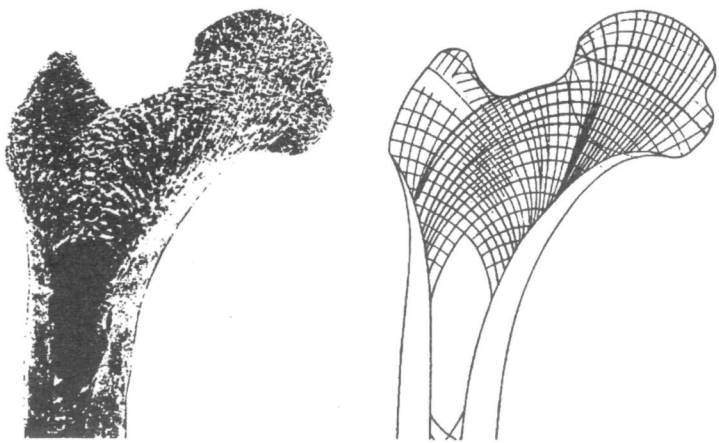
Substancja kostna gąbczasta (trabekularna) (rys. 2.5) ma strukturę podobną do gąbki i stąd pochodzi jej nazwa. Z mechanicznego punktu widzenia przypomina ona konstrukcję kratownicową. Ułożenie beleczek kostnych nie jest w niej przypadkowe, jak mogłoby się z pozoru wydawać, lecz zgodne z rozkładem linii naprężeń (według prawa Wolffa) (rys. 2.6). Sprawia to, że kość jest bardzo wytrzymała a jednocześnie lekka. Substancja gąbczasta występuje przede wszystkim w nasadach kości długich.

Wewnątrz trzonów kości długich, w tzw. *jamach szpikowych*, oraz w przestrzeniach między beleczkami substancji gąbczastej (występującej głównie w nasadach kości) znajduje się gąbczasta, silnie ukrwiona masa – *szpik kostny*. Szpik występuje w dwóch postaciach: *szpiku żółtego* i *szpiku czerwonego*. W początkowym okresie rozwoju (u płodu i noworodka) we wszystkich kościach występuje

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.5. Wewnętrzna struktura substancji gąbczastej



Rys. 2.6. Rozkład linii naprężeń w nasadzie kości udowej

tylko szpik czerwony. Jest on jedynym miejscem wytwarzania czerwonych krwinek (erytrocytów) i ziarnistych krwinek białych (granulocytów). Z wiekiem szpik czerwony zastępowany jest żółtym, składającym się głównie z komórek tłuszczowych i nielicznych postaci krwinek czerwonych. Szpik czerwony utrzymuje się

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

w kręgach, mostku, żebrach, kościach czaszki, kości miednicznej, łopatce i częściowo w końcach kości długich. W zdrowym organizmie dorosłego człowieka ilość szpiku czerwonego i żółtego jest mniej więcej jednakowa. Wraz z wiekiem ilość szpiku znacznie wzrasta (jego waga u 20-letniego mężczyzny wynosi ok. 1,5 kg).

Zrąb szpiku czerwonego i żółtego tworzy siateczkowata tkanka łączna. Zawieszone są w niej naczynia włosowate oraz liczne elementy komórkowe szpiku. Występują one w postaci:

1. *osteoblastów* – komórek kościotwórczych, służących do tworzenia tkanki kostnej;

2. *osteoklastów* – komórek kościogubnych, służących do niszczenia tkanki kostnej;

3. *erytroblastów* – komórek, z których powstają erytrocyty;

4. *mielocytów* – komórek, z których powstają granulocyty;

5. *megakariocytów* (komórek olbrzymich) – komórek, z których rozpadu powstają płytki krwi (trombocyty);

6. *komórek tłuszczowych.*

Poza tkanką kostną i szpikiem w kości występują *naczynia krwionośne*, *naczynia chłonne* i *nerwy*. Ponadto każda kość pokryta jest bogato unerwioną i unaczynioną błoną łącznotkankową zwaną *okostną*. Pełni ona funkcję ochronną, odżywczą i regeneracyjną w stosunku do kości. W okostnej można wyróżnić dwie warstwy: *zewnętrzną* – włóknistą i *wewnętrzną* – rozrodczą. Warstwa wewnętrzna jest bogatsza w składniki komórkowe od warstwy zewnętrznej. W okresie rozwoju kości zawiera ona komórki kościotwórcze (osteoblasty). Wraz z zakończeniem procesu kostnienia komórki kościotwórcze giną. Odnawiają się tylko wtedy, gdy (np. po złamaniu kości) potrzebne jest wytworzenie nowej substancji kostnej. Między złamanymi końcami kości powstaje wtedy tzw. *kostnina*. W okostnej przebiega znaczna liczba nerwów oraz naczyń chłonnych i krwionośnych, które wnikając do kości odżywiają ją. Silne czuciowe unerwienie okostnej powoduje dużą wrażliwość na ból, np. w przypadku uderzenia w przednią część piszczeli.

W przypadku chrząstki odpowiednikiem okostnej jest podobna w budowie i w zakresie spełnianych zadań *ochrzęstna* (nie dotyczy to chrząstek stawowych).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Powierzchnie końców kości biorących udział w połączeniu stawowym pokryte są sprężystą i śliską *chrząstką szklistą*, której zadaniem jest zmniejszenie tarcia w stawie i tłumienie ewentualnych drgań powstających w czasie ruchu.

Budowa innych rodzajów kości jest podobna do budowy nasad kości długich. W kościach płaskich warstwa substancji gąbczastej jest cienka i nosi nazwę *śródkościa*, leżącego między dwiema warstwami substancji zbitej, *blaszką zewnętrzną* i *blaszką wewnętrzną*. Czasami w miejscach, gdzie kość płaska jest bardzo cienka, substancja gąbczasta w ogóle nie występuje i blaszki zrastają się, tworząc jedną całość.

2.1.3. Właściwości fizyczne kości

Organiczne podłoże nadaje kości dużą sprężystość, a zawartość soli wapiennych czyni ją również bardzo wytrzymałą na ściskanie i rozciąganie. Wytrzymałość substancji kostnej na rozciąganie jest przy tym mniejsza od wytrzymałości na ściskanie. Na zginanie kość jest znacznie mniej odporna.

Tab. 2.1. Stałe materiałowe ludzkich kości długich na podstawie badań różnych autorów [24]

	Reilly i Burstein (1975)	Yoon i Katz (1976)	Knetz i Malmeisters (1977)	Ashman et al. (1983)
Rodzaj kości	Kość udowa	Kość udowa	Kość piszczelowa	Kość piszczelowa
Założona symetria	Izotropia poprzeczna	Izotropia poprzeczna	Ortotropia	Ortotropia
Metoda pomiaru	Maszyna wytrzymałościowa	Ultradźwiękowa	Maszyna wytrzymałościowa	Ultradźwiękowa
E_1 [GPa]	11.5	18.8	6.91	12.0
E_2 [GPa]	11.5	18.8	8.51	13.4
E_3 [GPa]	17.0	27.4	18.4	20.0
G_{12} [GPa]	3.6	7.17	2.41	4.53
G_{13} [GPa]	3.3	8.71	3.56	5.61
G_{23} [GPa]	3.3	8.71	4.91	6.23
ν_{12}	0.58	0.312	0.49	0.376
ν_{13}	0.31	0.193	0.12	0.222
ν_{23}	0.31	0.193	0.14	0.235
ν_{21}	0.58	0.312	0.62	0.422
ν_{31}	0.46	0.281	0.32	0.371
ν_{23}	0.46	0.281	0.31	0.350

Oś 3 jest zgodna z długą osią kości, 1 i 2 oznaczają odpowiednio kierunki promieniowy i obwodowy

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Trudno jest uzyskać precyzyjne dane na temat własności fizycznych kości. Wynika to z faktu, że różni badacze stosują różne metody pomiaru, w różnych warunkach i na różnych próbkach, i dlatego otrzymane wyniki są trudno porównywalne. Z całą pewnością można jednak stwierdzić, że substancja kostna należy do materiałów o bardzo dużej wytrzymałości, zbliżonej do żelbetonu (a nawet większej), szczególnie na ściskanie (w naturalnych warunkach takim właśnie obciążeniom kość jest poddawana najczęściej). W tabelach 2.1–2.7 przedstawione są dane dotyczące własności fizycznych różnych kości, otrzymane w wyniku badań przez różnych autorów.

Tab. 2.2. Własności mechaniczne różnych tkanek mięśniowo-szkieletowych człowieka (rejon kolana) [20]

Rodzaj pobranej tkanki oraz rodzaje obciążeń	Doraźna wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Odkształcenie dla wytrzymałości doraźnej [%]
Mięśnie (rozciąganie)	0.1 – 0.3	40 – 60
Więzadło grzbietowe		
w zakresie sprężystym	1 – 2	30 – 125
Kość gąbczasta		
rozciąganie	1 – 2	0.1
ściskanie	1.5 – 2	0.03 – 0.6
Powięź (rozciąganie)	15	15 – 17
Chrząstka szklista		
rozciąganie	1 – 40	10 – 100
ściskanie	7 – 23	3 – 17
ścinanie	6	—
Chrząstka (włóknista)		
rozciąganie	10 – 15	10 – 20
ściskanie	20	30
Ścięgna	40 – 100	10 – 17
Więzadła poboczne		
niesprężyste	60 – 100	5 – 14
Kość (korowa)		
rozciąganie	90 – 170	0.7 – 5
ściskanie	100 – 280	1 – 2.4
ścinanie	50 – 100	—

96948
BIBLIOTEKA GŁÓWNA PŁ
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Tab. 2.3. Własności średnie świeżej i suchej kości korowej dla populacji obejmującej 20-39 rok życia podczas próby rozciągania [30]

Nazwa kości	Kość świeża	Kość wysuszona
	Graniczna wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	
Udo	121.6 ± 1.08	151.02 ± 0.98
Podudzie	140.2 ± 1.18	170.63 ± 1.18
Strzałka	146.12 ± 1.47	175.54 ± 1.37
Kamienna	122.6 ± 0.78	154.94 ± 2.16
Promieniowa	149.06 ± 1.37	179.46 ± 1.57
Łokciowa	148.08 ± 1.47	177.5 ± 1.18
Wartość średnia	137.3	168.7
	Graniczne wydłużenie procentowe	
Udo	1.41	1.24
Podudzie	1.50	1.29
Strzałka	1.59	1.38
Kamienna	1.43	1.28
Promieniowa	1.50	1.31
Łokciowa	1.49	1.30
Wartość średnia	1.49	1.30
	Moduł sprężystości [GPa]	
Udo	17.26	20.202
Podudzie	19.04	20.59
Strzałka	18.53	21.08

Tab. 2.4. Średnie wartości własności mechanicznych substancji zbitej ludzkiej kości udowej dla grupy ludzi dorosłych [30]

Wytrzymałość na rozciąganie	107 MPa
Graniczne wydłużenie	135%
Wytrzymałość na ściskanie	159 MPa
Wytrzymałość na zginanie	160 MPa
Wytrzymałość na skręcanie	53 MPa
Graniczne odkształcenie skręcające	0.027 ± 0.0005
Moduł sprężystości poprzecznej	3.14 GPa
Wytrzymałość na rozszczepianie w kierunku promieniowym	84 MPa


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Tab. 2.5. Własności mechaniczne elementów kręgosłupa [30]

Nazwa elementu	Moduł sprężystości [GPa]	Liczba Poissona
Kość korowa	10 – 20	0.3
Kość gąbczasta	0.05 – 0.1	0.4
Łuk kręgu	0.5 – 1.5	0.3
Płytka graniczna	0.5 – 1	0.4
Pierścień włóknisty	0.25 – 0.9	0.35
Jądro miażdżyste	0.002	0.499
Więzadła	0.01	0.3

Tab. 2.6. Wytrzymałość na rozciąganie próbek kości korowej zabalsamowanej w zależności od kierunku pobrania [10]

Rodzaj próbki	Liczność próbek	Wytrzymałość doraźna [MPa]	Absorbowana energia [J/m^2]	Odkształcenia maksymalne	Moduł sprężystości [10^4 MPa]
Świeże	49	126.3 ± 33.1	18790 ± 7355	1.15 ± 0.30	1.45 ± 0.34
Balsamowane	42	98.6 ± 25.5	14308 ± 5517	0.982 ± 225	—

Tab. 2.7. Energia pochłaniana przez kości w zależności od odkształcenia [10]

Odkształcenie kości	$\varepsilon = 0{,}36$				$\varepsilon = 0{,}50$			
Struktura kości	Korowa		Gąbczasta		Korowa		Gąbczasta	
Rodzaj obciążenia	Ściskanie	Rozciąganie	Ściskanie	Rozciąganie	Ściskanie	Rozciąganie	Ściskanie	Rozciąganie
Absorbowana energia	6.6	4	0.53	0.44	6.54	4	6.57	0.5

2.1.4. Wzrastanie i regeneracja kości

Rozwój układu szkieletowego odbywa się w trzech etapach prowadzących do powstania konstrukcji, której podstawowym materiałem jest tkanka kostna. Na każdym z etapów pojawia się nowa forma budowy, zastępująca stopniowo poprzednią:

(i) w pierwszej fazie mamy do czynienia z *formą błoniastą* (łącznotkankową);

(ii) w drugiej fazie powstaje *forma chrząstkowa* (od 4. do 7. tygodnia życia płodowego);

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

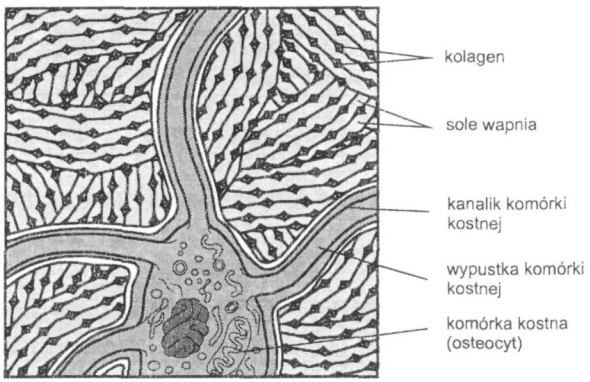
(iii) w trzeciej fazie powstaje *forma kostna* (od 7. tygodnia życia płodowego).

Niekiedy kość może powstawać bezpośrednio na podłożu łącznotkankowym z pominięciem drugiego etapu, tzn. stadium chrząstkowego. Łącznotkankowe podłoże szkieletu, na którym powstają najpierw części chrzęstne, następnie zaś części kostne, nie ginie jednak w całości, lecz zostaje częściowo zachowane w postaci błonki otaczającej kości (okostna) i chrząstki (ochrzęstna) oraz jako połączenie kości ze sobą w postaci torebki stawowej. Również chrząstka nie przechodzi w całości w postać kostną, lecz częściowo pozostaje w swojej pierwotnej formie (np. części chrzęstne żeber, spojenie kości łonowych). Tak więc ostatecznie ukształtowany szkielet współtworzą tkanka kostna (głównie), chrząstka i tkanka łączna.

W wyniku kostnienia na podłożu łącznotkankowym powstają tzw. *kości okładzinowe*, do których należą kości sklepienia i ścian bocznych czaszki, większość kości twarzy i obojczyk.

W wyniku kostnienia na podłożu chrząstkowym powstają tzw. *kości zastępcze*. Nazwa ta pochodzi stąd, że chrząstka jest najpierw niszczona i dopiero potem na jej miejscu wytwarza się tkanka kostna. Wyróżnia się przy tym *kostnienie ochrzęstne*, które rozpoczyna się z zewnątrz, od ochrzęstnej i *kostnienie śródchrząstkowe*, w którym kość zastępuje zniszczoną chrząstkę od wewnątrz.

Strukturę mikroskopową tkanki kostnej przedstawiono na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Struktura mikroskopowa tkanki kostnej (na podst. [25])

Wzrastanie kości odbywa się przez *przywarstwianie* (z uwagi na twardość substancji kostnej nie mogłaby ona rosnąć przez „rozstępowanie się" swoich elementów). Odpowiedzialne za to są komórki kościotwórcze, *osteoblasty*. Ich

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

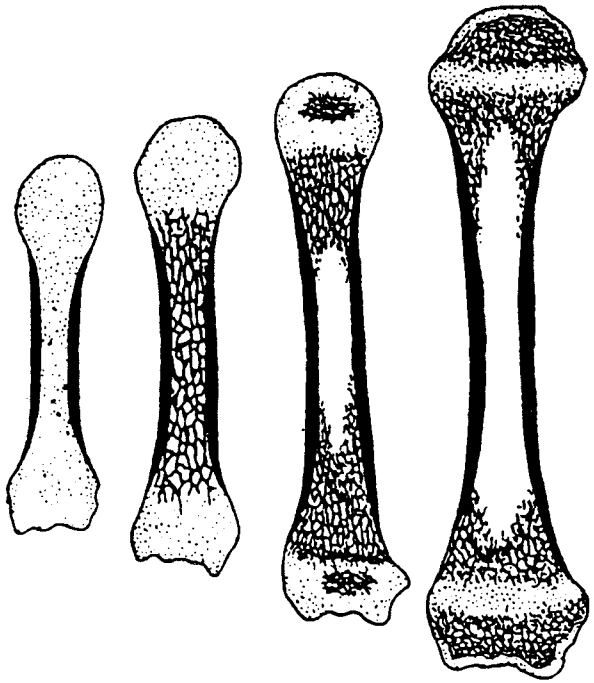
wypustki łącząc się ze sobą tworzą włóknistą sieć stanowiącą organiczne podłoże dla odkładających się substancji mineralnych (głównie soli wapnia). Z czasem sieć ta utworzona z włókien kolagenu twardnieje, zamieniając się w zwapniałą substancję kostną. Niektóre z komórek kościotwórczych (osteoblastów) zostają uwięzione w wytworzonej przez siebie strukturze i przyjmują wówczas nazwę *osteocytów*. Z tą chwilą kończy się budowanie pojedynczej warstwy kostnej. Dalsze przywarstwianie (tworzenie nowych warstw istoty kostnej) odbywa się dzięki osteoblastom, które pozostały na powierzchni. Samo przywarstwianie nie mogłoby jednak doprowadzić do osiągnięcia przez kość pożądanego, ostatecznego kształtu. Równolegle ze zjawiskiem wytwarzania kości występuje więc zjawisko jej niszczenia, będące wynikiem działania komórek kościogubnych, *osteoklastów*. Tworzą one zagłębienia w kości, tzw. *zatoki Howshipa*. Ilustracją procesu niszczenia kości (*wchłaniania, reabsorpcji*) może być przykład kości udowej 3-letniego dziecka, która nie zawiera już materiału kostnego, z którego zbudowana jest kość udowa noworodka. Komórki kościogubne i kościotwórcze działają więc antagonistycznie, przy czym u osób młodych wytwarzanie kości jest szybsze niż wchłanianie, odwrotnie niż u osób w wieku starszym.

Od 7 tygodnia życia płodowego zaczyna się powstawanie *punktów kostnienia* – zalążków, wokół których następuje tworzenie substancji kostnej (patrz rys. 2.8). Na początku pojawiają się one w trzonach kości długich i szybko rozprzestrzeniają się, by w trzecim miesiącu życia płodowego objąć większość pozostałych kości.

W pierwszym okresie, który trwa mniej więcej do 6 roku życia, wytworzony zostaje „zgrubny" szkielet, choć funkcjonalny pod względem spełnianych czynności, to jednak pozbawiony jeszcze precyzyjnej, wycyzelowanej formy. Po okresie spowolnienia procesów osyfikacyjnych (w wieku ok. 9 lat u dziewcząt, zaś ok. 11 roku życia u chłopców) rozpoczyna się drugi okres kostnienia. Pojawiają się wówczas tzw. *wtórne* albo *dodatkowe* punkty kostnienia, dzięki którym kości uzyskują delikatniejszą rzeźbę i osiągają swoją ostateczną postać. W okresie pokwitania następuje kostnienie chrząstki nasadowej, dzięki której możliwy jest wzrost długości kości. Pozostałością po niej jest tzw. *kresa nasadowa*. Z chwilą zakończenia kostnienia połączeń nasad z trzonami kończy się proces wzrostu.

Liczba kości ustroju ludzkiego jest zmienna w zależności od wieku. U noworodka wynosi ona ok. 270. Wraz z pojawieniem się wtórnych punktów kostnienia liczba ta wzrasta i np. u dziecka 14-letniego wynosi ok. 350. W wieku późniejszym, po połączeniu się nasad z trzonami, liczba ta spada i wynosi u dorosłego człowieka 206, po czym wraz ze zrastaniem się kości czaszki w wieku późniejszym w dalszym ciągu się zmniejsza.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.8. Kolejne etapy kostnienia kości długiej: a) stadium chrzęstne, wąski mankiet kostny wokół trzonu (kolor czarny); b) nasady są jeszcze chrzęstne, ale w trzonie formuje się już siateczka kostna tkanki gąbczastej; c) śródchrzęstne punkty kostnienia w nasadach, początki jamy szpikowej w trzonie, d) chrząstka występuje tylko na powierzchniach stawowych i na granicy trzonu i nasad oraz pojawia się rozwinięta jama szpikowa [5]

Kość ma zdolność *regeneracji*, czego dowodem jest możliwość jej zrastania się po złamaniu. Kluczową rolę w tym procesie odgrywa okostna. Oprócz wytwarzania tkanki kostnej ma ona również zdolność odtwarzania kształtu kości. Najłatwiej regenerują się trzony kości długich, ubytki kości żuchwy i żeber, natomiast kości czaszki i kości gąbczaste regenerują się znacznie trudniej.

Kość ma również zdolności *adaptacyjne* – potrafi dostosowywać swój kształt i wielkość do obciążeń i warunków. Na przykład przy złamaniu piszczeli, druga z kości goleni, strzałka, może zwiększyć swoją grubość tak, aby przejąć dodatkowo pojawiające się siły ściskające. Z kolei długotrwały brak obciążenia może prowadzić do zaniku kości. Należy zauważyć, że kości mają największy

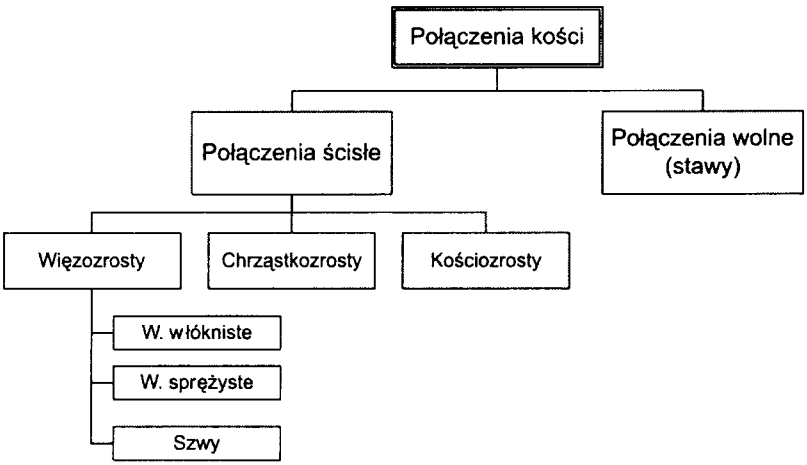
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

„współczynnik bezpieczeństwa" ze wszystkich elementów biorących udział w budowie układu ruchu (mięśni, ścięgien, tkanki łącznej). Wynika to nie tylko z faktu, iż przenoszą one znaczne obciążenia dynamiczne, ale również z konieczności dostosowania ich kształtu do otaczających je mięśni, ścięgien i innych narządów. Przykładem tego może być trójkątny przekrój piszczeli uwarunkowany przylegającymi do niej mięśniami, mimo że ze względów wytrzymałościowych optymalny byłby przekrój kołowy.

2.2. Połączenia kości

Połączenia, jakie tworzą kości, można podzielić na dwa podstawowe rodzaje (rys. 2.9):

- połączenia ścisłe,
- połączenia wolne czyli stawy.



Rys. 2.9. Rodzaje połączeń kości

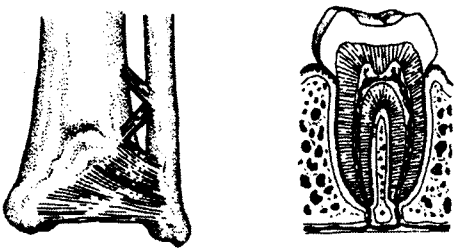
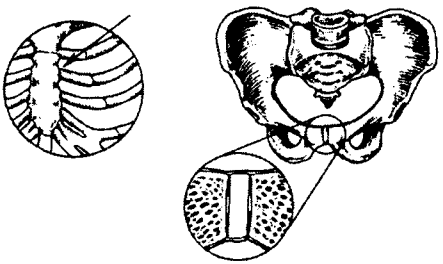
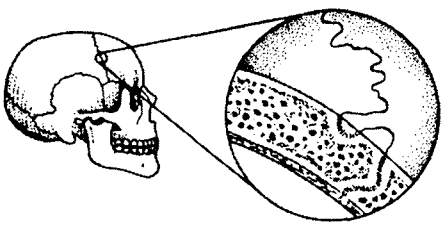
2.2.1. Połączenia ścisłe

Połączenia ścisłe występują w trzech postaciach, jako:

- więzozrosty,

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- chrząstkozrosty,
- kościozrosty.

Typ połączenia	Przykład anatomiczny
Więzozrost	
Chrząstkozrost	
Kościozrost	

Rys. 2.10. Typy połączeń ścisłych

Podział ten związany jest z różnymi rodzajami tkanki spajającej kości: w więzozrostach jest to tkanka łączna, w chrząstkozrostach – chrząstka, w kościozrostach – kość. Znajdujemy tu odbicie trzech stadiów rozwojowych układu szkie-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

letowego (błoniastego, chrząstkowego i kostnego). Poniżej pokrótce scharakteryzowano każde z połączeń.

Więzozrost występuje w trzech odmianach, jako:

- więzozrost włóknisty (np. błony międzykostne przedramienia lub goleni),
- więzozrost sprężysty (np. więzadła żółte między łukami kręgów lub aparat więzadłowy w obrębie krtani),
- szew
  - *gładki* (prosty), np. wyrostki podniebienne szczęki lub blaszki poziome kości podniebiennych,
  - *łuskowy* (łuska kości skroniowej z kością ciemieniową),
  - *piłowaty*, najbardziej złożony i najmocniejszy ze wszystkich szwów (między większością kości sklepienia czaszki),
  - *wklinowanie* (jest sposobem umocowania korzeni zębów w ścianie zębodołu).

Chrząstkozrost stanowi połączenie często występujące w wieku dziecięcym i młodzieńczym i pojawia się w kościach długich między trzonem i nasadą w postaci chrząstki nasadowej. U człowieka dorosłego chrząstkozrost spotyka się w połączeniach żeber z mostkiem oraz obu kości łonowych.

Kościozrost jest najmocniejszym połączeniem kości, które powstaje z wiekiem przez kostnienie obu pierwszych postaci połączeń ciągłych. Typowym zjawiskiem jest kostnienie chrząstek nasadowych i szwów czaszki. Również i stawy mogą kostnieć, np. stawy kości krzyżowej. Patologiczne skostnienie występuje niejednokrotnie po złamaniu kości w stawie.

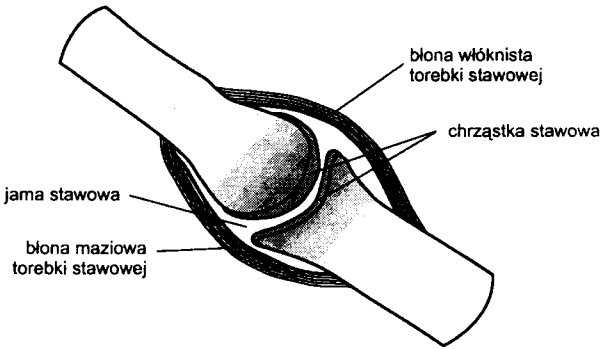
Typy połączeń ścisłych przedstawiono na rys. 2.10.

2.2.2. Połączenia wolne (stawy)

Połączenie, w którym stykają się dwie lub więcej kości, nie zrośnięte ze sobą żadnym rodzajem tkanki, nazywamy *stawem*. Stawy zapewniają łączącym się w nich kościom największy stopień ruchomości, z czym wiąże się budowa bardziej złożona niż w przypadku nieruchomych połączeń ścisłych. We wszystkich stawach możemy wyróżnić następujące główne składniki:

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

1. *powierzchnie stawowe* kości łączących się w stawie;
2. *torebkę stawową*;
3. *jamę stawową*.



Rys. 2.11. Budowa stawu

Poza trzema wyżej wymienionymi składnikami spotyka się jeszcze inne, swoiste, występujące w niektórych tylko stawach. Należą do nich: *więzadła stawowe*, *chrząstki śródstawowe* i *obrąbki chrząstkowe*. Budowę stawu przedstawiono na rys. 2.11.

2.2.2.1. Powierzchnie i chrząstki stawowe

Powierzchnie stawowe pokryte są z reguły chrząstką szklistą, jedynie rzadko chrząstką włóknistą. Ich kształt może być płaski, wypukły lub wklęsły. Powierzchnie wklęsłe stanowią *panewkę* stawu, zaś powierzchnie wypukłe *główkę* stawową. Gładka powierzchnia chrząstki jest doskonale przystosowana do zmniejszenia tarcia w czasie przesuwania się jednej powierzchni względem drugiej. Chrząstka stawowa jest sprężysta – odkształca się pod naciskiem wywołanym ruchami stawu i powraca do pierwotnej postaci gdy nacisk ustaje. Z wiekiem chrząstka staje się mniej sprężysta. Grubość chrząstki jest różna i zależy od tarcia w stawie. Średnia grubość waha się w granicach 0.5-2 mm. Chrząstki stawowe panewek są przeciętnie bardziej miękkie niż chrząstki główek stawowych.

Chrząstka najlepiej rozwija się i zachowuje tam, gdzie poddawana jest ciągłym naciskom. Fakt ten stanowi przejaw ogólnej zasady dostosowywania się narządu do spełnianej funkcji. Chrząstka stawowa stanowi więc prawdziwą warstwę

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

ochronną dla końców stawowych kości. Poza tym, przez swą znaczną podatność i zdolność do sprężystego odkształcania się, chrząstka spełnia rolę amortyzującą, osłabiając siłę urazów, na które kończyny i kręgosłup są tak często narażone.

Wszystkie chrząstki stawowe są pozbawione naczyń i nerwów. Dzięki temu nie odczuwamy jako bólu ucisku, któremu one podlegają w czasie wykonywanych czynności.

2.2.2.2. Torebka stawowa

Dodatkowe zabezpieczenie przed destabilizacją stawu i równocześnie dodatkową ochronę zapewnia otaczająca go torebka stawowa. Zamyka ona szczelnie staw i przechodzi w okostną, czyli mocną, obficie unaczynioną i unerwioną błonę włóknistą, okrywającą ze wszystkich stron kość. Torebka stawowa jest zbudowana z dwóch warstw. Zewnętrzna, mocniejsza *warstwa włóknista* składa się z łącznotkankowych włókien, z których część tworzy więzadła łączące kości. Wewnętrzna, delikatniejsza warstwa torebki stawowej to tzw. *maziówka*, bogato unaczyniona błona łącznotkankowa, zawierająca włókna sprężyste i komórki tłuszczowe, produkująca maź stawową. Jest to gęsta ciecz, która ułatwia „poślizg" w stawie i zapewnia bezbolesne przesuwanie się powierzchni stawowych względem siebie.

2.2.2.3. Jama stawowa

Jama stawowa jest to szczelinowata przestrzeń wypełniona mazią stawową. Wielkość jej jest różna i waha się od kilku cm^3 w najmniejszych stawach do przeszło 300 cm^3 w stawie kolanowym. W stanach zapalnych powiększona jama stawowa może zawierać nawet 1,5 l płynu.

2.2.3. Czynniki łączące kości w stawie

Różne czynniki mają różny wpływ na zwieranie powierzchni stawowych, czyli łączność kości w stawie. Jedne z nich mają zasadnicze znaczenie, inne bardzo niewielkie. Poniżej podano ich krótkie charakterystyki.

1. *Powłoki zewnętrzne*, jak powięzie i skóra, w stosunku do innych czynników mają minimalne znaczenie.

2. *Przyleganie*, czyli *adhezja* odgrywa tylko nieznaczną rolę.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3. *Więzadła stawowe* odgrywają tak ważną rolę, że czynnik ten sam jeden byłby całkowicie wystarczający do utrzymania łączności kości. W pewnych stawach jednak, zwłaszcza w stawach kulistych, więzadła w położeniu średnim są tak rozluźnione, że nie mogą przytrzymywać powierzchni stawowych.

4. *Pociąganie mięśni* prowadzi do powstania dużej siły, która wpływa na zwieranie mięśni w stawie.

2.2.4. Rodzaje ukształtowania powierzchni stawowych

W związku z różnym ukształtowaniem powierzchni stawowych wyróżniamy następujące typy stawów [5] (patrz rys. 2.12).

1. *Staw zawiasowy.* Pozwala na ruchy w jednej płaszczyźnie ustawionej pod kątem prostym do osi stawu, mianowicie na *zgięcie* i *prostowanie*. Typowym przykładem stawu zawiasowego są stawy między członkami palców.

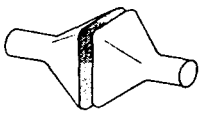
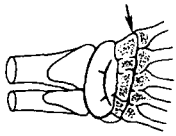
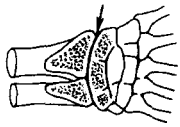
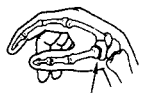
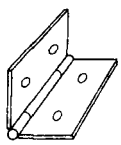
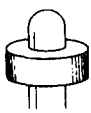
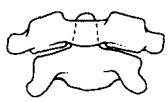
2. *Staw obrotowy.* Podobnie jak poprzedni jest stawem jednoosiowym. Cylindrycznie ukształtowana główka stawowa obraca się jak czop w łożysku. Os stawu przebiega nie prostopadle do długiej osi kości, jak w poprzednim stawie, lecz wzdłuż długiej osi kości (np. staw promieniowo-łokciowy bliższy).

3. *Staw śrubowy.* Cechą charakterystyczną tego stawu jest to, że ruch obrotowy dokoła osi łączy się w nim z równoczesnym ruchem wzdłuż tej osi. Przykładem mogą być stawy wyrostka zębowego kręgu obrotowego.

4. *Staw eliptyczny.* Ma główkę stawową o przekroju eliptycznym, wypukłą w stosunku do swej długiej osi, jak również i do krótkiej, prostopadłej do pierwszej. Staw ten ma dwie główne osie, w stosunku do których wykonywane ruchy odbywają się w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach. Przykładem tego typu stawu jest staw promieniowo-nadgarstkowy. Odróżniamy tu *zgięcie dłoniowe* i *grzbietowe* oraz *przywodzenie* i *odwodzenie*. Z połączenia obu ruchów powstaje ruch *obwodzenia*; powoduje on obwodzenie danej części ciała na powierzchni stożka.

5. *Staw siodełkowaty.* Obie powierzchnie stawowe mają kształt siodła i są w kierunku jednej osi wypukłe, a wklęsłe w kierunku drugiej, prostopadłej do pierwszej. Typowym stawem tego rodzaju jest staw nadgarstkowo-śródręczny kciuka.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Typ stawu	Schemat mechaniczny	Przykład anatomiczny
Staw płaski		 stawy kości nadgarstka
Staw eliptyczny		 staw promieniowo-nadgarstkowy
Staw kulisty panewkowy		 staw biodrowy
Staw siodełkowaty		 staw nadgarstkowo-śródręczny kciuka
Staw zawiasowy		 staw łokciowy
Staw obrotowy		 staw szczytowo-potyliczny pośrodkowy

Rys. 2.12. Typy stawów oraz odpowiadające im schematy mechaniczne i przykłady anatomiczne

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

6. *Staw kulisty wolny*. Powierzchnię stawową główki stanowi odcinek kuli, której odpowiada mała, wklęsła panewka, jak np. w stawie barkowym. Ruchy mogą się odbywać wokół nieskończonej liczby osi.

7. *Staw kulisty panewkowy*. Jak sama nazwa wskazuje jest to również staw kulisty, jednak główka stawowa jest objęta tutaj panewką aż poza równik. Tak więc panewka jest znacznie większa i obejmuje też znacznie większą część główki niż w stawie wolnym. Z tego powodu również zakres ruchów, w zasadzie identyczny, jest tutaj bardziej ograniczony (np. staw biodrowy).

8. *Stawy nieregularne*. Mają powierzchnie, których nie można porównać ze zwykłymi ciałami rotacyjnymi, jak np. staw mostkowo-obojczykowy. W stawy te włączone są często chrząstki śródstawowe.

9. *Stawy napięte, czyli płaskie*. Mają powierzchnie stawowe płaskie lub prawie płaskie, równe lub guzkowate i mniej więcej tej samej wielkości. Z tego powodu ruchomość w tych stawach jest bardzo silnie ograniczona, w pewnym stopniu jednak zależna od napięcia aparatu więzadłowego. Gdy torebka stawowa jest wiotka (np. w stawach kręgów), jedna kość może się względem drugiej jeszcze nieznacznie przesuwać. Jeżeli natomiast więzadła są silnie napięte, ruchomość jest minimalna (np. w stawie krzyżowo-biodrowym, stawach kości nadgarstka czy stępu).

W ruchach poszczególnych części ciała bierze udział kilka stawów, tworząc tzw. łańcuch stawowy. Ruchomość pojedynczych ogniw takiego łańcucha sumuje się, dzięki czemu koniec dalszy osiąga znacznie większy stopień ruchomości niż koniec bliższy.

2.2.5. Rodzaje ruchów w stawach

Ruchy w stawach możemy podzielić na trzy kategorie: ślizganie się, toczenie oraz obracanie. Te trzy różne rodzaje ruchu mogą występować jednocześnie w tym samym stawie; rzadko zdarza się, że w jednym stawie może odbywać się tylko jeden rodzaj ruchu.

1. *Ruchy ślizgowe* wykonywane są wskutek ścisłego przylegania powierzchni stawowych do siebie (porównać je można do ruchu piasty względem osi koła). Ruchy te są oczywiście ograniczone w obie strony. Ten typ ruchu jest wspólny dla wszystkich stawów, ale tylko w niektórych z nich (np. w stawach nadgarstka czy stępu) jest on jedynym typem ruchu.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

2. *Ruchy toczne* występują np. w początkowych stadiach zgięcia w stawie kolanowym lub w stawie żuchwowym, gdy otwiera się usta.

3. *Ruchy obrotowe* występują wtedy, kiedy dwie powierzchnie stawowe o kształcie odcinków kuli stykają się ze sobą w jednym punkcie i w tym punkcie stycznym jedna kość obraca się na drugiej wokół swej długiej osi, tak jak bąk obraca się na podłodze. Przykładem może być ruch główki kości promieniowej na główce kości ramieniowej w stawie promieniowo-łokciowym bliższym

W utworzeniu stawu mogą brać udział dwie lub więcej kości, a w związku z tym rozróżniamy *stawy proste* (np. staw łokciowy) i *stawy złożone* (np. staw promieniowo-nadgarstkowy).

2.2.6. Zakresy ruchów w stawach

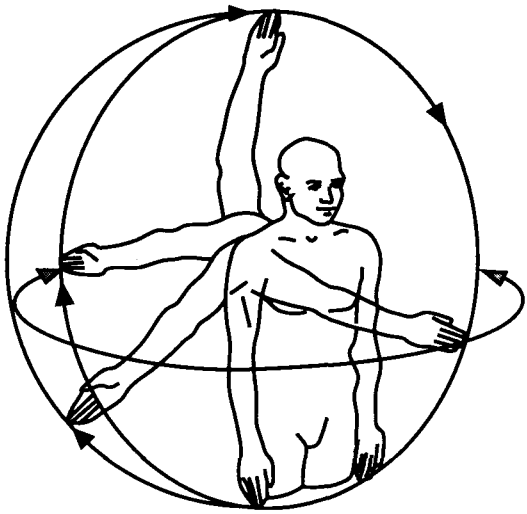
Zakres ruchów w stawie zależy od kształtu powierzchni stawowych. Zakończenia stawowe kości pokryte są chrząstką szklistą powleczoną mazią stawową, a dwie końcówki kości obejmuje torebka stawowa zbudowana z mocnej tkanki włóknistej wyścielonej od wewnątrz błoną maziową. W skład stawu mogą wchodzić również więzadła, czyli struktury zbudowane z bardzo mocnej tkanki włóknistej spajające elementy chrząstkowe bardziej skomplikowanych stawów (np. stawu kolanowego). Na ogół ruchy w stawach są ruchami złożonymi, np. ruch toczenia połączony z ruchem poślizgu. Stawy proste umożliwiają wykonanie jednego ruchu obrotowego, a złożone nawet do trzech. Uproszczenie to jest ze wszechmiar uzasadnione, bowiem zakres ruchu obrotowego stawu wynosi minimum kilkadziesiąt stopni, zaś ruchy postępowe są minimalne i spowodowane są podatnością niektórych połączeń stawowych.

Po uwzględnieniu wszystkich możliwych stopni swobody stawów otrzymujemy liczbę 250 ruchów, które człowiek może wykonać. Jest to jednak liczba czysto teoretyczna, ponieważ większość ruchów, przede wszystkim palców dłoni i stóp, jest ze sobą sprzężona i nie można ich wykonać oddzielnie. Na przykład kończyna górna człowieka jest w stanie wykonać 11 ruchów niezależnych (patrz rys. 2.13).

Zakres ruchów preparatów stawowych po usunięciu mięśni jest znacznie większy niż żywego osobnika. Jednak dzięki ćwiczeniom i masażom niektórzy ludzie, np. akrobaci, mogą znacznie przekroczyć wartości przeciętne.

Na ogół na jednym końcu kości długiej osadzona jest główka, a na drugim panewka, jak np. w kościach członków palców. Kość ramieniowa i kość udo-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.13. Zakres ruchów w stawie barkowym

wa mają na obu swych końcach wypukłe powierzchnie stawowe, a obie kości przedramienia i goleni na obu końcach powierzchnie stawowe wklęsłe.

Zakres ruchu zależy od typu stawu. W narządzie ruchu człowieka znajdują się stawy jednoosiowe (np. międzypaliczkowe w palcach rąk i stóp), dwuosiowe (np. staw nadgarstka) i wieloosiowe (np. staw barkowy lub biodrowy). Odpowiedni kształt główki i panewki stawowej umożliwia wykonywanie ruchów w jednej, dwu lub wielu płaszczyznach. I tak staw jednoosiowy ma główkę o kształcie bloczka, a panewka jest jakby negatywem główki. Staw dwuosiowy ma główkę o kształcie eliptycznym i odpowiednio „wyżłobioną" panewkę. W stawach wieloosiowych główka ma kształt kulisty i porusza się we wklęsłej, miseczkowatej panewce.

2.3. Podział układu szkieletowego

W układzie szkieletowym, z opisowego punktu widzenia, wyróżnia się:

1. szkielet osiowy (obejmujący kręgosłup i klatkę piersiową);
2. czaszkę;
3. kościec kończyny górnej;

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

4. kościec kończyny dolnej.

Wymienione wyżej elementy układu szkieletowego będą szczegółowo opisane dalej.

2.4. Kręgosłup

Kręgosłup stanowi ruchomą oś tułowia, rozciągającą się od podstawy czaszki do dolnego końca tułowia i biegnącą w płaszczyźnie pośrodkowej po stronie grzbietowej ciała. Składa się z 33–34 nieparzystych, symetrycznie zbudowanych kręgów, poukładanych jeden nad drugim. Dzielimy je na:

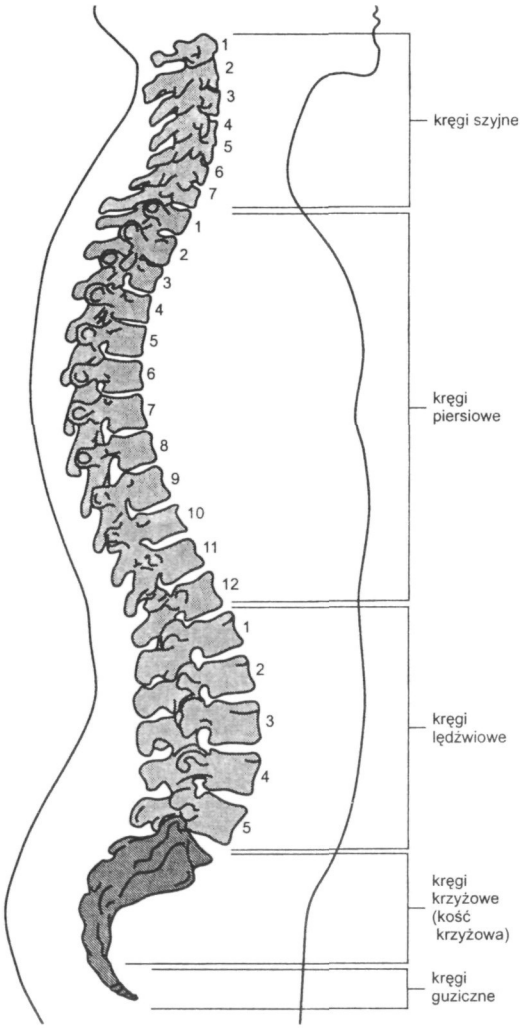
1. *kręgi szyjne (karkowe)* – 7 (C1–C7),
2. *kręgi piersiowe (grzbietowe)* – 12 (Th1–Th12),
3. *kręgi lędźwiowe* – 5 (L1–L5),
4. *kręgi krzyżowe* – 5,
5. *kręgi ogonowe (guziczne)* – 4, 5.

Kręgi szyjne, piersiowe i lędźwiowe tworzą ruchomą, przedkrzyżową część kręgosłupa. Kręgi te nazywane są *prawdziwymi*, *ruchomymi* lub *wolnymi*. Kręgi krzyżowe i ogonowe zrastają się i tworzą odpowiednio kość krzyżową i kość guziczną. Kręgi te nazywane są *rzekomymi*. Zgodnie z zasadami mechaniki, niżej położone części kręgosłupa poddane są większym obciążeniom niż części górne i dlatego są masywniejsze. Stąd też kręgi piersiowe są większe i silniej zbudowane niż szyjne, zaś mniejsze i delikatniejsze od lędźwiowych; kręgi krzyżowe z uwagi na to, że są zrośnięte w jedną kość krzyżową, doskonale spełniają zadanie dźwigania ciężaru tułowia. Wyjątkiem od powyższej zasady jest część ogonowa kręgosłupa, która u człowieka znajduje się w stanie szczątkowym i mimo tego że jest położona najniżej, zbudowana jest z kręgów znacznie mniejszych od pozostałych.

2.4.1. Budowa kręgu

U noworodka poszczególne kręgi są do siebie bardzo podobne. Dopiero u człowieka dorosłego zróżnicowanie poszczególnych kręgów staje się wyraźne, co jest m.in. konsekwencją pionowej postawy ciała i odpowiednich zasad mechaniki z tym związanych. Chociaż kręgi należące do różnych odcinków kręgosłupa

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

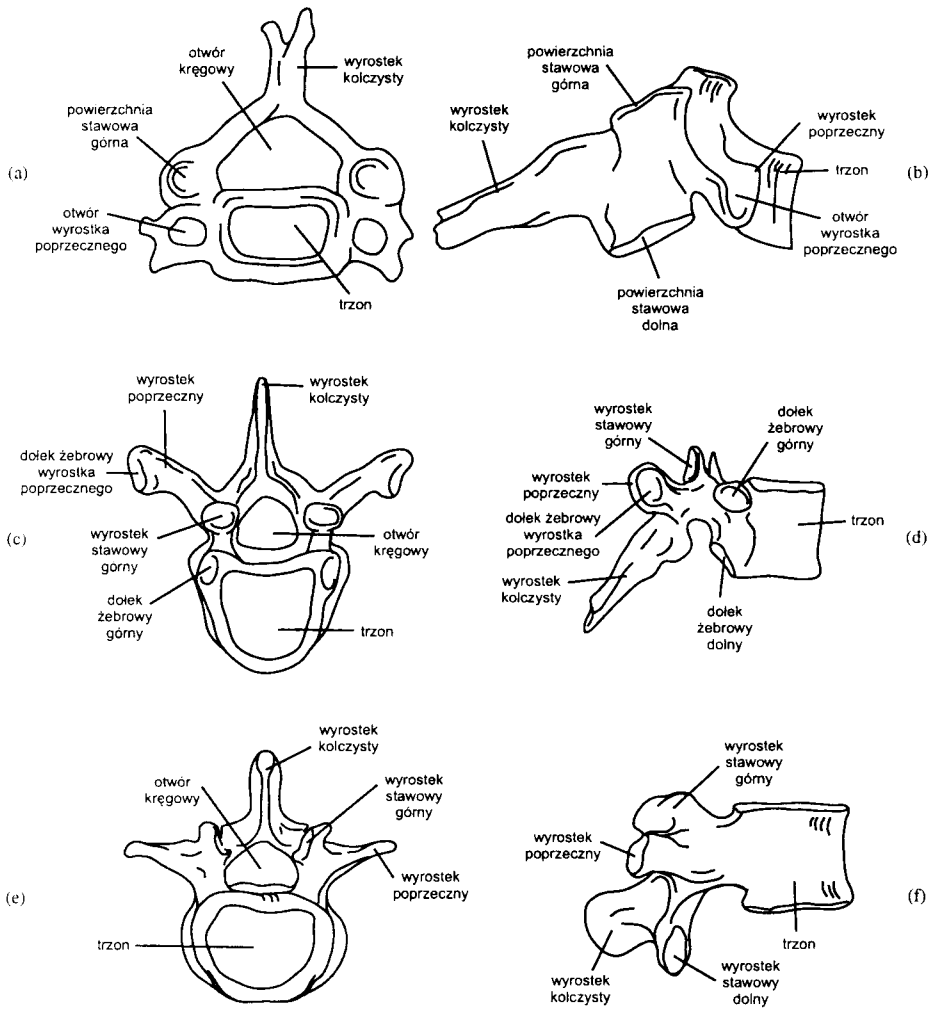


Rys. 2.14. Kręgosłup

człowieka dorosłego różnią się między sobą, to jednak łatwo można wskazać wspólne elementy ich budowy. Są nimi:

- część przednia, masywniejsza, tzw. *trzon kręgu*,
- część tylna, cieńsza, zwana *łukiem kręgu*.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.15. Kręgi a) szyjny – widok z góry, b) szyjny – widok z boku, c) piersiowy – widok z góry, d) piersiowy – widok z boku, e) lędźwiowy – widok z góry, f) lędźwiowy – widok z boku

Trzon kręgu ma kształt niskiego walca zbudowanego z tkanki gąbczastej pokrytej cienką warstwą istoty zbitej. W istocie gąbczastej, wypełnionej czerwonym szpikiem, znajdują się poziomo i promieniście ułożone kanały dla żył trzonów kręgów. Blaszki kostne istoty gąbczastej przebiegają prostopadle do górnej i dolnej powierzchni trzonu, odpowiednio do kierunku największego obciążenia kości. Powierzchnie trzonu (górna i dolna) są porowate, ograniczone bardziej

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

gładką, nieco wystającą *listewką przybrzeżną* kilkumilimetrowej szerokości. Powierzchnie te zrastają się z przylegającą do nich chrząstką międzykręgową.

Od łuku każdego kręgu (poza szczytowym) odchodzi 7 wyrostków: nieparzysty, skierowany ku tyłowi wyrostek *kolczysty*, parzyste wyrostki stawowe *górne* i *dolne* oraz również parzyste wyrostki *poprzeczne*.

Zasadniczym zadaniem trzonów kręgów jest dźwiganie ciężaru ciała. Łuki otaczają i chronią rdzeń kręgowy, wyrostki poprzeczne i wyrostek kolczysty stanowią miejsca przyczepu mięśni, a wyrostki stawowe służą stawowemu połączeniu kręgów między sobą.

Obie zasadnicze części kręgu, tzn. trzon i łuk, otaczają *otwór kręgowy*. Otwory wszystkich kręgów tworzą *kanał kręgowy*, w którym przebiega rdzeń kręgowy.

Dwa spośród kręgów prawdziwych wyróżniają się odmienną od pozostałych budową: pierwszy kręg szyjny, tzw. *szczytowy* albo *dźwigacz* (łac. nazwa *atlas*), w którym brak jest trzonu i właściwego wyrostka kolczystego oraz drugi kręg szyjny, *obrotnik*, którego trzon jest wyraźnie przedłużony ku górze i tworzy tzw. ząb kręgu obrotowego. Taka budowa pierwszej pary kręgów szyjnych umożliwia swobodny obrót głowy, jak również jej zgięcie do tyłu.

2.4.2. Połączenia kręgów przedkrzyżowych

Połączenia kręgów należą albo do *połączeń ścisłych*, albo do *połączeń ruchomych*. Do połączeń ścisłych zaliczamy *chrząstkozrosty*, łączące ze sobą trzony kręgów oraz *więzozrosty*, łączące ze sobą trzony, łuki, wyrostki poprzeczne i kolczyste; do połączeń ruchomych zaliczamy *połączenia stawowe* między wyrostkami stawowymi kręgów.

2.4.3. Połączenia trzonów kręgów

2.4.3.1. Chrząstki międzykręgowe

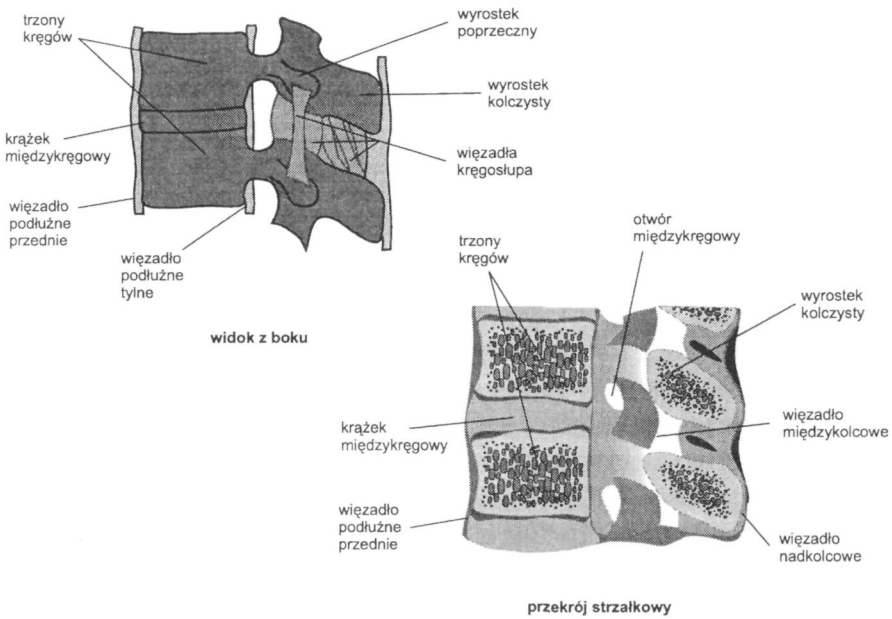
Są to płaskie płytki chrząstki włóknistej leżące między zwróconymi ku sobie powierzchniami trzonów kręgów, ściśle złączone z nimi za pomocą cienkiej warstwy chrząstki szklistej. Mają one kształt sąsiadujących powierzchni trzonów kręgów, jednak są od nich nieco większe, tak że na brzegach wystają nieco nad trzonami. Wysokość chrząstek wzrasta na ogół od góry ku dołowi (od 4 do 12 mm) wraz z przyrostem wysokości trzonów; w części szyjnej są więc one najniższe, a w części lędźwiowej – najwyższe. Łączna wysokość wszystkich chrząstek międzykręgowych stanowi ok. 1/4 długości kręgosłupa. Chrząstki międzykręgowe w liczbie 23 łączą ze sobą kręgi prawdziwe; pierwsza znajduje się między

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

drugim a trzecim kręgiem szyjnym (między pierwszym a drugim chrząstka nie występuje z uwagi na specyficzną budowę tej pary kręgów), ostatnia między piątym kręgiem lędźwiowym a kością krzyżową.

2.4.3.2. Zadania chrząstki międzykręgowej

Dzięki swej sprężystości chrząstka znacznie zmniejsza wszelkie wstrząsy kręgosłupa. Poza tym obie części składowe chrząstki mają odrębne znaczenie. *Pierścień włóknisty* dzięki swej budowie i silnemu połączeniu z górną i dolną powierzchnią trzonów jest czynnikiem silnie hamującym ruchy kręgów; *jądro miażdżyste* natomiast, będąc bardziej ruchomą częścią chrząstki stanowi pewnego rodzaju kulistą poduszkę wodną, na której w równowadze chwiejnej spoczywa trzon wyżej leżącego kręgu. Podczas ruchów zgięcia kręgosłupa w jedną stronę jądro przesuwa się w stronę przeciwną.



Rys. 2.16. Połączenia kręgów – chrząstki międzykręgowe i więzadła

Oprócz chrząstek międzykręgowych do elementów połączeń ścisłych łączących poszczególne kręgi należą: *więzadło podłużne przednie* (biegnące na przed-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

niej powierzchni trzonów kręgów) i *więzadło podłużne tylne* (leżące na tylnej powierzchni trzonów kręgów wewnątrz kanału kręgowego).

2.4.4. Ogólna charakterystyka kręgosłupa

2.4.4.1. Wymiary kręgosłupa

Długość kręgosłupa mierzona wzdłuż krzywizn wynosi u dorosłego mężczyzny ok. 45% długości ciała. Na długość tę składają się mniej więcej w 3/4 wysokości trzonów, a w 1/4 wysokości chrząstek międzykręgowych. U kobiet długość kręgosłupa jest ok. 8-10 cm mniejsza niż u mężczyzn. Tzw. wysokość kręgosłupa mierzona w linii prostej wynosi przeciętnie ok. 40% długości ciała. Największą długość osiąga kręgosłup między 20 a 30 rokiem życia. W wieku starczym zmniejszenie długości dochodzić może do 5-7 cm (i więcej) z powodu zwiększenia się krzywizn i spłaszczenia chrząstek międzykręgowych. W pozycji stojącej kręgosłup jest ok. 1,5-3,0 cm krótszy niż w leżącej. Również w ciągu dnia zachodzą różnice w długości: kręgosłup mierzony rano jest ok. 1,5 cm dłuższy niż wieczorem. Po wypoczynku nocnym wysokość chrząstek wraca do stanu pierwotnego. W ciągu dnia pod wpływem ciężaru ciała ulegają spłaszczeniu nie tylko chrząstki międzykręgowe, ale również chrząstki stawowe kończyn. Obniża się też sklepienie stopy, powiększają się również krzywizny kręgosłupa.

2.4.4.2. Kanał kręgowy

Dostosowuje się do krzywizn kręgosłupa. Światło kanału jest największe w części szyjnej i lędźwiowej, a więc tam, gdzie wielkie nerwy kończyn odchodzą lub dochodzą do rdzenia i gdzie ruchomość kręgosłupa jest największa – ma ono tutaj kształt trójkątny. W części piersiowej przekrój kanału ma kształt okrągły lub sercowaty i jest znacznie węższy. Kanał krzyżowy ma kształt sierpowaty. Obszerne światło kanału kręgowego jest czynnikiem bardzo istotnym w ochronie rdzenia. Dzięki temu, mimo wybitnej ruchomości kręgosłupa, nie dochodzi do zmiażdżenia ani ucisku rdzenia.

2.4.4.3. Krzywizny kręgosłupa

U noworodka kręgosłup jest wypukły ku tyłowi. Od momentu, gdy dziecko zaczyna siadać, w płaszczyźnie strzałkowej wykształcają się naturalne wygięcia zapewniające mu sprężystość i umożliwiające równoważenie środka ciężkości. Są

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

to tzw. krzywizny fizjologiczne. Część piersiowa i część krzyżowa tworzą wygięcia skierowane ku tyłowi, noszące odpowiednio nazwę *kifozy piersiowej* i *kifozy krzyżowej*. Odcinki szyjny i lędźwiowy wyginają się do przodu, a utworzone w ten sposób wypukłości noszą nazwę *lordozy szyjnej* i *lordozy lędźwiowej*. Części wypukłe do przodu wykazują większą ruchomość, części wypukłe do tyłu są bardziej sztywne. Najsilniejsza (o najmniejszym promieniu) jest krzywizna kości krzyżowej. W dalszej kolejności należy wyminić krzywizny: lędźwiową, szyjną oraz piersiową. Trzy górne krzywizny kręgosłupa znajdują się we wzajemnie „kompensacyjnym" stosunku do siebie. Oznacza to, że np. przy wzroście krzywizny piersiowej zwiększają się również krzywizny szyi i lędźwi, co pozwala na zachowanie równowagi ciała. Jedynie krzywizna krzyżowa jest zupełnie niezależna. Krzywizny są wybitnie zmienne osobniczo, a również u tego samego osobnika zależą od pozycji ciała (stojąca, leżąca, siedząca), od obciążenia i od postawy.

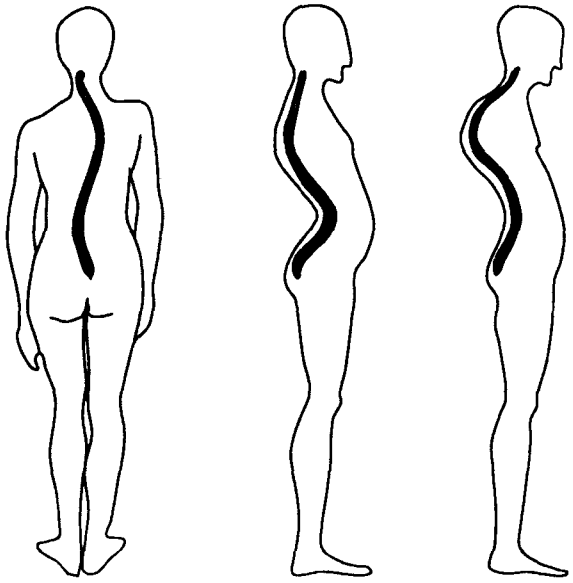
Często zdarza się, że naturalne krzywizny kręgosłupa są nadmiernie pogłębione na skutek zmian wrodzonych, nieprawidłowej postawy, słabych mięśni brzucha lub chorób kości (krzywicy, gruźlicy). Mówi się wówczas o patologicznej *kifozie* i *lordozie*. Jednak najczęściej spotykanym patologicznym odkształceniem kręgosłupa jest jego prawo- lub lewostronne skrzywienie w płaszczyźnie bocznej, tzw. *skolioza* (rys. 2.17).

2.4.4.4. Czynności kręgosłupa

Kręgosłup spełnia trzy główne zadania. Służy on jako narząd ochronny rdzenia, jako narząd podpory ciała i wreszcie jako narząd ruchu. To ostatnie zadanie przeciwstawia się pozornie obu pierwszym, a jednak naturze udało się tak zbudować kręgosłup, że nie tracąc na wytrzymałości i masywności ma on duży stopień ruchomości [5].

1. **Kręgosłup jako narząd ochronny rdzenia.** Ukryte i głębokie położenie rdzenia w ustroju stwarza dobre warunki ochronne. Są one jednak niewspółmiernie zwiększone poprzez usytuowanie rdzenia w kanale kręgowym. Od przodu chronią go trzony kręgów, a od tyłu – łuki i wyrostki kolczyste, po części dachówkowato zachodzące na siebie, bocznie wyrostki poprzeczne, i na koniec mocne więzadła. Oprócz *wytrzymałości* kręgosłupa dalszym czynnikiem ochronnym jest jego sprężystość. Największą korzyść daje *sprężystość* połączeń kręgów między sobą, przede wszystkim chrząstek międzykręgowych (głównie jąder miażdżystych). Dzięki niej wszelkie wstrząsy kręgosłupa zostają całkowicie lub przynajmniej częściowo

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.17. Patologiczne skrzywienia kręgosłupa

wytłumione. Również *krzywizny kręgosłupa* stanowią ochronę ośrodkowego układu nerwowego przed wstrząsami. Gdyby kręgosłup był prostym słupem, wszelki wstrząs przenosiłby się bezpośrednio na czaszkę i mózgowie; natomiast w kręgosłupie rzeczywistym pod wpływem wstrząsu krzywizny silniej uwypuklają się i siła jego zostaje osłabiona. Dalszym wreszcie czynnikiem ochronnym rdzenia jest stosunkowo duży *przekrój kanału kręgowego.*

2. **Kręgosłup jako narząd podpory ciała.** U człowieka utrzymującego postawę pionową kręgosłup, dźwigając górną część ciała, odgrywa większą rolę niż u pozostałych kręgowców. U człowieka każda część kręgosłupa tym więcej dźwiga, im niżej jest położona i temu odpowiada stopniowo coraz bardziej wzrastająca grubość kręgów. U zwierząt z poziomo ustawionym kręgosłupem kręgi lędźwiowe są tylko nieznacznie grubsze od pozostałych.
Siła nośna kręgosłupa wynosi ok. 3500 N. Najsłabszym miejscem jest piąty kręg piersiowy. Z tego też powodu tutaj najczęściej występują boczne skrzywienia. Poza tym narażone są na niebezpieczeństwo miejsca, gdzie

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

części bardziej ruchome graniczą z bardziej sztywnymi, a więc dolny odcinek kręgosłupa szyjnego oraz przejście kręgosłupa piersiowego w lędźwiowy, tzw. „talia".

3. **Kręgosłup jako narząd ruchu.** Ruchomość poszczególnych kręgów w stosunku do siebie jest bardzo ograniczona. Ograniczenie to powoduje głównie aparat więzadłowy, a przede wszystkim chrząstki międzykręgowe łączące kręgi. Pomimo tego nieznaczne ruchy 24 kręgów prawdziwych sumując się dają w wyniku znaczną ruchomość całego kręgosłupa przedkrzyżowego, w przeciwieństwie do nieruchomej części krzyżowej. Znaczenie tej giętkości kręgosłupa poznajemy obserwując chorych ze sztywnym kręgosłupem: poruszają się oni z trudnością. Część przedkrzyżowa kręgosłupa stanowi łańcuch stawowy. Ruchomość jego końca dolnego wskutek obciążenia zmniejsza się, a moc i odporność wzrastają odwrotnie niż końca górnego. Ten ostatni wraz ze zmniejszaniem się trzonów kręgów staje się coraz bardziej ruchomy i razem ze stawami głowy umożliwia swobodne i ruchome dźwiganie jej i balansowanie. Poszczególne odcinki kręgosłupa biorą w jego ruchach bardzo nierównomierny udział. Część piersiowa jest stosunkowo najmniej ruchoma, zarówno z powodu swej budowy (np. długie i dachówkowato zachodzące na siebie wyrostki kolczyste), jak też z powodu swego udziału w budowie klatki piersiowej (żebra i mostek hamują ruchy). Największą ruchliwość ma część szyjna dzięki małym wymiarom trzonów a znacznej wysokości chrząstek międzykręgowych w stosunku do swych powierzchni. Również ruchomość części lędźwiowej jest znaczna mimo wielkich trzonów kręgowych i dużej powierzchni chrząstek, a to z powodu bardzo znacznej ich wysokości. Sprężystość chrząstek jest bowiem wprost proporcjonalna do kwadratu ich wysokości i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu ich przekroju poprzecznego.

Ruchy kręgosłupa są możliwe we wszystkich kierunkach. Wykonuje je cały kręgosłup przedkrzyżowy, jak również poszczególne jego odcinki samodzielnie. Wyróżniamy następujące ruchy główne:

1. *Ruchy zgięcia i prostowania w płaszczyźnie pośrodkowej* – zgięcia do przodu i do tyłu. Zakres tych ruchów u człowieka żywego wynosi 170°–250°.

2. *Ruchy zgięcia bocznego w płaszczyźnie czołowej* – są to ruchy asymetryczne dokoła osi strzałkowej biegnącej przez jądro miażdżyste. Zakres całkowity – ok. 110°.

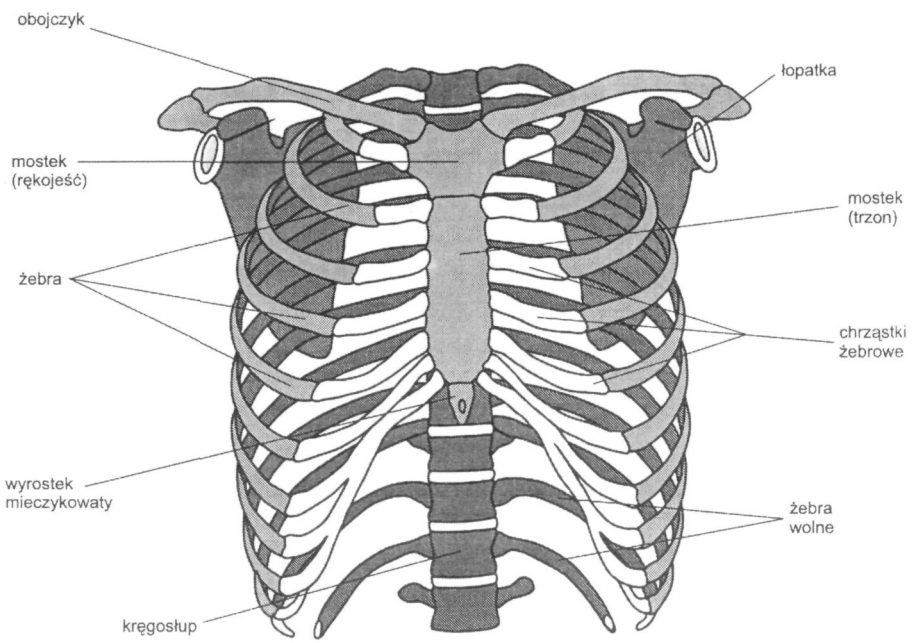
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3. *Ruchy obrotowe* – wokół osi pionowej, ok. 80° w każdą stronę.

4. *Ruchy obwodzenia* – będące kombinacją trzech wyżej wymienionych postaci ruchów.

2.5. Klatka piersiowa

Klatka piersiowa (rys. 2.18) stanowi konstrukcję ochronną narządów oddechowych i narządów krążenia. Jej kościec tworzą: od tyłu – odcinek piersiowy kręgosłupa, z boków – żebra, od przodu – mostek. Wszystkie te elementy połączone są w jedną całość o budowie kostno-chrzęstnej. Klatka piersiowa jest konstrukcją bardzo sprężystą, o dużej wytrzymałości mechanicznej (szczególnie w części przedniej). Wynika to z faktu, że obciążenie z przodu rozkłada się dzięki mostkowi na wiele pierścieni żebrowych. Obciążenia boczne działają zazwyczaj tylko na jedno lub najwyżej kilka żeber, stąd złamania części bocznych klatki piersiowej są częstsze niż części przedniej. Ściana tylna ma mocniejszą budowę, jest jednak mniej sprężysta od pozostałych części.

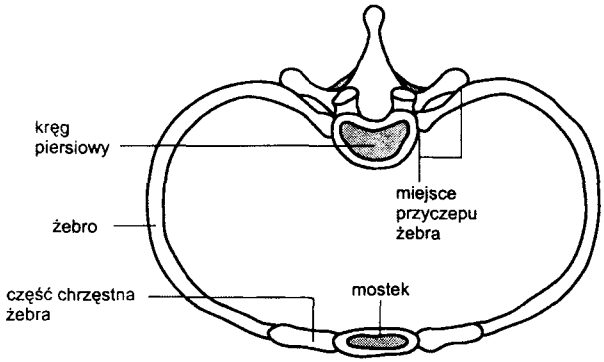


Rys. 2.18. Kościec klatki piersiowej

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

2.5.1. Żebra

Żebra, zazwyczaj w liczbie 12 par, są to elementy kostno-chrzęstne przypominające płaskie listewki. Odchodzą one obustronnie od powierzchni bocznych kręgów piersiowych przechodząc w łuki ograniczające z boków jamę klatki piersiowej. Siedem górnych par żeber łączy się z przodu z mostkiem za pomocą chrząstek żebrowych. Noszą one nazwę *żeber prawdziwych*. Pozostałe łączą się z mostkiem pośrednio, za pomocą przyczepów chrzęstnych do żeber wyższych (żebra VIII, IX i X) lub ich końce pozostają wolne (żebra XI i XII). Te noszą nazwę *żeber rzekomych*. Giętkie chrząstki żebrowe łączące część żeber z mostkiem umożliwiają ruchy oddechowe klatki piersiowej.



Rys. 2.19. Przyczepy żeber

2.5.2. Mostek

Mostek jest nieparzystą kością płaską zamykającą od przodu ścianę klatki piersiowej. Ustawiony jest skośnie: część górna skierowana jest ku tyłowi, dolna – do przodu. Składa się z trzech części, które z uwagi na podobieństwo mostka do krótkiego greckiego miecza, noszą nazwy: *rękojeść*, *trzon* i *wyrostek mieczykowaty*.

Część górna (rękojeść) o kształcie zbliżonym do czworokąta jest najszersza. Na jej bokach znajdują się wgłębienia będące miejscami połączenia z obojczykami i chrząstką I żebra.

Trzon stanowiący część środkową jest dłuższy i węższy od rękojeści. Połączenie rękojeści z trzonem nosi nazwę spojenia mostkowego. Wzdłuż bocznych

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

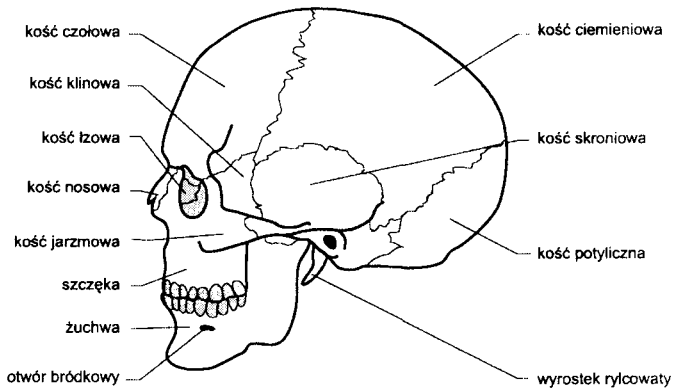
brzegów znajdują się wcięcia żebrowe służące do połączenia z chrząstkami żeber II-VII.

Wyrostek mieczykowaty stanowi najmniejszą część mostka. Charakteryzuje się on niestałym kształtem i wielkością.

2.6. Czaszka

Czaszka jest elementem kośćca o charakterze typowo statycznym. Jej głównym zadaniem jest ochrona mózgowia oraz narządów wzroku, słuchu i równowagi ciała.

Z funkcjonalnego punktu widzenia czaszka dzieli się na część mózgową, otaczającą mózgowie, i część twarzową (inaczej trzewną), służącą do przyjmowania pożywienia i powietrza.

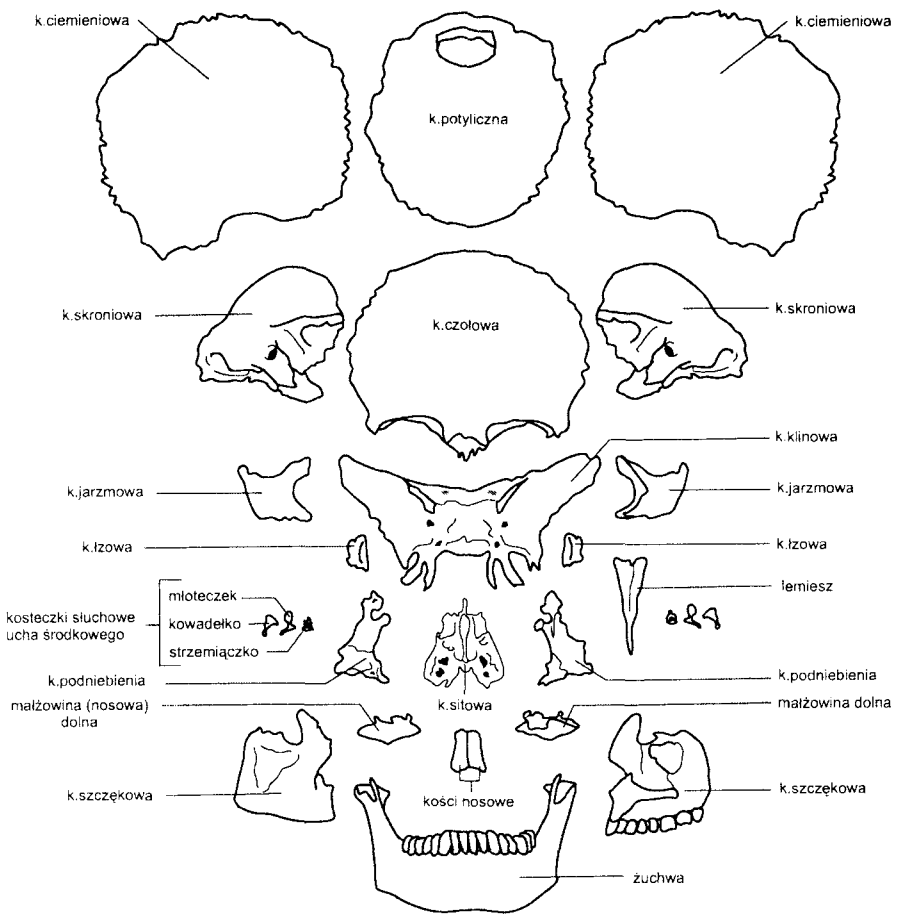


Rys. 2.20. Czaszka – widok z boku

Czaszkę tworzy 29 kości. Część mózgową tworzą następujące kości:

- kość potyliczna (nieparzysta);
- kość klinowa (nieparzysta);
- kość czołowa (nieparzysta);
- kość skroniowa (parzysta);
- kość ciemieniowa (parzysta);
- kość sitowa (nieparzysta).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.21. Kości czaszki (na podst. [25])

Kości części twarzowej (trzewnej) to:

- małżowina nosowa dolna (parzysta);
- kość nosowa (parzysta);
- lemiesz (nieparzysta);
- kość łzowa (parzysta);
- szczęka (parzysta);
- kość podniebienna (parzysta);

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- kość jarzmowa (parzysta);
- żuchwa (nieparzysta);
- kość gnykowa (nieparzysta);
- kosteczki słuchowe (parzyste): młoteczek, kowadełko i strzemiączko.

Z punktu widzenia konstrukcji czaszki jako całości możemy wyróżnić ścianę górną i dolną, przednią i tylną oraz dwie ściany boczne.

Ścianę górną (sklepienie) stanowią: płasko-wypukła część kości czołowej, tzw. łuska czołowa, dwie płasko-wypukłe czworokątne kości ciemieniowe oraz duża, nieparzysta kość potyliczna. Ścianę górną przecinają trzy szwy:
szew wieńcowy – między kością czołową i kośćmi ciemieniowymi;
szew strzałkowy – między obiema kośćmi ciemieniowymi;
szew węgłowy – biegnący między kośćmi ciemieniowymi a łuską potyliczną.

Kości tworzące sklepienie są kośćmi płaskimi. Zbudowane są one z dwóch warstw istoty zbitej, tzw. blaszki zewnętrznej i wewnętrznej, oddzielonych od siebie wypełnioną szpikiem i silnie unaczynioną warstwą gąbczastą (śródkościem).

Ściana przednia (twarz kostna) ograniczona jest od góry łuską czołową, od dołu trzonem żuchwy, natomiast z boku przez kości jarzmowe i gałęzie żuchwy.

Ściana tylna utworzona jest przez tylne części obu kości ciemieniowych, łuskę potyliczną i część sutkową kości skroniowej.

Ściana boczna w części mózgowej składa się z kości czołowej, ciemieniowej, potylicznej, skroniowej i skrzydła większego kości klinowej.

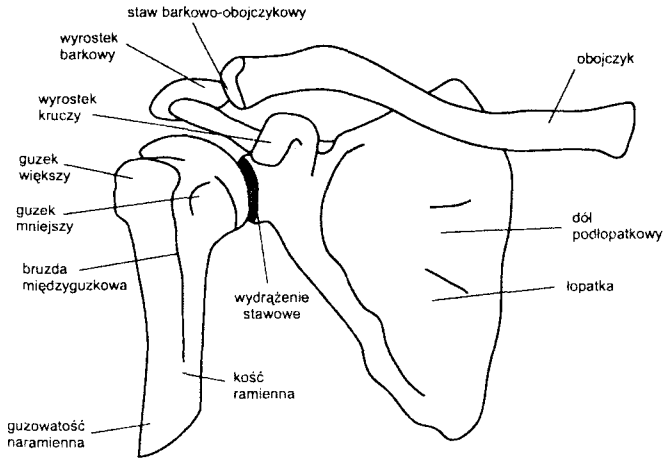
2.7. Kończyna górna

Kościec kończyny górnej tworzą podstawa łącząca ją z tułowiem, tzw. *obręcz kończyny górnej* oraz *część wolna*.

2.7.1. Obręcz kończyny górnej

Obręcz kończyny górnej (obręcz barkowa) składa się z obojczyka i łopatki (rys. 2.22). Tworzą one niekompletny, otwarty z przodu i z tyłu pierścień. Pierścień ten łączy się stawowo z resztą tułowia w jednym tylko miejscu, skąd wynika jego duża ruchomość.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.22. Obręcz barkowa

Obojczyk. Obojczyk jest kością długą, pozbawioną jednak typowej dla niej jamy szpikowej. Ma dwa wygięcia: na odcinku przyśrodkowym skierowane wypukłością do przodu, na odcinku bocznym skierowane ku tyłowi.

Łopatka. Łopatka tworzy tylną część obręczy barkowej. Jest to płaska, cienka, trójkątna kość spoczywająca na ścianie grzbietowej klatki piersiowej. Na łopatce odróżnia się dwie powierzchnie: żebrową i grzbietową, trzy brzegi: górny, przyśrodkowy i boczny oraz trzy kąty: górny, boczny i barkowy. Tylna, wypukła powierzchnia grzbietowa przecięta silnie wystającą wypukłością noszącą nazwę grzebienia łopatki, ma dwa zagłębienia: górne, mniejsze i głębsze, tzw. dół nadgrzebieniowy oraz dolne, większe i płytsze, zwane dołem podgrzebieniowym. Grzebień łopatki po stronie bocznej kończy się wystającym poza boczny kąt łopatki wyrostkiem barkowym.

2.7.2. Kończyna wolna

Kończyna wolna składa się z trzech części (rys. 2.23):

- kości ramiennej;
- kości przedramienia: promieniowej i łokciowej;
- kości ręki.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

2.7.2.1. Kość ramienna

Kość ramienna jest kością długą. Koniec bliższy ma postać głowy wchodzącej w połączenie stawowe z łopatką. Głowa oddzielona jest od reszty kości okrężnym rowkiem, tzw. *szyjką anatomiczną*, wzdłuż której przyczepia się torebka stawowa. Bocznie i poniżej szyjki anatomicznej leżą *guzek większy* i *guzek mniejszy*, stanowiące miejsce przyczepu mięśni. Poniżej guzków znajduje się *szyjka chirurgiczna*, łącząca koniec bliższy z trzonem. Trzon kości ramiennej jest w górnej części walcowaty, a w dolnej trójgraniasty. Koniec dalszy jest spłaszczony w kierunku przednio-tylnym i wygięty w kierunku dłoniowym. Tworzy go *kłykieć* kości ramiennej składający się z dwóch części, tj. przyśrodkowej (tzw. bloczka) i bocznej (główki) oraz dwa *nadkłykcie*, tj. przyśrodkowy i boczny.

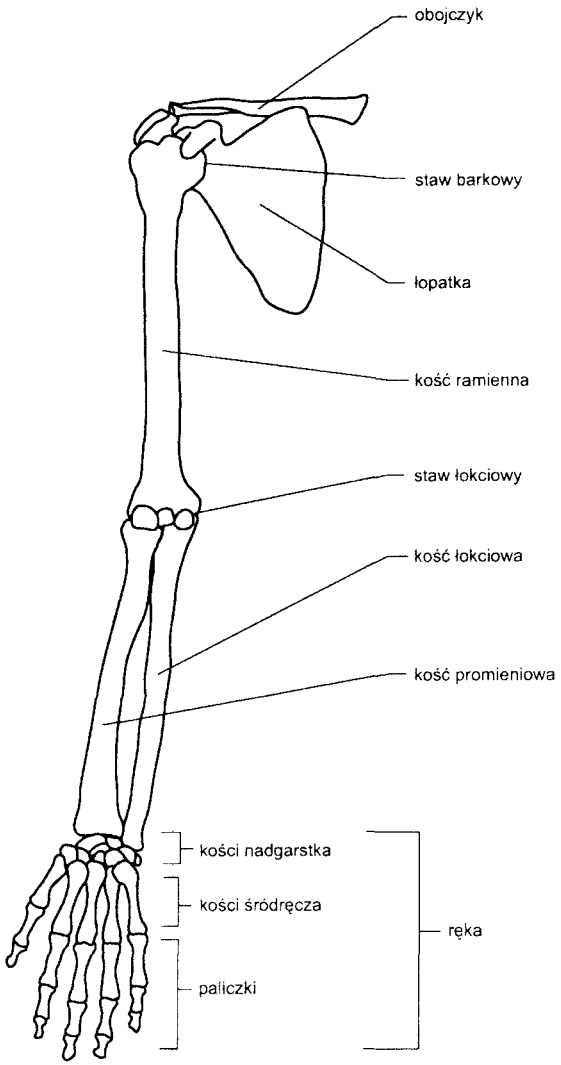
2.7.2.2. Kości przedramienia

Kości przedramienia tworzą dwie wysmukłe, łukowato od siebie odgięte, kości długie: promieniowa, leżąca po stronie kciuka i łokciowa znajdująca się po stronie palca małego. Na obu końcach kości te łączą się za pomocą stawów. Przy równoległym ułożeniu obu kości ręka powierzchnią dłoniową skierowana jest do przodu lub ku górze. Gdy kość promieniowa krzyżuje się z kością łokciową, ręka powierzchnią dłoniową skierowana jest ku dołowi lub tyłowi. Pozycje te nazywa się odpowiednio *supinacją* i *pronacją*.

Kość łokciowa. Kość łokciowa jest grubsza przy końcu bliższym, cieńsza przy końcu dalszym. Jej trzon ma kształt trójgraniasty. Koniec bliższy ma dwa wyrostki, tj. łokciowy i dziobiasty oraz dwie wklęsłe powierzchnie stawowe: wcięcie bloczkowe i wcięcie promieniowe. Koniec dalszy tworzą dwie wyniosłości: przednia, większa i zaokrąglona, stanowiąca głowę kości łokciowej oraz tylna, mniejsza, tzw. wyrostek rylcowaty.

Kość promieniowa. Kość promieniowa, w przeciwieństwie do kości łokciowej, ma koniec górny znacznie cieńszy od dolnego. Trójgraniasty trzon jest wygięty nieco w kierunku bocznym. Koniec bliższy stanowi głowa o kształcie walcowatym, oddzielona od reszty kości szyjką. Dookoła głowy znajduje się obwód stawowy do połączenia z wcięciem promieniowym kości łokciowej. Koniec dalszy, spłaszczony w kierunku dłoniowo-grzbietowym, ma zarys czworoboku obejmującego dwie powierzchnie. Pierwsza z nich, powierzchnia stawowa nadgarstkowa,

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.23. Kościec kończyny górnej

podzielona jest na dwie części: trójkątną, łączącą się z kością łódeczkowatą nadgarstka i czworokątną, łączącą się z kością księżycowatą. Druga powierzchnia stawowa dla kości łokciowej (nazywana wcięciem łokciowym) jest wąska, wklęsła i łączy się z głową kości łokciowej.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

2.7.2.3. Ręka

Ręka (rys. 2.24) składa się z nadgarstka, śródręcza i palców.

Kości nadgarstka. Kości nadgarstka ułożone są w dwóch szeregach, tj. bliższym, związanym stawowo z nasadami dalszymi kości przedramienia, i dalszym, łączącym się z podstawami kości śródręcza.
Szereg bliższy tworzą, rozpoczynając od I palca ręki:

- kość łódeczkowata;
- kość księżycowata;
- kość trójgraniasta;
- kość grochowata.

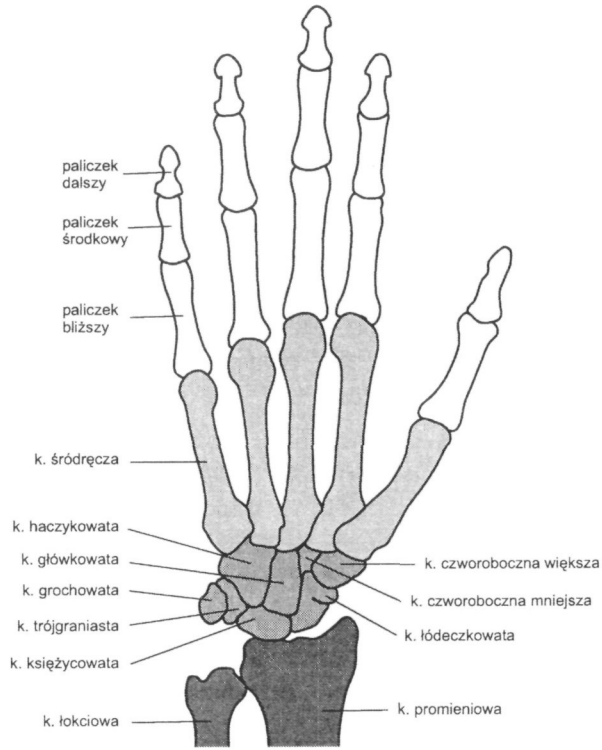
W szeregu dalszym ułożone są:

- kość czworoboczna większa;
- kość czworoboczna mniejsza;
- kość główkowata;
- kość haczykowata.

Kości śródręcza. Śródręcze składa się z pięciu kości. Wszystkie należą do typu kości długich, stąd w budowie każdej z nich można wyróżnić trzy części: trzon, koniec bliższy (podstawę) oraz koniec dalszy (głowę). Kości śródręcza oznacza się liczbami poczynając od strony promieniowej. Pierwsza kość jest krótsza i grubsza od pozostałych, natomiast druga jest najdłuższa. Długość kości zmniejsza się w kierunku kości piątej. Kości ułożone są równolegle do siebie, jedynie pierwsza z nich jest odchylona. Ułożenie takie warunkuje przeciwstawność kciuka w stosunku do pozostałych palców, a co za tym idzie chwytność ręki.

Kości palców. Kościec palców ręki tworzą paliczki. Pierwszy palec ręki, kciuk, składa się z dwóch paliczków – bliższego i dalszego, zaś pozostałe (II–V) zbudowane są z trzech paliczków: bliższego, środkowego i dalszego. Paliczki dalsze wszystkich palców ręki zakończone są *guzowatością paliczka dalszego*, stanowiącą twardą podstawę dla opuszki palca.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.24. Kości ręki

2.8. Kończyna dolna

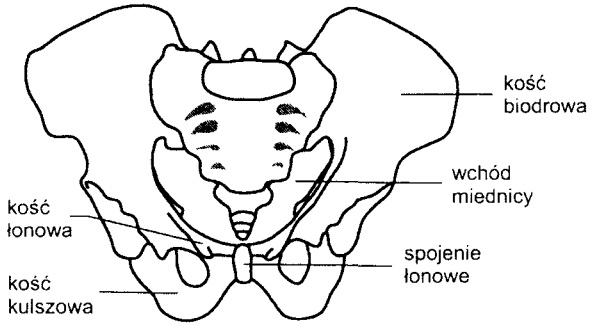
Kończyna dolna jest u człowieka narządem spełniającym zadania statyczne i lokomocyjne. Podobnie jak w kończynie górnej wyróżniamy w niej obręcz kończyny dolnej oraz wolną kończynę dolną.

2.8.1. Obręcz kończyny dolnej (obręcz miedniczna)

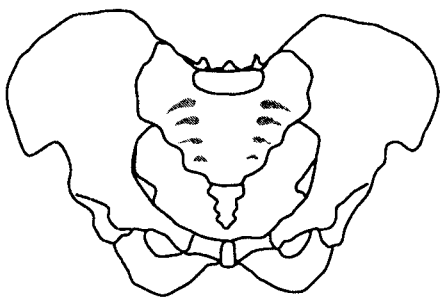
Obręcz kończyny dolnej tworzą dwie kości miedniczne, prawa i lewa. Są to najszersze kości szkieletu, spłaszczone i mające kształt nieregularny. Kość miedniczna składa się z trzech kości: biodrowej, kulszowej i łonowej (rys. 2.25). Początkowo są one niezależne, oddzielone od siebie chrząstkami. W okresie dojrzewania, ok. 14-18 roku życia, zrastają się w jedną całość. Miejscem zrośnię-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

cia się tych trzech kości jest panewka stawu biodrowego. Jej największą część (ok. 2/5) stanowi trzon kości kulszowej.



miednica męska



miednica kobieca

Rys. 2.25. Kości miednicy; różnice w budowie miednicy męskiej i kobiecej

2.8.1.1. Kość biodrowa

Kość biodrowa zbudowana jest z trzonu i silnie rozrośniętego ku górze i bokowi talerza biodrowego. Granicą między nimi od strony wewnętrznej jest tzw. *kresa łukowata*. Górny brzeg talerza biodrowego zakończony jest *grzebieniem biodrowym*. Na zewnętrznej, pośladkowej powierzchni talerza biodrowego występują trzy kresy pośladkowe – przednia, tylna i dolna. Kresy te ograniczają pola przyczepów mięśni pośladkowych. Wewnętrzna powierzchnia talerza biodrowego tworzy dół biodrowy. Z tyłu dołu biodrowego, pod grzebieniem biodrowym,

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

znajduje się powierzchnia uchowata, służąca do stawowego połączenia kości biodrowej i krzyżowej.

2.8.1.2. Kość kulszowa

Kość kulszowa składająca się z trzonu i gałęzi stanowi tylny i dolny odcinek kości miednicznej. Od trzonu odchodzi ku tyłowi kolec kulszowy oddzielający większe i mniejsze wcięcie kulszowe. Przejście od trzonu do gałęzi zaznacza się zgrubieniem zwanym *guzem kulszowym*.

2.8.1.3. Kość łonowa

Kość łonowa składa się z trzonu oraz dwóch gałęzi: górnej i dolnej. Gałąź górna na tylnym brzegu tworzy grzebień kości łonowej, będący przedłużeniem kresy łukowatej. Gałąź dolna po stronie przyśrodkowej ma powierzchnię, która łącząc się z podobną powierzchnią drugiej kości tworzy *spojenie łonowe*. Gałęzie kości łonowej i kulszowej otaczają otwór zwany *otworem zasłoniowym*. Błona zamykająca ten otwór stanowi więzozrost wzmacniający kość miedniczną.

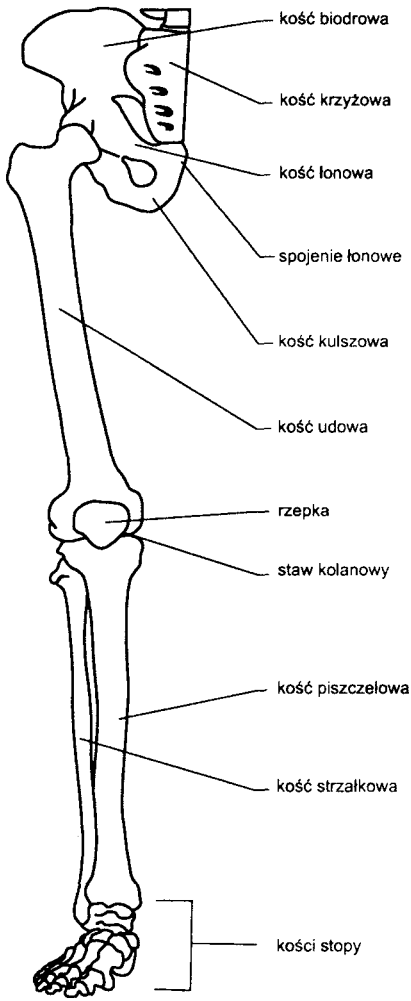
2.8.1.4. Miednica jako całość

Miednica jest pierścieniem kostnym utworzonym przez dwie kości miedniczne, kość krzyżową i kość guziczną. Górna część miednicy nosi nazwę *miednicy większej*, dolna - *miednicy mniejszej*. Oddziela je tzw. *kresa graniczna*, biegnąca wzdłuż grzebienia kości łonowej, kresy łukowatej, przechodząca na kość krzyżową i kończąca się na wzgórku. W miednicy większej wyróżnia się trzy ściany, a mianowicie: tylną (odcinek lędźwiowy kręgosłupa) i dwie boczne (talerze kości biodrowych). Miednica mniejsza składa się z czterech ścian, tylnej (kość krzyżowa i guziczna), dwóch bocznych (kości kulszowe i część kości biodrowych) oraz przedniej (kości łonowe i spojenie łonowe).

2.8.2. Wolna kończyna dolna

Kościec wolnej kończyny dolnej (rys. 2.26) składa się z kości udowej, kości goleni (podudzia) i kości stopy.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.26. Kościec kończyny dolnej

2.8.2.1. Kość udowa

Kość udowa (najdłuższa kość szkieletu) składa się z trzonu i dwóch końców: bliższego i dalszego. Trzon ma kształt trójgraniasty i jest lekko wypukły do przodu. Ma trzy powierzchnie, tj. dwie boczne i przednią. Koniec bliższy (górny) tworzą głowa (obejmująca ok. 3/4 powierzchni kuli) szyjka i dwie wypukłości: *krętarz większy* i *krętarz mniejszy*. Koniec dalszy (dolny) stanowią dwa kłyk-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

cie – przyśrodkowy i boczny, których powierzchnie stawowe łączą się z kością piszczelową. *Rzepka* jest spłaszczoną kością trójkątną o zaokrąglonych brzegach, leżącą w ścięgnie mięśnia czworogłowego uda. Kość ta chroni staw kolanowy od przodu. Jej powierzchnia przednia jest wypukła i chropowata, tylna zaś wklęsła. Kościec goleni (podudzia) tworzą: większa i mocniejsza kość piszczelowa oraz delikatniejsza kość strzałkowa.

2.8.2.2. Kości podudzia

Kość piszczelowa. Piszczel leży po stronie przyśrodkowej i jako typowa kość długa składa się z trzonu i dwóch końców. Trzon ma trzy brzegi (przedni, przyśrodkowy i boczny) oraz trzy powierzchnie (przyśrodkową, boczną i tylną). Koniec bliższy tworzą dwa kłykcie, przyśrodkowy i boczny, na których znajdują się dwie wklęsłe powierzchnie stawowe górne pokryte chrząstką szklistą. Na koniec dalszy składają się kostka przyśrodkowa oraz powierzchnia stawowa dolna, wchodząca w skład stawu skokowego.

Kość strzałkowa. Kość ta, zwana również strzałką, położona jest po stronie bocznej goleni. U góry, łącząc się z kością piszczelową, nie bierze ona udziału w tworzeniu stawu kolanowego, u dołu częściowo łączy się z piszczelą i tworzy boczną część stawu skokowego. Jej trzon ma przekrój trójkątny, koniec bliższy tworzy głowa, koniec dalszy (kostka boczna) po stronie przyśrodkowej ma powierzchnię stawową dla kości skokowej.

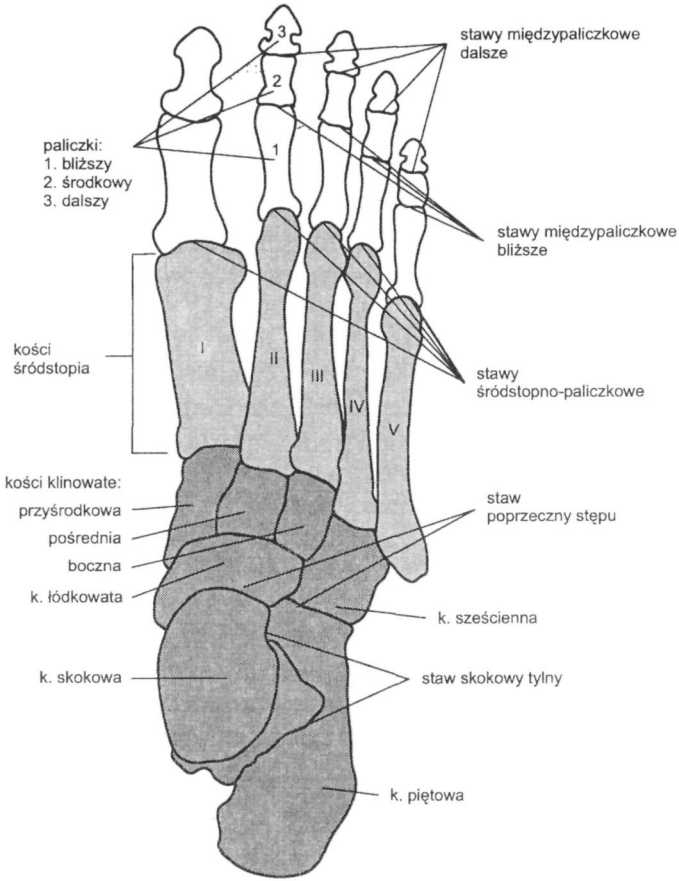
2.8.2.3. Stopa

Stopa (rys. 2.27) dzieli się na kości stępu, śródstopia i palców.

Kości stępu. W skład *stępu* wchodzi 7 kości: kość skokowa, kość piętowa, kość łódkowata, trzy kości klinowate: przyśrodkowa, poprzeczna i boczna oraz kość sześcienna.

Kości śródstopia. Śródstopie tworzy 5 kości ustawionych niemal równolegle do siebie. Przestrzenie międzykostne wypełnione są mięśniami. Każda z kości zbudowana jest z podstawy skierowanej ku kościom stępu, trzonu i łączącej się z paliczkiem bliższym głowy.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 2.27. Kości stopy

Kości palców. Wśród kości palców stopy największy palec, paluch, jest odstawny i podobnie jak kciuk składa się z dwóch paliczków, bliższego i dalszego. Pozostałe palce, nie mające swojej odrębnej nazwy, mają dodatkowo paliczek środkowy. Każdy z paliczków zbudowany jest z podstawy, trzonu i głowy.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rozdział 3

Układ mięśniowy

Ponad 40% masy człowieka stanowią mięśnie, za pośrednictwem których wykonywane są wszystkie nasze czynności fizyczne. Mięsień jest maszyną biochemiczną pracującą w stałej temperaturze. Nawet izolowany, utrzymywany sztucznie poza organizmem, może podnieść ciężar o masie 2000 razy większej od jego masy własnej. Mięsień dwugłowy ramienia (*biceps brachii*) u dobrze zbudowanego mężczyzny ma masę ok. 300 g. Podczas pojedynczego skurczu wykonuje on pracę odpowiadającą podniesieniu masy 1 kg na wysokość 90 m. W tym czasie jego temperatura podnosi się o blisko 0.003°C. Przy każdym skurczu część energii chemicznej zostaje zamieniona na ciepło i rozproszona. Należy podkreślić, że energia skurczu przewyższa ponad 1000 razy energię pobudzenia mięśnia. Na ogół mięśnie pracują w niekorzystnych warunkach mechanicznych, przy przełożeniach dźwigni kostnych nawet w stosunku 10 : 1. Chociaż przełożenia takie nie są korzystne z punktu widzenia sprawności mechanicznej, to umożliwiają uzyskanie w stawach dużych prędkości kątowych, często niezbędnych w lokomocji czy ruchach manipulacyjnych. Pomimo tych niekorzystnych uwarunkowań można przez okres kilku sekund utrzymać w dwóch rękach, przy poziomej pozycji przedramienia, przedmiot o ciężarze 900 N. Siła rozwijana przez mięśnie musi być w tym położeniu 10 razy większa, czyli wynosić 9000 N. Podnoszona masa jest prawie 2000 razy większa od masy pracujących mięśni.

Największy mięsień człowieka – mięsień pośladkowy wielki (*gluteus maximus*) może wytworzyć siłę ok. 12 000 N. Sprawność mechaniczna tej znakomitej maszyny wynosi 25% lub nawet więcej przy zachowaniu odpowiednich warunków. Mięsień osiąga więc sprawność silnika spalinowego. Siła rozwijana przez pojedyncze włókno mięśniowe, przy stosunku jego średnicy do długości jak 1 : 5000, wynosi 1–3 N, a naprężenie mięśnia wynosi 70–100 N na 1 cm^2 jego

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

przekroju poprzecznego. Masa 1 kg mięśnia może w ciągu 8 godzin rozwinąć moc ok. 15 W.

Człowiek może zaangażować jednocześnie 1/7 swoich mięśni. Gdyby wszystkie te mięśnie miały ten sam punkt przyczepu, mogłyby działać z siłą równą 25 000 N. Niezależnie od wymienionych zalet mięsień szkieletowy ma również swoje wady. Jego skurcz jest bardzo gwałtowny, co powoduje konieczność amortyzacji całego ruchu. Dlatego w mięśniu szkieletowym występują podatne elementy – są to przede wszystkim włókna łącznotkankowe tworzące ścięgna mięśni. Rolę amortyzatorów pełnią również chrząstki stawowe. Mięsień szkieletowy, w odróżnieniu od gładkiego, musi po skurczu odpocząć. Uwzględnia to układ nerwowy, pobudzając włókna mięśniowe nie równocześnie, lecz po kolei – część z nich pracuje, inne odpoczywają. Równoczesne pobudzenie prawie wszystkich włókien danego mięśnia w ruchach pojedynczych u kręgowców występuje niezmiernie rzadko, np. podczas gwałtownego skoku. Narządy wewnętrzne, takie jak serce, wątroba, żołądek lub jelita wypełnione płynami mają masy rzędu 1 kg (wątroba ma masę rzędu 2 kg). Przyspieszenie ciała np. podczas skoku wzwyż wynosi 2–3 g, co wywołuje pojawienie się dużych sił bezwładności działających na te narządy. Siły bezwładności są równoważone przez zwiększone ciśnienie w jamach ciała.

3.1. Klasyfikacja mięśni

Układ mięśniowy człowieka składa się z około 640 mięśni[1]. W zależności od przyjętego kryterium można je podzielić na różne rodzaje. Ze względu na położenie w ciele człowieka wyróżnia się następujące mięśnie:

- *powierzchowne* (*skórne*), położone bezpośrednio pod skórą i przyczepione do niej jednym lub dwoma końcami; u człowieka znajdują się one w stanie szczątkowym i występują na głowie, twarzy, szyi oraz powierzchni dłoniowej ręki;
- *głębokie*, położone pod powięzią powierzchowną, w większości przyczepione do szkieletu.

Ze względu na kształt wyróżnia się mięśnie:

- *długie* (występują głównie w kończynach);

[1]Liczba mięśni nie jest ściśle określona. Wynika to z trudności oceny, czy dany fragment stanowi oddzielny mięsień, czy też jest tylko wiązką większego mięśnia.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- *krótkie* (znajdujemy je tam, gdzie ruchy są niewielkie i wymagają dużych sił, np. dookoła kręgosłupa);
- *szerokie* (tworzą ściany wielkich jam ciała – klatki piersiowej, brzucha i miednicy);
- *mieszane*.

Biorąc za kryterium podziału kierunek ułożenia włókien względem ścięgna i osi podłużnej mięśnia, mięśnie możemy podzielić na:

- *półpierzaste* (*jednopierzaste*);
- *pierzaste* (*dwupierzaste*);
- *wielopierzaste*;
- *obłe* (*wrzecionowate*);
- *płaskie*;
- *okrężne*;
- *inne*.

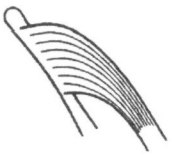
W mięśniach płaskich i wrzecionowatych włókna ułożone są równolegle do linii działania siły całego mięśnia, która zazwyczaj pokrywa się z linią łączącą ścięgno bliższe i ścięgno dalsze. W mięśniach półpierzastych włókna leżą skośnie do linii działania mięśnia, przy czym wszystkie włókna są względem siebie równoległe. W mięśniach pierzastych i wielopierzastych włókna również ułożone są skośnie do linii działania mięśnia, ale zgrupowane są w dwóch lub więcej wiązkach, z których każda skierowana jest pod innym kątem do linii działania mięśnia. Rys. 3.1 ilustruje powyższy podział.

Najistotniejszy chyba podział odnosi się jednak do budowy wewnętrznej mięśni i spełnianych przez nie funkcji. Ze względu na to kryterium możemy je podzielić na trzy rodzaje:

- *mięśnie szkieletowe* czyli *poprzecznie prążkowane*;
- *mięśnie gładkie*;
- *mięsień sercowy*.

W dalszej części tego rozdziału omówione zostaną dokładniej tylko mięśnie szkieletowe, stanowiące aktywną część układu ruchu. Opis dwóch pozostałych typów mięśni będzie miał jedynie charakter poglądowy.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Typ mięśnia	Schemat	Przykład anatomiczny
Półpierzasty (jednopierzasty)		- m. prostownik palców (*extensor digitorum*) - m. prostownik długi palucha (*extensor hallucis longus*)
Pierzasty (dwupierzasty)		- m. płaszczkowaty (*soleus*) - m. prosty uda (*rectus femoris*)
Wielopierzasty		- m. naramienny (*deltoideus*)
Obły (wrzecionowaty)		- m. krawiecki (*sartorius*) - m. smukły (*gracilis*)
Płaski		- m. prosty brzucha (*rectus abdominis*)
Okrężny		- m. okrężny oka (*orbicularis oculi*)

Rys. 3.1. Typy mięśni wg kryterium kierunku przebiegu włókien

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3.2. Mięśnie szkieletowe

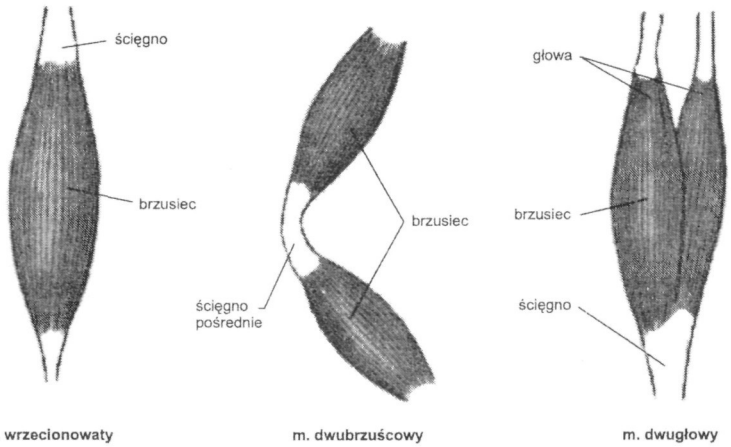
3.2.1. Budowa zewnętrzna mięśnia szkieletowego

Typowy, długi mięsień szkieletowy składa się z dwóch zasadniczych części: *brzuśca* zbudowanego z włókien poprzecznie prążkowanych oraz dwóch, znajdujących się na jego końcach, łącznotkankowych *ścięgien*, tj. bliższego (początkowego) i dalszego (końcowego). Ścięgna są ściśle przytwierdzone do kości za pośrednictwem *włókien Sharpeya*, będących przedłużeniem włókien kolagenowych (białkowych) ścięgna. Włókna Sharpeya noszą też nazwę *włókien wnikających*, ponieważ przenikają przez okostną i wtapiają się w zewnętrzne warstwy kości. Część początkową mięśnia, mniej ruchomą, mającą przyczep bliżej długiej osi ciała, nazywamy głową (łac. *caput*), natomiast jego część końcową, bardziej ruchomą, nazywamy ogonem (łac. *cauda*). Niektóre mięśnie mają kilka głów, z których każda może być zakończona ścięgnem (mówimy wówczas o mięśniu dwugłowym, trójgłowym, czworogłowym – rys. 3.2). Mięśnie takie dzielą się na tzw. *aktony*, ponieważ każda z części mięśnia wykonuje inne funkcje w stawach, ponad którymi przebiega. Tak więc pod pojęciem aktonu rozumie się tę część mięśnia, której włókna są tak usytuowane, że rozwijają siłę tylko w jednym kierunku, co jest równoważne wytworzeniu momentu siły względem jednej z osi obrotu w stawie (np. mięsień naramienny ma 3 aktony – części obojczykową, barkową i grzebieniową, mięsień dwugłowy ramienia ma 2 aktony – głowę długą i głowę krótką). W zależności od sposobu działania aktonu względem osi w stawie wyróżnia się jego następujące funkcje:

- *zginanie i prostowanie* (ruch w płaszczyźnie strzałkowej);
- *odwracanie* (*supinacja*) i *nawracanie* (*pronacja*) (ruch w płaszczyźnie poprzecznej);
- *odwodzenie i przywodzenie* (ruch w płaszczyźnie czołowej).

W stawach o trzech stopniach swobody (np. w stawie ramiennym człowieka) występują wszystkie wyżej wymienione rodzaje ruchów. Niektóre mięśnie mają poza ścięgnami początkowym i końcowym dodatkowe ścięgno pośrednie w części środkowej. Dzieli ono mięsień na dwie części (dwa brzuśce), stąd nazwa mięsień dwubrzuścowy (rys. 3.2).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.2. Przykłady mięśni o różnej liczbie brzuśców i ścięgien

3.2.2. Anatomia mięśnia szkieletowego

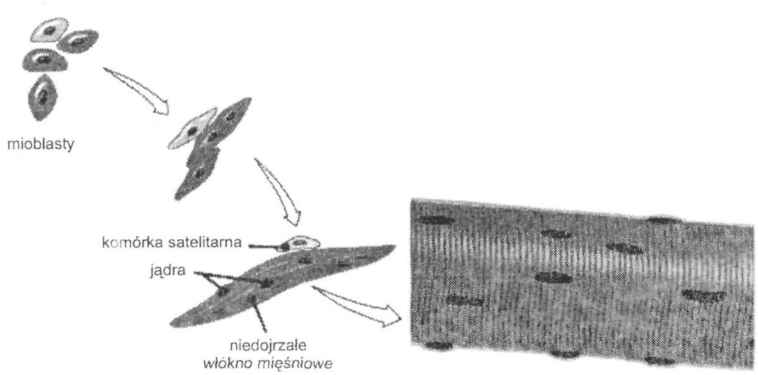
Mięśnie szkieletowe. Mięśnie szkieletowy (jest ich ok. 440) zbudowane są z tysięcy równoległych włókien mięśniowych otoczonych wspólną osłoną. Osłona ta najczęściej składa się z zewnętrznej *powięzi (fascia)* i wewnętrznej *namięsnej (epimysium)*, między którymi znajduje się cienka warstwa luźnej tkanki łącznej (*paramysium*). Warstwa ta pozwala na ślizganie się mięśnia wraz ze ściśle do niego przylegającą namięsną wewnątrz utworzonej przez powięź cewki, która nie bierze udziału w ruchach mięśnia. Mięsień z obu końców przechodzi w *ścięgna* łączące się z kośćmi szkieletu.

Mniejszą jednostką strukturalną tworzącą mięsień jest *pęczek mięśniowy (wiązka mięśniowa)*. Jest to zespół włókien mięśniowych otoczonych powłoką włóknistej tkanki łącznej, zwaną *omięsną (perimysium)*. Pęczek mięśniowy w swej budowie przypomina kabel składający się z drutów, którymi w tym przypadku są włókna mięśniowe.

Włókna mięśniowe. Włókna mięśniowe (rys. 3.3) wchodzące w skład pęczków mięśniowych są pojedynczymi, bardzo wydłużonymi komórkami. Różnią się jednak od innych „typowych" komórek dwiema istotnymi cechami. Po pierwsze, są ogromne – ich średnica może dochodzić do 100 μm, zaś długość do 30 cm. Po drugie, zawierają dużą liczbę jąder – pojedyncze włókno mięśniowe może ich mieć nawet kilkaset. W trakcie rozwoju grupy komórek embrionalnych zwanych

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

mioblastami łączą się ze sobą. Każde jądro włókna mięśniowego odzwierciedla udział przy jego tworzeniu jednego mioblastu. Nie wszystkie jednak mioblasty łączą się tworząc włókno mięśniowe. Te niewykorzystane komórki pozostają w dojrzałej tkance mięśnia szkieletowego jako tzw. *komórki satelitarne*. Po urazie, komórki satelitarne mogą się powiększać, dzielić i łączyć z uszkodzonymi włóknami mięśniowymi, uczestnicząc w procesie regeneracji tkanki mięśniowej.



Rys. 3.3. Proces tworzenia się włókna mięśnia szkieletowego

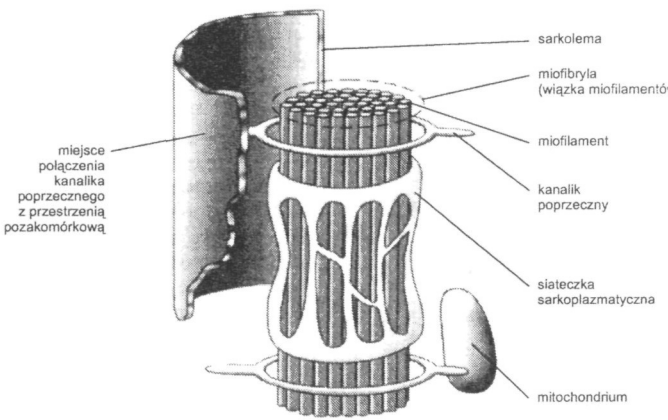
Każde włókno mięśniowe osłonięte jest cienką zewnętrzną pochewką z tkanki łącznej (*endomysium*), która spaja pojedyncze włókna ze sobą w jeden pęczek mięśniowy. Pod powierzchnią endomysium znajduje się *sarkolemma*, delikatna błonka otaczająca sarkoplazmę czyli cytoplazmę włókna mięśniowego.

W skład każdego włókna mięśniowego wchodzi od kilkuset do kilku tysięcy równolegle ułożonych włókienek mięśniowych. *Włókienko mięśniowe* (*miofibryla*) ma średnicę 1–2 μm, długość taką, jak cała komórka i otoczone jest tzw. *siateczką sarkoplazmatyczną* (*retikulum sarkoplazmatycznym*). Siateczka sarkoplazmatyczna jest to zamknięty układ błon tworzący podłużne kanaliki wokół miofibryli, które w pobliżu granicy między prążkami *A* i *I* (o których będzie mowa dalej) powiększają się i łączą ze sobą tworząc zbiorniki zwane *cysternami końcowymi*. Między sąsiadującymi ze sobą cysternami przebiegają tzw. *kanaliki poprzeczne* (*kanaliki T*, skrót od angielskiej nazwy *transverse*), które w odróżnieniu od błon siateczki sarkoplazmatycznej mają łączność z błoną otaczającą komórkę mięśniową zwaną *sarkolemmą*. Kanaliki *T* są przedłużeniem sarkolemmy wnikającym do sarkoplazmy pod kątem prostym do powierzchni komórki. Zespół złożony z pary cystern końcowych i rozdzielającego je kanalika poprzecznego nosi nazwę *triady*.

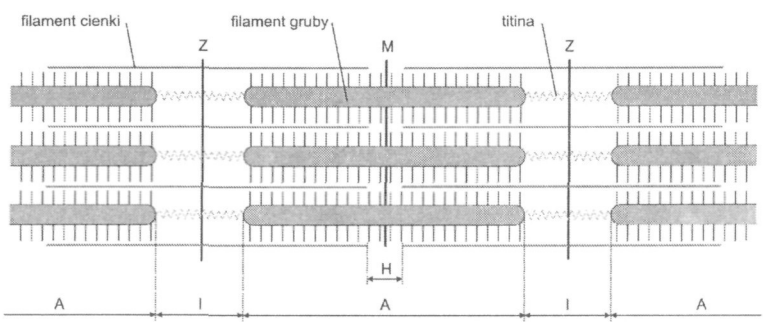
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3.2.3. Sarkomer

Miofibryle (patrz rys. 3.4) zorganizowane są w powtarzające się, ułożone szeregowo jedna za drugą, jednostki funkcjonalne zwane *sarkomerami* lub *mionami* (rys. 3.5). Długość sarkomeru może zmieniać się od 1,27 μm przy pełnym skurczu, poprzez 2,5 μm w stanie spoczynku, do ponad 4,0 μm przy pełnym wydłużeniu. Badania ultracienkich preparatów mięśniowych wykazały, że każ-



Rys. 3.4. Schemat budowy miofibryli



Rys. 3.5. Schemat budowy sarkomeru

dy sarkomer zawiera dwa typy nitek białkowych – miofilamentów: *filamenty grube* i *filamenty cienkie*. Oprócz nich występują też białka stabilizujące położenie oraz regulujące oddziaływanie między filamentami grubymi i cienkimi. W obrębie każdego sarkomeru, a więc również na całej długości miofibryli,

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

można zaobserwować ciemniejsze i jaśniejsze prążki (stąd nazwa *mięśnie poprzecznie prążkowane*). Badania w świetle spolaryzowanym ujawniły, że w skład stref ciemniejszych wchodzi substancja anizotropowa (stąd nazwa *strefy A*), powodująca dwukrotne załamanie światła, zaś strefy jaśniejsze tworzy substancja izotropowa dająca pojedyncze załamanie światła (*strefy I*).

Linia Z. Granicę sarkomeru na każdym z jego końców wyznacza tzw. *linia Z* (niem. *Zwischenscheibe*). Chociaż nazywa się ona linią (wygląda jak ciemna linia na powierzchni miofibryli), to w przekroju przypomina bardziej siatkę. Ze względu na tę przestrzenna strukturę nazywana jest też często *dyskiem Z* (inne określenia to: *telofragma*, *błonka graniczna*). Linie Z zbudowane z białka strukturalnego *α-aktyniny* są miejscem, gdzie łączą się filamenty cienkie sąsiadujących ze sobą sarkomerów.

Strefa A. Filamenty grube usytuowane są w środku sarkomeru, w strefie *A*. Długość strefy *A* równa jest długości typowego filamentu grubego. Na strefę *A*, w której częściowo znajdują się również filamenty cienkie, składają się 3 następujące podstrefy:

1. *Linia M.* Każdy filament gruby połączony jest w części środkowej ze swoim „sąsiadem" za pomocą białek tworzących tzw. *linię M*. Te ciemno zabarwione białka pomagają w stabilizowaniu położenia filamentów grubych.

2. *Strefa H* (*Hansona*). W środkowej części sarkomeru, po obu stronach linii *M*, znajduje się jaśniejszy obszar określany jako strefa *H*. Strefa *H* zawiera wyłącznie filamenty grube (nie ma w niej filamentów cienkich).

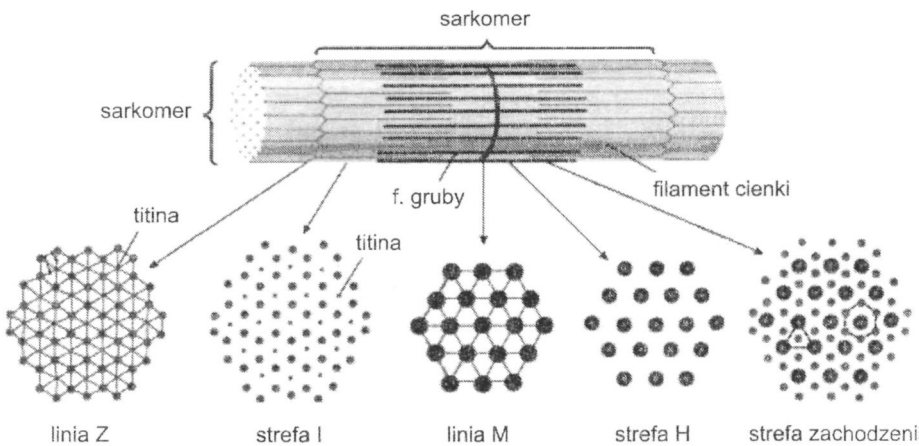
3. *Strefa „zachodzenia"* (*„zakładkowa"*). W strefie „zachodzenia" filamenty cienkie wsunięte są między filamenty grube.

Strefa I. Każda strefa *I* zawiera filamenty cienkie i nie zawiera filamentów grubych. Rozciąga się od strefy *A* jednego sarkomeru do strefy *A* następnego sarkomeru i przedzielona jest linią *Z*, stanowiącą granicę między sąsiednimi mionami. Filamenty cienkie rozchodzą się w obie strony od linii *Z*, tzn. w kierunku linii *M* sąsiadujących ze sobą sarkomerów, i wchodzą pomiędzy filamenty grube do strefy „zakładkowej". Od końców filamentów grubych do miejsc łączenia na linii *Z* rozciągają się włókna białka *titiny*. Titina pomaga w utrzymaniu właściwego

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

ułożenia filamentów grubych i cienkich, pomaga również włóknom mięśniowym opierać się nadmiernym siłom rozciągającym, które mogłyby spowodować ich zerwanie. Dwa kanaliki poprzeczne otaczają każdy sarkomer, a triady usytuowane są po obu stronach linii *M* w strefie „zakładkowej". Dzięki takiemu położeniu jony wapnia uwalniane przez cysterny końcowe siateczki sarkoplazmatycznej szybko wnikają do obszaru, gdzie filamenty grube i cienkie zachodzą na siebie.

Miofibryle mięśnia szkieletowego wykazują uporządkowanie nie tylko wzdłuż włókien, ale również w przekrojach poprzecznych (rys. 3.6). Widać na nich heksagonalny układ filamentów, tj. każdy filament gruby otoczony jest przez sześć symetrycznie rozmieszczonych filamentów cienkich, zaś każdy filament cienki otaczają trzy filamenty grube.

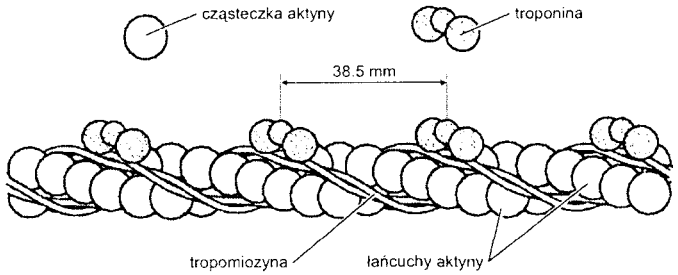


Rys. 3.6. Struktura przekrojów poprzecznych miofibryli w różnych miejscach sarkomeru

Filamenty cienkie mają średnicę 5–7 nm i długość 1–2 μm. Zbudowane są z 4 rodzajów białek, tj. podstawowego białka - aktyny *F* oraz trzech pomocniczych: nebuliny, tropomiozyny i troponiny. *Aktyna F* (aktyna filamentowa) jest jakby liną skręconą z dwóch łańcuchów. W skład każdego z tych łańcuchów wchodzi ok. 300-400 cząsteczek *aktyny G* (aktyny globularnej). Wokół aktyny *F*, w szczelinach między cząsteczkami aktyny *G*, wije się długa skrętka *nebuliny*, która spaja łańcuchy aktyny *F*. Każda molekuła aktyny *G* zawiera tzw. *centrum aktywne*. Jest to miejsce, w którym filament cienki może łączyć się z filamentem grubym. W stanie spoczynku centra aktywne zasłonięte są przez kompleks *troponina tropomiozyna*. Cząsteczka *tropomiozyny* jest podwójnie skręconym białkiem, które pokrywa 7 centrów aktywnych. Pośrodku swojej długości związana

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

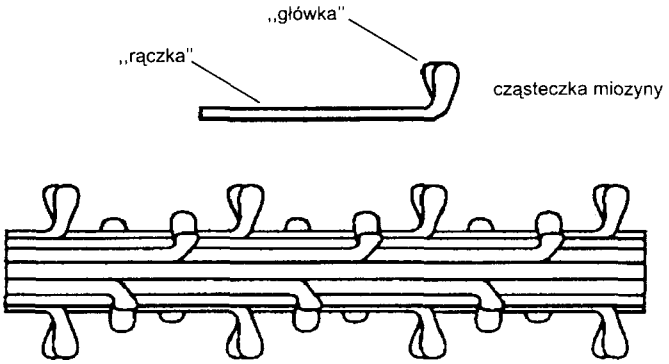
jest z cząsteczką *troponiny*. Cząsteczka troponiny składa się z trzech podjednostek. Jedna z nich, troponina *T*, wiąże się z tropomiozyną sprzęgając obie cząsteczki w związek *troponina-tropomiozyna*; druga podjednostka, troponina *I*, wiąże się z molekułą aktyny *G*, utrzymując związek troponina-tropomiozyna we właściwym miejscu; trzecia podjednostka, troponina *C*, posiada receptor, który wiąże jony wapnia. W mięśniu w stanie spoczynku stężenie jonów wapnia Ca^{2+} w przestrzeni międzykomórkowej jest bardzo niskie, stąd miejsca ich wiązania są puste. Skurcz nie może nastąpić dopóki nie zmieni się pozycja kompleksu troponina-tropomiozyna, a przez to nie zostaną odsłonięte centra aktywne na aktynie *F*. Konieczna zmiana położenia dokonuje się wówczas, gdy jony wapnia wiążą się z receptorami na cząsteczkach troponiny.



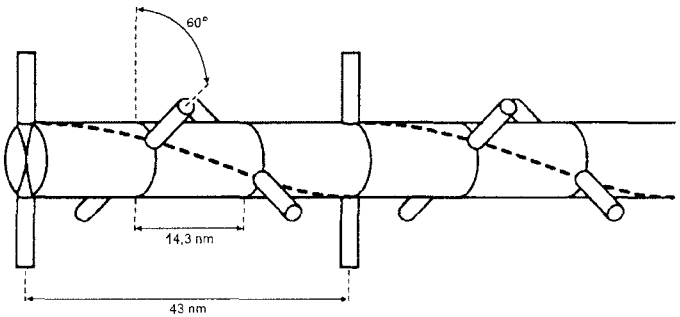
Rys. 3.7. Schematyczna ilustracja filamentu cienkiego

Filamenty grube mają średnicę 10–12 nm i długość 1,6 μm. Każdy filament gruby składa się z ok. 500 cząsteczek białka – *miozyny*. Makrocząsteczki miozyny mają charakterystyczny kształt, przypominający kij golfowy – jego „rączka" o długości ok. 100 nm i średnicy ok. 2 nm przyczepiona jest do innych cząsteczek miozyny, zaś wolna „główka", składająca się z dwóch jednostek białka globularnego, wystaje na zewnątrz, w kierunku najbliższego filamentu cienkiego. Ponieważ główki miozyny w czasie skurczu wchodzą w interakcje z filamentami cienkimi, nazywane są również *mostkami*. Mostki rozmieszczone są w odstępach ok. 45 nm, tak więc na połowę długości sarkomeru przypada ok. 20 mostków. Połączenie między główką a rączką działa jak przegub, który pozwala główce obracać się względem podstawy. Kiedy następuje obrót, główka przechyla się w jedną lub drugą stronę w stosunku do linii *M*. Obrót ten ma kluczowe znaczenie w skurczu mięśnia. Wszystkie cząsteczki miozyny zwrócone są główkami w stronę linii *M*.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.8. Schematyczna ilustracja filamentu grubego

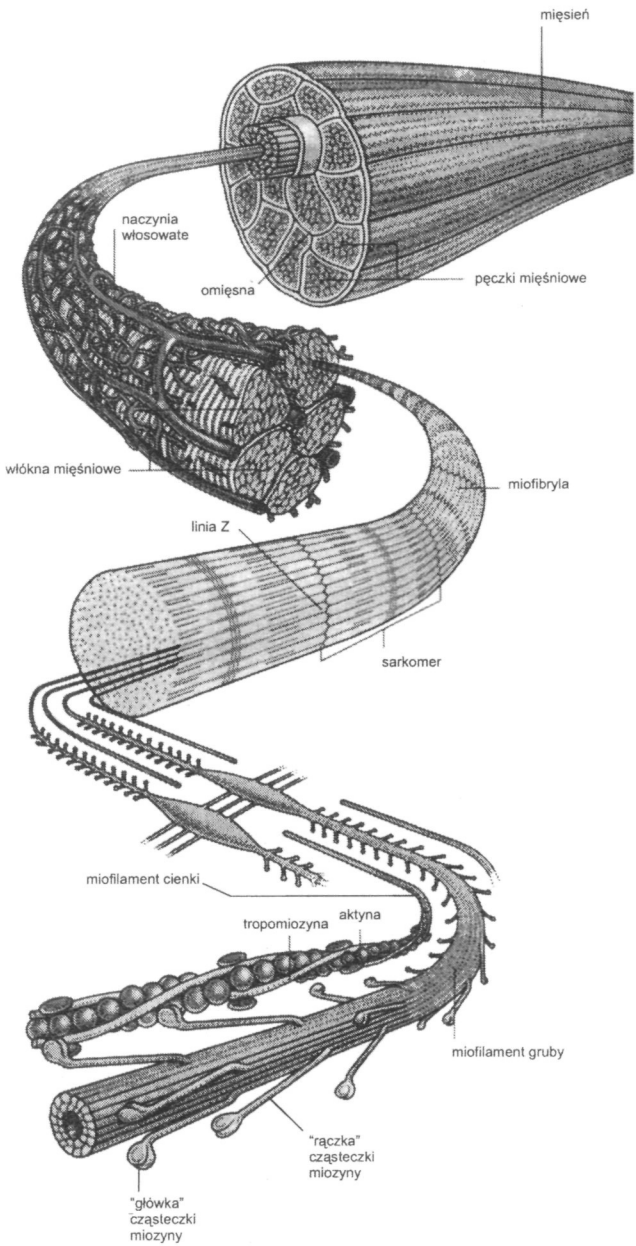


Rys. 3.9. Budowa przestrzenna filamentu grubego

Dwa sąsiednie mostki filamentu grubego oddalone są od siebie o 14,3 nm i obrócone o 60° wokół długiej osi filamentu. Ponieważ uważa się, że mostki występują w parach, w których każdy z nich obrócony jest o 180° wobec „partnera". Taki sam układ mostków powtarza się w przybliżeniu co 43 nm (3×14,3 nm, rys. 3.9).

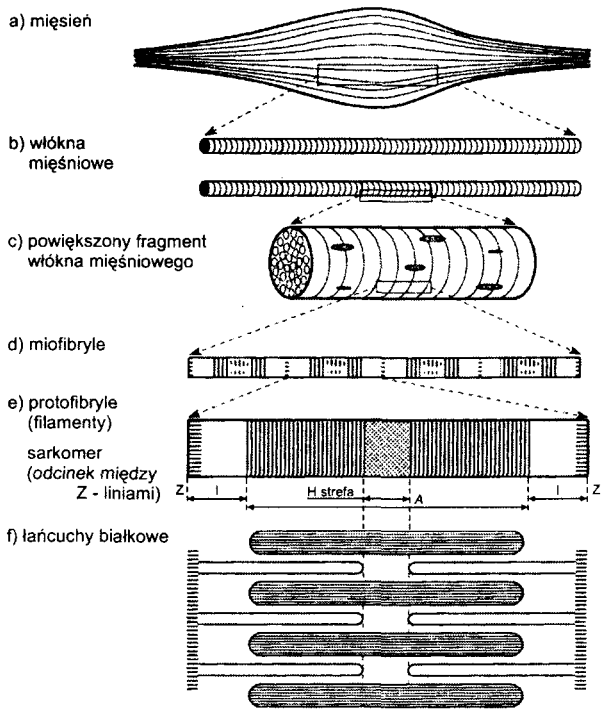
Ilustracją będącą jednocześnie podsumowaniem przedstawionych wcześniej wiadomości na temat budowy mięśnia szkieletowego są rysunki 3.10 i 3.11. Oba rysunki przedstawiają obrazy struktur mięśnia otrzymywane przy zmieniającym się stopniowo powiększeniu mikroskopu, od skali makro do skali mikro. Rys. 3.10 obrazuje struktury mięśnia w sposób zbliżony do ich naturalnego wyglądu, rys. 3.11 podaje ich uproszczony schemat.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.10. Budowa mięśnia szkieletowego [25]

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.11. Schemat struktury wewnętrznej mięśnia szkieletowego

3.3. Mięśnie gładkie

Włókna mięśni gładkich (*miocyty*) są pojedynczymi jednojądrowymi komórkami o kształcie wrzecionowatym. Długość ich wynosi od 30 do 200 μm, a średnica od 5 do 10 μm. Każde włókno z zewnątrz otoczone jest błoną, zaś jego wnętrze wypełnia *sarkoplazma*, którą zajmują prawie całkowicie *miofibryle* o średnicy 0,2-0,3 μm. W obrębie miofibryli włókien mięśni gładkich występują mniejsze elementy strukturalne, *miofilamenty*, o średnicy ok. 5 nm. Kilka lub kilkanaście włókien mięśniowych tworzy pęczek. Niekiedy zakończenia włókien mięśni gładkich kończą się sprężystymi, splatającymi się ze sobą ścięgnami, dzięki czemu powstaje elastyczno-kurczliwy zespół, który reguluje np. wielkość przekroju przepływu krwi przez naczynie.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Mięśnie gładkie, w przeciwieństwie do szkieletowych, nie są przymocowane do szkieletu kostnego i chrząstkowego. Znajdują się w ścianach przewodu pokarmowego, naczyń krwionośnych, układu moczowego, narządów rodnych i dróg oddechowych. Spoczywa na nich zadanie wykonywania nieuświadomionych, rutynowych czynności ustroju, tj. przesuwania pokarmu przez przewód pokarmowy, ustawiania ostrości widzenia, regulowania wielkości przekroju naczyń krwionośnych. W pewnym sensie „szkieletem" dla mięśni gładkich jest ciśnienie płynów przemieszczanych przez te mięśnie.



Rys. 3.12. Włókna mięśni gładkich

Brak sztywnego szkieletu, do którego byłyby przyczepione mięśnie gładkie oraz ich funkcja w organizmie, determinują mniejszą dynamikę ich działania. Nici aktyny i miozyny w mięśniach gładkich nie są uporządkowane przestrzennie, dlatego nie występuje w nich poprzeczne prążkowanie. Brak uporządkowania przestrzennego miofilamentów powoduje również mniejszą zmienność siły w zależności od długości mięśni gładkich. Ich wydłużenie względne jest większe niż mięśni szkieletowych. Na przykład mięśnie gładkie macicy w okresie ciąży wydłużają się kilkunastokrotnie w stosunku do długości spoczynkowej. Zmiana siły mięśni gładkich w funkcji ich długości zależy bardzo znacznie od prędkości ich rozciągania. Powolne rozciąganie ma niewielki wpływ na zmianę ich siły, natomiast szybkie rozciąganie powoduje istotny wzrost siły.

Mięśnie gładkie kurczą się automatycznie i niezależnie od świadomości. Czas ich skurczu wynosi ok. 3 s, a cały cykl z okresem utajonym i relaksacją trwa do 20 s. Pracują więc one ok. 200 razy wolniej niż mięśnie szkieletowe.

3.4. Mięsień sercowy

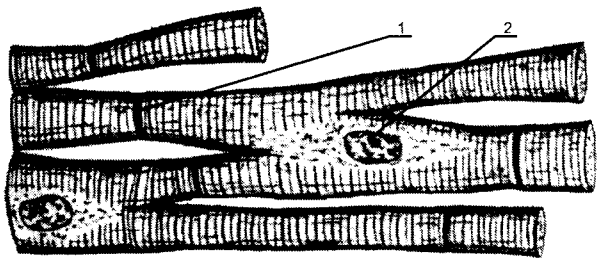
Trzecim typem mięśnia jest mięsień sercowy. Jego włókna są stosunkowo małe, mają średnicę 10–20 μm i długość 50–100 μm. Można je bardzo łatwo odróżnić, ponieważ są widlasto rozgałęzione. Jest to bardzo ważna cecha, bowiem dzięki niej łączące się ze sobą komórki mięśniowe tworzą sieć przestrzenną, w której skurcz elementów prowadzi do zmniejszenia objętości jam serca. W „oczkach"

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

sieci komórkowej występują liczne naczynia krwionośne oraz włókna układu nerwowego autonomicznego (skurcz serca jest niezależny od woli).

Włókna mięśnia sercowego wykazują prążkowanie podłużne i poprzeczne, przy czym prążki poprzeczne przypominają analogiczne prążki występujące we włóknach mięśni szkieletowych.

Skurcz mięśnia sercowego reagującego na pojedynczy bodziec ma przebieg podobny do skurczu mięśni szkieletowych. Jednak czas jego trwania jest znacznie dłuższy (ok. 10 razy). W odróżnieniu od mięśni szkieletowych w mięśniu sercowym nie występuje zależność siły skurczu od wartości pobudzenia. Bodziec progowy wywołuje od razu maksymalny skurcz mięśnia sercowego.



Rys. 3.13. Włókna mięśnia sercowego; 1 – wstawka, 2 – jądro komórkowe

Mięsień sercowy kurczy się bez stymulacji nerwowej. Właściwość ta nazywana jest automatyzmem serca. Taktowanie skurczami w normalnych warunkach zapewniają wyspecjalizowane komórki mięśnia sercowego, tzw. *komórki Purkinjego*, zlokalizowane w maleńkim obszarze w prawym przedsionku. Obszar ten nosi nazwę *węzła zatokowego* (ang. *pacemaker*) i stanowi swoistą lokalną „elektrownię", fizjologiczny rozrusznik, mający zdolność spontanicznego (bez bodźca z zewnątrz) wytwarzania impulsu elektrycznego. Wprawdzie do serca dochodzą nerwy współczulne i przywspółczulne autonomicznego układu nerwowego, ale kontrola, którą sprawują, ma jedynie charakter pomocniczy. Mogą one zostać nawet zniszczone, a mimo to serce będzie pracować tak długo, jak długo otrzymywać będzie glukozę i tlen.

Właściwości błony mięśnia sercowego różnią się od tych, które wykazuje błona mięśnia szkieletowego. W rezultacie, pojedyncze skurcze nie podlegają sumowaniu i tkanka mięśnia sercowego nie może wytwarzać skurczu tężcowego. Różnica ta jest istotna, gdyż serce w stanie skurczu tężcowego nie mogłoby pompować krwi.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Częstość skurczów (zwana również częstością tętna) wynosi u dorosłego człowieka ok. 70/min. U dzieci jest ona znacznie większa (u noworodka – 135/min, u dziecka pięcioletniego – 105/min) i w miarę dojrzewania zmniejsza się stopniowo. W czasie dużych wysiłków częstość skurczów może wzrosnąć do 180/min, a u zawodników nawet do 220/min. Serce pompuje bez przerwy krew – w spoczynku ok. 4 l/min, co stanowi ok. 2 mln l/rok. Podczas wysiłku wydolność serca jest większa, w czasie intensywnej pracy może wzrosnąć ośmiokrotnie w stosunku do wydolności spoczynkowej. Ciśnienie w tętnicach jest wysokie, równe w przybliżeniu ciśnieniu słupa wody o wysokości 1,5–1,8 m. Tak więc, w ciągu roku serce człowieka pozostającego w spoczynku wykonuje pracę równą podniesieniu ok. 2 mln l krwi na wysokość 1,5–1,8 m, co odpowiada w przybliżeniu podniesieniu 340-410 l krwi na wysokość Mount Everestu. U człowieka wykonującego przeciętną pracę serce podnosi rocznie ok. 1 tony krwi na wysokość Mount Everestu.

3.5. Skurcz mięśnia szkieletowego

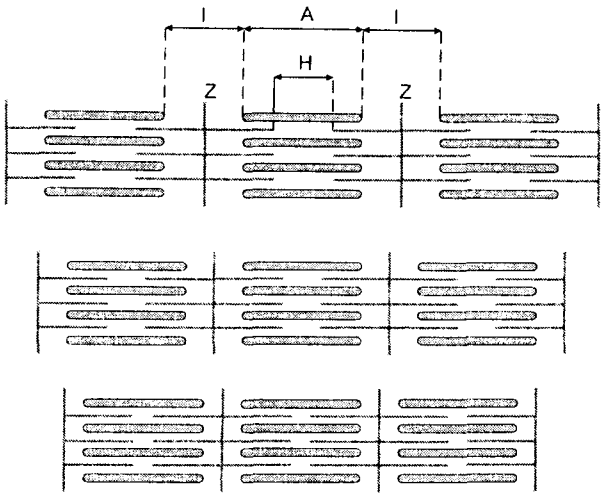
3.5.1. Ślizgowa teoria skurczu

W połowie lat 50-tych XX wieku A.F. Huxley i R. Niedergerke [17] oraz H.E. Huxley i J. Hanson [18] ogłosili wyniki swoich obserwacji dotyczących zmian morfologicznych zachodzących w mięśniu podczas skurczu i powodujących jego skracanie się. Stwierdzili oni, że (rys. 3.14):

- strefy *H* stają się węższe;
- strefy zachodzenia poszerzają się;
- linie *Z* zbliżają się do siebie;
- szerokość stref *A* pozostaje stała.

Powyższe obserwacje skłoniły ich do postawienia hipotezy, że zmiany długości mięśnia są wynikiem ślizgania się filamentów cienkich w kierunku środka sarkomeru i wchodzenia ich pomiędzy filamenty grube. Takie wytłumaczenie zmian fizycznych zachodzących podczas skurczu nosi nazwę *teorii ślizgających się filamentów* lub krócej *ślizgowej teorii skurczu*. Teoria ta pokazuje, co dzieje się w sarkomerze w czasie skurczu, ale nie mówi nic na temat mechanizmu tego zjawiska. Aby to wyjaśnić, potrzebna jest bardziej dogłębna analiza.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.14. Schemat przedstawiający kolejne fazy skurczu mięśnia szkieletowego

Zgodnie z teorią ślizgową siła skurczu mięśnia rozwijana jest przez mostki. Mostki przyczepione są na stałe do miozyny, natomiast z filamentami aktynowymi wiążą się jedynie na krótko za pomocą wiązań chemicznych w specjalnych *centrach aktywnych*. W czasie skurczu filamenty aktyny ślizgają się wzdłuż filamentów miozynowych dzięki następującym po sobie aktom łączenia się mostków z aktyną, ich zginaniu, odłączaniu i ponownym łączeniu z kolejnymi centrami w aktynie. Ponieważ mięśnie szkieletowe i mięsień sercowy mogą skracać się w sposób aktywny o mniej więcej 30%, proces taki powtarza się 5-6 krotnie (odległość mostków wynosi ok. 5% połowy długości sarkomeru), w sposób podobny do tego, w jaki człowiek przeciąga linę przekładając na przemian ręce. Dzięki badaniom obrazu rentgenograficznego mięśnia w skurczu i rozkurczu stwierdzono, że przemieszczenia nitek aktyny i miozyny dokonują się bez ich odkształcenia.

3.5.2. Jednostka motoryczna

Układ ruchu napędzany jest mięśniami szkieletowymi. Do sterowania nimi służy ponad 400 tysięcy komórek nerwowych znajdujących się w rdzeniu kręgowym. Każda z tych komórek steruje działaniem zespołu włókien mięśniowych, zwanego *jednostką motoryczną*. Jednostka taka zawiera od 3 do 2000 włókien mięśniowych, w zależności od wymaganej finezji sterowania. Na przykład jed-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

nostki motoryczne mięśni palców, twarzy i oczu składają się z niewielkiej liczby włókien (potrzebna jest duża precyzja działania), podczas gdy szerokie mięśnie nogi mają bardzo dużą liczbę włókien w swych jednostkach motorycznych.

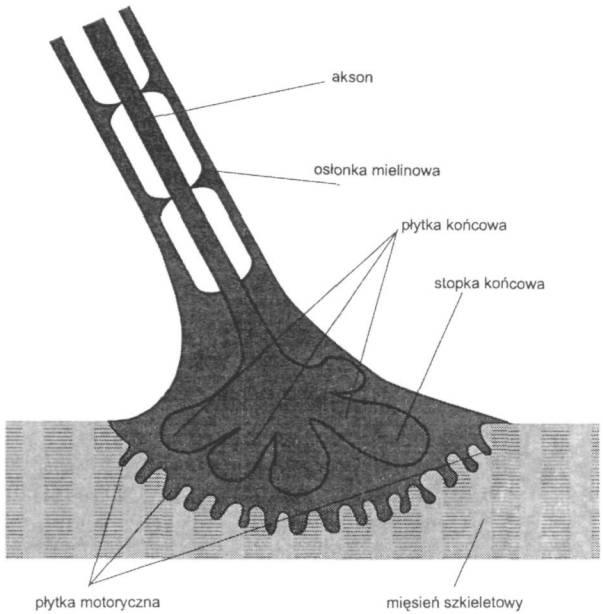
3.5.3. Skurcz włókna mięśniowego

Skurcz pojedynczego włókna jednostki motorycznej następuje w wyniku doprowadzenia do niego impulsu nerwowego. Impulsy nerwowe (o złożonej elektryczno-chemicznej naturze) docierają do włókien mięśniowych od neuronów ruchowych, tzw. *motoneuronów*, mieszczących się w rogach przednich rdzenia kręgowego. Dochodząc do mięśnia motoneurony rozdzielają się na drobne gałązki, z których każda unerwia jedno włókno mięśniowe. Zazwyczaj gałązka taka styka się z błoną włókna w okolicy jego środka, tworząc tzw. *synapsę nerwowo-mięśniową* (budowa i działanie synaps będą omówione szerzej w następnym rozdziale poświęconym układowi nerwowemu). W miejscu styku z włóknem mięśniowym każda gałązka końcowa motoneuronu tworzy zgrubienie zwane *stopką końcową*. Wszystkie stopki końcowe stanowią razem *płytkę końcową*. Z kolei miejsce na błonie komórki mięśniowej, którego dotyka płytka końcowa, nosi nazwę *płytki motorycznej*. Płytka motoryczna jest wklęsłym i pofałdowanym obszarem sarkolemmy, nieco większym od płytki końcowej (rys. 3.15).

Tak jak inne błony komórkowe, sarkolemma ma charakterystyczny potencjał membranowy, będący efektem nierównomiernego rozmieszczenia dodatnich i ujemnych ładunków (jonów) po obu jej stronach. We włóknie mięśnia szkieletowego nagła zmiana tego potencjału jest pierwszym krokiem prowadzącym do skurczu. Chociaż włókno mięśnia szkieletowego jest bardzo długie, wszystkie jego rejony kurczą się jednocześnie. Dzieje się tak za sprawą *kanalików poprzecznych* (*kanalików T*), które wychodząc z sarkolemmy wnikają do sarkoplazmy i bardzo szybko rozprowadzają impuls we wnętrzu komórki mięśniowej.

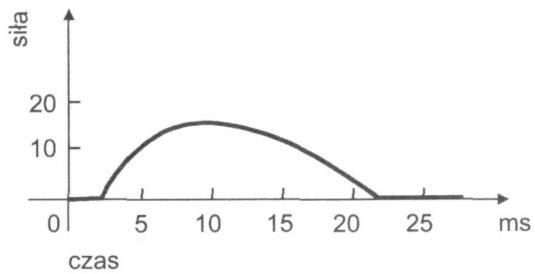
Włókno typowego mięśnia poprzecznie prążkowanego reaguje na właściwy bodziec krótkim skurczem, po którym wraca do spoczynku (rys. 3.16). Czas trwania skurczu włókna mięśnia szkieletowego może być różny w zależności od rodzaju włókna i temperatury; przeciętnie wynosi ok. 0.1 s. W czasie kilku milisekund od zadziałania bodźca (od 3 ms do 10 ms) nie obserwuje się reakcji w postaci pojawienia się siły we włóknie, rejestruje się natomiast zmianę potencjału błony komórkowej. W tym „czasie martwym" zwanym *okresem utajonym* lub *opóźnieniem elektromechanicznym* prąd czynnościowy wnika do wnętrza włókna. Jest to istotne z tego względu, że skurcz włókna mięśniowego jest skuteczny wtedy, gdy wszystkie jego miofibryle otrzymują sygnał do skurczu

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.15. Synapsa nerwowo-mięśniowa

mniej więcej jednocześnie. Po okresie utajonym następuje faza skurczu, podczas której siła rośnie do wartości maksymalnej. Cały cykl kończy faza rozkurczu (relaksacji), kiedy napięcie we włóknie mięśniowym maleje do zera.



Rys. 3.16. Reakcja na bodziec pojedynczego włókna mięśniowego

Jednostki motoryczne mięśnia szkieletowego (jak również tworzące je włókna mięśniowe) działają zgodnie z zasadą „wszystko albo nic" (prawo Bowditcha). Oznacza to, że rozwijają one maksymalną siłę, na jaką je aktualnie stać lub ich

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

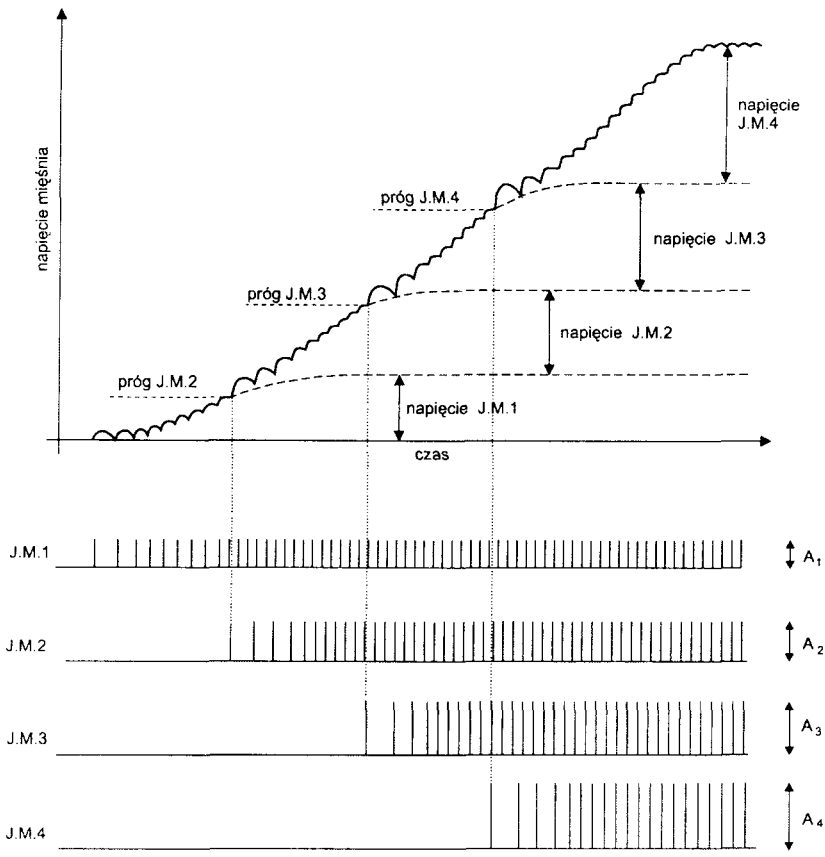
naprężenie aktywne jest równe zeru. To, czy jednostka motoryczna jest w stanie napięcia czy spoczynku, zależy od wartości amplitudy bodźca stymulującego. Do przejścia jednostki motorycznej w stan napięcia potrzebny jest bodziec o wartości progowej, właściwej dla danej jednostki (zwiększanie bodźca powyżej tej wartości nie powoduje wzrostu siły). Obowiązuje przy tym tzw. „zasada rozmiaru" która mówi, że wielkość amplitudy bodźca niezbędnego do pobudzenia jednostki motorycznej rośnie wraz z jej wielkością. Oznacza to, że przy stopniowo zwiększającej się amplitudzie impulsu, najmniejsze jednostki są pobudzane jako pierwsze, zaś największe jako ostatnie.

3.5.4. Skurcz mięśnia

W przeciwieństwie do pojedynczego włókna, cały mięsień nie reaguje zgodnie z zasadą „wszystko albo nic". Może się on kurczyć w dowolnym stopniu, od rozluźnienia do skurczu maksymalnego. Gdy amplituda bodźca przekroczy wartość progową, notuje się słabą odpowiedź mięśnia, która powiększa się w miarę zwiększania amplitudy, aż do momentu osiągnięcia tzw. *skurczu tężcowego zupełnego*, tzn. gdy naprężenie w mięśniu osiąga maksimum.

W procesie osiągania przez mięsień skurczu tężcowego zupełnego decydujące znaczenie mają dwa parametry: amplituda i częstotliwość impulsów stymulujących. Gdy pobudzimy mięsień bodźcem o amplitudzie niewiele przekraczającej wartość progową właściwą dla najmniejszej jednostki motorycznej, reaguje (tylko) ona pojedynczym skurczem (rys. 3.17). Zwiększając częstotliwość (przy nie zmienionej amplitudzie) doprowadzamy do sytuacji, w której kolejny impuls pobudza jednostkę motoryczną, zanim zaniknie jej odpowiedź na poprzedni impuls. Występuje zjawisko sumowania się skurczów (fal). Gdy częstotliwość osiągnie wartość krytyczną (dla mięśni człowieka w temperaturze 20°C wynosi ona ok. 50 Hz), uzyskany zostaje *skurcz tężcowy zupełny (tetanus)* pierwszej, najmniejszej jednostki motorycznej. Na wykresie odzwierciedla się to gładką linią (w przeciwieństwie do linii „pofalowanej", gdy częstotliwość jest mniejsza od krytycznej – mówimy wówczas o *skurczu tężcowym niezupełnym*). Ten sam proces stymulacji powtarzamy teraz przy zwiększonej amplitudzie, odpowiadającej wartości progowej dla drugiej (co do wielkości) jednostki motorycznej. Reakcja jest podobna do poprzedniej z tą różnicą, że tym razem w skurczu biorą udział dwie jednostki motoryczne. Całkowita reakcja mięśnia jest więc odpowiednio większa. Zwiększając amplitudę impulsu aktywujemy kolejne jednostki motoryczne tak, iż w końcu (przy bodźcu supramaksymalnym – odpowiadającym największej jednostce motorycznej) wszystkie jednostki motoryczne składające

BIBLIOTEKA GŁÓWNA PŁ
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.17. Wykres ilustrujący powstawanie skurczu tężcowego zupełnego w mięśniu szkieletowym A_i – amplituda progowa impulsu aktywującego i-tą jednostkę motoryczną

się na dany mięsień osiągają skurcz tężcowy. Skurcz ten trwa tak długo, jak długo dostarczane są odpowiednie, co do amplitudy i częstotliwości, impulsy stymulujące lub dopóki nie nastąpi zmęczenie mięśnia. W praktyce, w czasie skurczu tężcowego zupełnego, nie wszystkie włókna pracują, część z nich „odpoczywa". Aby siła maksymalna nie malała, mięsień izolowany wymaga przeciętnie 1 min odpoczynku na 1 s skurczu tężcowego.

Gdy amplituda bodźca stymulującego jest obniżana, pojawia się proces odwrotny. Jako pierwsze „zamierają" największe jednostki motoryczne, najmniejsze przechodzą do stanu spoczynku jako ostatnie.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Mięśnie nie są zdolne do samodzielnego powrotu do swej pierwotnej długości (sprzed skurczu). Do wydłużenia włókna mięśniowego (i całego mięśnia) potrzebne jest działanie innych, zewnętrznych czynników. Mogą mieć one charakter aktywny (skurcz mięśnia antagonistycznego), bądź bierny (siły grawitacyjne, np. ciężar opadającej ręki).

Nawet w spoczynku większość naszych mięśni szkieletowych znajduje się w stanie częściowego skurczu, zwanego *tonusem*. Bez niego na przykład niemożliwe byłoby utrzymanie właściwej postawy ciała.

Poza częstotliwością i amplitudą bodźców stymulujących, na przebieg skurczu mięśnia mają także wpływ jego rodzaj, obciążenie oraz temperatura.

3.5.5. Źródła energii skurczu

Mięsień jest swoistym silnikiem biologicznym wprawiającym w ruch elementy dźwigniowe układu ruchowego człowieka, jakimi są kości. Przekształca on energię chemiczną zmagazynowaną w prostych substancjach chemicznych w energię mechaniczną. Bezpośrednim źródłem energii mechanicznej jest reakcja hydrolizy kwasu adenozynotrójfosforowego, w skrócie ATP, w wyniku której powstają kwas adenozynodwufosforowy (ADP) i kwas ortofosforowy:

$$\mathrm{ATP} \rightarrow \mathrm{ADP}^{2-} + \mathrm{HPO}_4^{2-} + \text{energia} .$$

W czasie tej reakcji następuje stopniowe odrywanie końcowych grup fosforanowych, któremu towarzyszy wyzwalanie dużej ilości energii. Wydajność przemiany energii chemicznej, zmagazynowanej w ATP, w energię mechaniczną skurczu mięśniowego osiąga co najwyżej 40%. Pozostała część energii uwalnia się w postaci ciepła, które stanowi wartościowy produkt uboczny. Ciepło produkowane podczas skurczu mięśniowego służy (poza innymi czynnikami) do utrzymania stałej temperatury ciała.

Zawartość ATP w mięśniu jest stosunkowo niska i wystarcza najwyżej na kilka kolejnych skurczów. Dłuższa praca mięśnia możliwa jest dzięki różnym procesom enzymatycznym, które odtwarzają rozłożony ATP. Najważniejszą z reakcji utrzymujących stały poziom ATP w pracującym mięśniu jest przeniesienie grupy fosforanowej z innego wysokoenergetycznego związku fosforowego, fosfokreatyny, na ADP:

$$\text{fosfokreatyna} + \mathrm{ADP} \rightleftarrows \text{kreatyna} + \mathrm{ATP} .$$

Reakcja ta jest odwracalna – kierunek jej przebiegu uzależniony jest od stężeń reagujących ze sobą związków w taki sposób, że ADP powstający w wyniku

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

hydrolizy ATP, jest natychmiast przekształcany w ATP (fosforylacja ADP) i w rezultacie nie obserwuje się zmian zawartości ATP aż do momentu wyczerpania się zapasu fosfokreatyny.

Inny enzym (*miokinaza*) katalizuje przeniesienie grupy fosforanowej z jednej cząsteczki ADP na drugą, z wytworzeniem się jednej cząsteczki ATP i jednej cząsteczki kwasu adenozynomonofosforowego (AMP):

$$2\,\mathrm{ADP} \rightleftarrows \mathrm{ATP} + \mathrm{AMP}\,.$$

Reakcja ta przebiega w kierunku syntezy ATP dopiero wówczas, gdy stężenie ADP przewyższa stężenie ATP, toteż w warunkach normalnej pracy mięśnia ma ona mniejsze znaczenie, odgrywa natomiast ważną rolę przy intensywnej pracy, prowadzącej do wyczerpania zapasu fosfokreatyny.

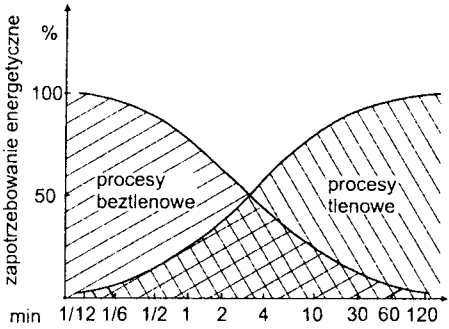
Łączny zapas energii zawartej w ATP i fosfokreatynie nie pozwala na wykonanie większej pracy, wystarcza jedynie na kilkadziesiąt skurczów. Ograniczenie to możliwe jest do pokonania dzięki procesom metabolicznym odtwarzającym ATP z ADP i nieorganicznego fosforanu. Źródłem energii, która w toku tych procesów magazynowana jest w cząsteczce ATP, jest utlenianie węglowodanów i tłuszczów. Ponieważ jest ono uzależnione od obecności tlenu, dlatego odgrywa rolę przy pracy intensywnej i krótkotrwałej oraz długotrwałej, lecz powolnej, a także w okresie odnowy, po zakończeniu pracy.

Podczas intensywnej pracy szybkość dostarczania tlenu przez krew jest niewystarczająca dla zapewnienia sprawnego przebiegu reakcji tlenowych. Odtwarzanie ATP z ADP i nieorganicznego fosforanu w warunkach *beztlenowych* zapewnia proces *glikolizy*, obejmujący wstępne etapy przemiany glikogenu. W obecności tlenu produkt glikolizy – kwas pirogronowy – ulega całkowitemu spaleniu; w warunkach niedotlenienia, np. przy dużym wysiłku fizycznym, glikogen ulega przemianie beztlenowej, której końcowym produktem jest kwas mlekowy, gromadzony w mięśniu podczas pracy, a następnie usuwany przez krwiobieg i utleniany w innych narządach (np. w wątrobie).

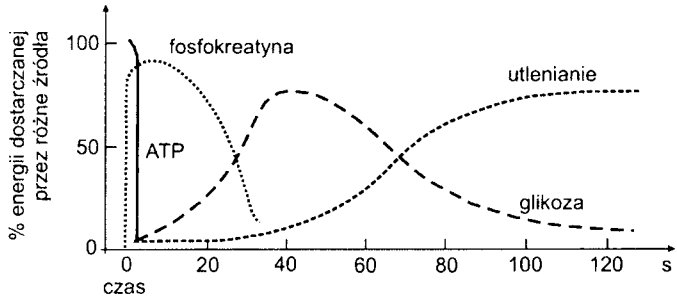
Wszystkie wymienione wyżej procesy i pojedyncze reakcje chemiczne umożliwiają przenoszenie energii chemicznej zawartej w różnorodnych substancjach pokarmowych na ATP – jedyną substancję zdolną do przekazywania energii chemicznej elementom kurczliwym, które przekształcają ją na pracę mechaniczną.

Procentowy udział przemian tlenowych i beztlenowych w pokrywaniu zapotrzebowania na energię podczas wysiłków fizycznych przedstawia rys. 3.18, zaś rys. 3.19 obrazuje ten udział w rozbiciu na poszczególne źródła energii.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.18. Schemat udziału przemian tlenowych i beztlenowych w pokrywaniu kosztu energetycznego wysiłków fizycznych w zależności od ich intensywności (maksymalnego czasu wykonywania wysiłku)



Rys. 3.19. Udział różnych źródeł energii w zależności od czasu pracy mięśnia

W tabeli 3.1 zamieszczono dane liczbowe dotyczące zasobów oraz mocy różnych źródeł energii przypadających na 1 kg masy ciała, zaś tabela 3.2 przedstawia sposób wykorzystania tych źródeł na przykładzie człowieka o masie 75 kg.

Tab. 3.1. Zasób i moc źródeł energii

Źródło energii	Zasób energii [J/kg masy ciała]	Moc [W/kg masy ciała]	Maksymalny czas pracy [s]
fosforylacja	420	54,4	4 – 6
glikoza beztlenowa	960	29,3	40 – 90
procesy tlenowe	nieograniczony	15	nieograniczony

Badania nad mechanizmem przekształcania przez mięsień energii chemicznej w mechaniczną zostały zapoczątkowane odkryciem przez W.A. Engelhardta i M.N. Lubimową w 1939 roku, że jedno z głównych strukturalnych białek mię-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Tab. 3.2. Zdolność do wykonywania pracy i rozwijania mocy przez człowieka

Źródło energii	Praca włożona [J]	Praca uzyskana [J]	Moc włożona [W]	Moc uzyskana [W]	Sprawność mechaniczna [%]
fosforylacja	31 500	4 750	4 070	610	15
glikoliza beztlenowa	71 200	14 250	2 200	440	20
procesy tlenowe	nieograniczona	nieograniczona	1 125	290	26

śniowych – miozyna – jest enzymem katalizującym hydrolizę ATP, oraz o dwa lata później sza obserwacją A. Szent-Gyorgyiego, że miozyna połączona z drugim białkiem mięśniowym – aktyną – po wstrzyknięciu przez rurkę kapilarną do wody wytrąca się w postaci nici, które po dodaniu ATP ulegają skurczeniu. W ten sposób uzyskano najprostszy układ modelowy złożony z miozyny, aktyny i ATP, umożliwiający badanie procesów, które zachodzą w żywym mięśniu podczas skurczu. Uzyskane tą drogą informacje, łącznie z wynikami jednocześnie prowadzonych badań nad molekularną organizacją miozyny i aktyny w mięśniu, ukształtowały współczesne poglądy na molekularny mechanizm skurczu.

3.6. Włókna wolno- i szybkokurczliwe

Mięśnie szkieletowe zbudowane są z dwóch rodzajów włókien: wolnokurczliwych i szybkokurczliwych.

Włókna wolnokurczliwe (*czerwone*, *typu I*) zawierają duże ilości mioglobiny, czerwonego barwnika będącego mięśniowym odpowiednikiem hemoglobiny, ale o większym powinowactwie z tlenem cząsteczkowym. Wiąże ona pewien zapas tlenu, zwiększając odporność włókien czerwonych na zmęczenie wywołane brakiem tego gazu. Względnie duża objętość sarkoplazmy pozwala także na zmagazynowanie znacznego zapasu glikogenu.

Włókna szybkokurczliwe (*białe*, *typu IIA*) zawierają większą liczbę miofibryli, które są przy tym gęściej upakowane i w związku z tym pozostawiają mniej miejsca na sarkoplazmę. Zawierają większą ilość ATP i fosfokreatyny oraz enzymów niezbędnych do uwalniania energii w warunkach beztlenowych (w procesie glikolizy beztlenowej). Mają też mniejszą zawartość mioglobiny, co decyduje o ich jaśniejszym kolorze (stąd nazwa – włókna białe).

Wyróżnia się też trzeci typ włókien – *włókna pośrednie*, których własności, zgodnie z nazwą, sytuują je pomiędzy włóknami wolnymi a szybkimi. Zawierają

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

one niewielką ilość mioglobiny i są stosunkowo jasne, co zbliża je bardziej do włókien szybkich (stąd też inna nazwa – *włókna typu IIB*). Mają jednak od nich gęstszą siatkę naczyń włosowatych i większą odporność na zmęczenie.

Proporcje między włóknami wolno- i szybkokurczliwymi w mięśniu stanowią o jego właściwościach dynamicznych. Mięśnie z przewagą włókien czerwonych, stanowiące większość w organizmie człowieka, działają wolniej i są używane podczas długotrwałych wysiłków o umiarkowanym nasileniu, np. mięśnie grzbietu utrzymujące wyprostowaną postawę ciała.

Mięśnie o przewadze włókien białych kurczą się szybciej i silniej, lecz szybko tracą rezerwy energetyczne i szybciej ulegają zmęczeniu. Przy krótkotrwałych wysiłkach o dużym nasileniu organizm używa tych właśnie mięśni (np. mięśni palców i ramion). Porównawczą charakterystykę włókien wolno- i szybkokurczliwych przedstawia tabela 3.3.

Tab. 3.3. Charakterystyka włókien wolno- i szybkokurczliwych

Parametry włókien mięśniowych	Włókna wolnokurczliwe	Włókna szybkokurczliwe
Wielkość siły na powierzchnię przekroju	mała	duża
Aktywność miofibrylowej ATP-azy	niska	wysoka
Wewnątrzmięśniowe zasoby ATP	małe	duże
Wewnątrzmięśniowe zasoby fosfokreatyny	małe	duże
Szybkość skurczu	mała	duża
Czas relaksacji	długi	krótki
Aktywność enzymów glikotycznych	niska	wysoka
Wytrzymałość na zmęczenie	wysoka	niska
Wewnątrzmięśniowe zasoby glikogenu	podobne	
Wewnątrzmięśniowe zasoby trójglicerydów	duże	małe
Zawartość mioglobiny	duża	mała
Aktywność enzymów tlenowych	wysoka	niska
Gęstość naczyń włosowatych	duża	mała
Gęstość mitochondriów	duża	mała

3.7. Właściwości biomechaniczne mięśnia szkieletowego

Siła rozwijana przez mięsień zależna jest od tego, ile włókien wchodzi w jego skład. Miarą liczby włókien tworzących mięsień jest jego *przekrój fizjologiczny*, tzn. przekrój prostopadły do kierunku przebiegu włókien w najgrubszym miejscu. W przypadku mięśnia wrzecionowatego przekrój ten pokrywa się z przekrojem

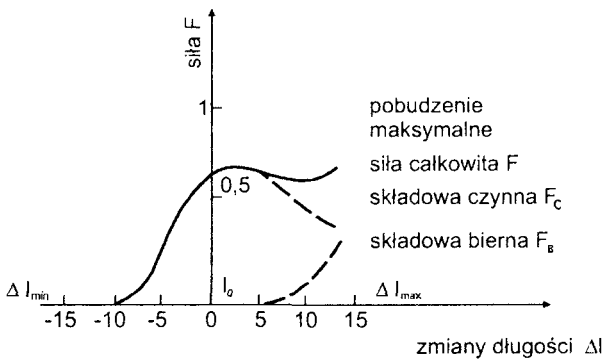
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

poprzecznym do jego długiej osi. Oszacowanie wielkości przekroju fizjologicznego mięśni pierzastych i półpierzastych jest nieco trudniejsze i wymaga niekiedy sumowania powierzchni przekrojów w kilku miejscach.

Stosunek siły wytwarzanej przez mięsień do jego przekroju fizjologicznego nosi nazwę *siły właściwej*. Chociaż wartości tej siły podawane przez różnych autorów różnią się między sobą, to można przyjąć, że wynosi ona przeciętnie od 30 do 40 N/cm^2.

Pomiary podstawowych parametrów biomechanicznych mięśni izolowanych prowadzi się w warunkach *skurczu izometrycznego* – przy zachowaniu stałej długości mięśnia, jak również *skurczu izotonicznego* – przy stałej sile rozwijanej przez mięsień. W żywym organizmie najczęściej występuje *skurcz auksotoniczny*, w którym zarówno długość mięśnia, jak i jego siła zmieniają się równocześnie w czasie trwania skurczu.

Do oceny właściwości mięśni szkieletowych służą dwie podstawowe charakterystyki. Pierwsza z nich, zwana *charakterystyką statyczną*, przedstawia zależność siły całkowitej F rozwijanej przez mięsień (podczas izometrycznego skurczu tężcowego i przy stałym pobudzaniu) od długości l (rys. 3.20). Siła ta jest sumą składowej biernej F_B i składowej czynnej F_C ($F = F_B + F_C$). Mięsień niepobudzony, rozciągany powyżej długości spoczynkowej l_0 przeciwstawia się biernie sile rozciągającej z siłą F_B. Natomiast składowa czynna F_C pochodzi od aktywnie kurczących się pod wpływem pobudzenia elementów struktury mięśnia i jej wartość zależy od amplitudy bodźców stymulujących.



Rys. 3.20. Charakterystyka statyczna mięśnia

Doświadczalnie można mierzyć składową bierną F_B (rozciągając mięsień niepobudzony) i siłę całkowitą F (mierząc siłę rozwijaną przez mięsień pobudzo-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

ny). Przebieg składowej czynnej F_C dla $l > l_0$ wyznacza się odejmując od siły całkowitej składową bierną. Długość spoczynkowa l_0 w pewnym przybliżeniu odpowiada długości mięśnia w położeniu pośrednim, w środku kątowego zakresu ruchu w stawie. Krzywe typu $F = F(l)$, dla których siła osiąga maksimum w okolicy l_0, a długość mięśnia może zmieniać się o kilkadziesiąt procent l_0 w obie strony, są typowe dla prawie wszystkich rodzajów mięśni: szkieletowych, sercowego i gładkich.

Przebieg zależności składowej czynnej F_C od długości mięśnia można wyjaśnić na podstawie ślizgowej teorii skurczu. Zgodnie z nią, wypustki wystające z cząsteczek miozyny łączą się z nitkami aktyny i poprzez obrót powodują przesuwanie się filamentów cienkich względem grubych. Przyjmuje się, że każdy mostek wytwarza taką samą siłę i wykonuje taką samą pracę, niezależnie od pozostałych główek miozynowych. Ponieważ mostki rozmieszczone są równomiernie wzdłuż filamentu grubego, strefa zachodzenia na siebie grubych i cienkich filamentów określa liczbę możliwych do utworzenia połączeń mostkowych między aktyną i miozyną, a zatem również całkowitą siłę, jaka może być wytworzona.

Dokładną analizę przebiegu zależności *siła-długość* dla pojedynczego sarkomeru można przeprowadzić na przykładzie mięśnia szkieletowego żaby, który był przedmiotem eksperymentów wielu badaczy (stąd duża wiarygodność danych). Długości poszczególnych odcinków sarkomeru tego mięśnia są następujące: filament gruby – 1.6 μm, filament cienki – 0.95 μm, linia *Z* – 0.1 μm, strefa *H* – 0.17 μm.

Przy największym rozciągnięciu sarkomeru, filamenty grube i cienkie nie zachodzą na siebie, nie mogą więc powstać wiązania mostkowe, a co za tym idzie siła jest równa zeru. Długość sarkomeru w tym stanie wynosi ok. 3.6 μm. Składają się na nią: długość filamentu grubego (1,6 μm), podwójna długość filamentu cienkiego (1.9 μm), oraz szerokość linii *Z* – 0.1 μm. Na rys. 3.21 temu stanowi sarkomeru odpowiada punkt *5*.

Skracanie sarkomeru poszerza strefę zachodzenia na siebie filamentów grubych i cienkich, a więc również liczbę potencjalnych połączeń mostkowych. Liczba ta zwiększa się liniowo wraz ze skróceniem sarkomeru, aż do osiągnięcia maksymalnej możliwej liczby tych połączeń. Odpowiada to długości sarkomeru 2.17 μm (2 × długość filamentów cienkich + szerokość linii *Z* + szerokość strefy *H*, punkt *4* na wykresie).

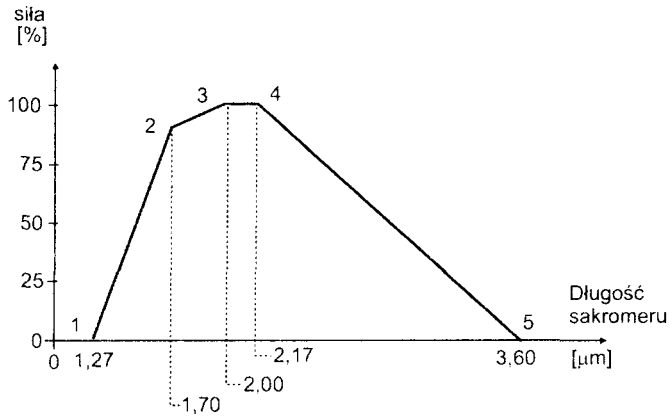
Dalsze skracanie sarkomeru do 2 μm (2 × dług. filamentów cienkich + szer. linii *Z*, punkt *3*) zwiększa szerokość strefy zachodzenia grubych i cienkich filamentów, jednak nie zwiększa liczby potencjalnych połączeń mostkowych, po-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

nieważ środkowa część filamentów grubych nie zawiera mostków. Siła pozostaje więc stała.

Skracanie poniżej 2 μm związane jest ze zmniejszaniem siły spowodowanym interferencją cienkich filamentów, gdy zaczynają one zachodzić na siebie.

Poniżej 1,7 μm (długość filamentu grubego + szerokość linii *Z*, punkt *2* wykresu) tempo zmniejszania się siły jest większe niż jej zwiększania w przedziale *3-2*. Bardziej stromy charakter tego fragmentu wykresu wiązany jest z siłą potrzebną do deformacji filamentu grubego.



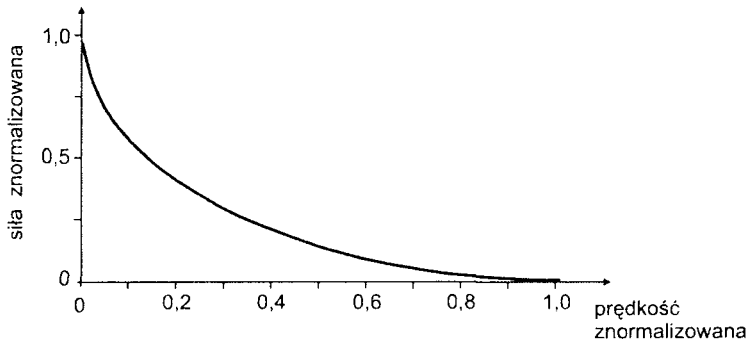
Rys. 3.21. Teoretyczna zależność siły od długości sarkomeru izolowanego mięśnia szkieletowego żaby [21]

Jak pokazuje to rys. 3.21, dla pojedynczego sarkomeru (a więc również włókna mięśniowego) zależność rozwijanej przezeń siły czynnej $F_C = F_C(l)$ jest odcinkami liniowa. Przejścia między poszczególnymi fragmentami wykresu w punktach *1*, *2*, *3*, *4*, *5* nie są gładkie i wynikają z przeskoków między kolejnymi fazami współpracy nitek aktyny i miozyny. Dla mięśnia badanego w całości nie obserwuje się tego typu „ostrych kantów", charakterystyki są zaokrąglone, ponieważ nawet w obrębie jednego włókna mięśniowego sarkomery nie kurczą się równomiernie.

Drugą charakterystyką służącą do oceny właściwości mięśni szkieletowych jest *charakterystyka dynamiczna* (rys. 3.22). Wyraża ona zależność między siłą czynną F_C rozwijaną przez mięsień a prędkością v jego skracania, przy określonej długości l i przy stałym pobudzeniu. Dla różnych wartości $l = \text{const}$ i ustalonego pobudzenia przebieg charakterystyk ma podobny kształt. Krzywe

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

tego typu otrzymuje się dla wszystkich rodzajów mięśni, nie tylko szkieletowych, lecz także sercowego i gładkich, a nawet dla preparatów z nitek aktomiozyny.



Rys. 3.22. Charakterystyka dynamiczna mięśnia

Hiperboliczny przebieg zależności $F_C = F_C(v)$ tłumaczono początkowo tym, że chociaż siła rozwijana przez mięsień jest w rzeczywistości stała przy wszelkich prędkościach, to jednak część tej siły jest zużywana na pokonanie wewnętrznych sił tarcia i lepkości w mięśniu, dlatego nie ujawnia się ona na zewnątrz. Obecnie wydaje się raczej, że na charakter tej krzywej decydujący wpływ ma prędkość zachodzenia reakcji biochemicznych w skracającym się mięśniu. Praktyczny wniosek wypływający z przebiegu zależności $F_C = F_C(v)$ jest taki, że moc mechaniczna rozwijana przez mięsień, $N = Fv$, osiąga maksimum w punkcie odpowiadającym mniej więcej jednej trzeciej wartości maksymalnej siły i maksymalnej prędkości. Moc maksymalna rozwijana przez mięsień wynosi około $0.1\, F_{max}\, v_{max}$. Aby wykonać pracę mechaniczną przy użyciu mięśni w sposób najefektywniejszy, należy dobrać obciążenie zgodnie z tą zasadą. Przerzutka rowerowa jest przykładem urządzenia pozwalającego dopasować optymalnie obciążenie i prędkość do właściwości mięśni, przy różnym pochyleniu drogi.

Mierząc energię doprowadzoną i odbieraną można określić sprawność mechaniczną mięśnia, która wynosi około 25%. Należy podkreślić, że nawet w warunkach izometrycznych, gdy mięsień nie skraca się, można mówić o wykonywaniu pracy (rozwijaniu mocy) przez mięsień, w odróżnieniu od urządzeń technicznych.

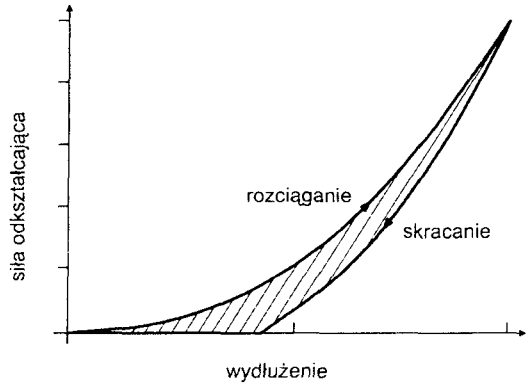
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3.8. Modele mechaniczne mięśnia

3.8.1. Modele mięśnia niepobudzonego

Mięsień jest układem wykazującym dość złożone właściwości mechaniczne. Składają się na nie właściwości sprężyste oraz plastyczne, wyrażające się procesami relaksacyjnymi.

Zależność siły rozciągającej niepobudzony mięsień wzdłuż jego osi podłużnej od wywołanego tą siłą wydłużenia przedstawia wykres na rys. 3.23.



Rys. 3.23. Zależność siły rozciągającej mięsień niepobudzony od wydłużenia

Jak widać, prawo Hooke'a nie jest w tym przypadku spełnione. Moduł Younga nie jest stały i jego wartość rośnie w miarę odkształcania mięśnia.

Przy zmniejszaniu siły odkształcającej obserwuje się zjawisko histerezy polegające na tym, że krzywa zależności siły sprężystości od wydłużenia $F = F(l)$ w trakcie rozciągania mięśnia przebiega inaczej niż w trakcie jego swobodnego kurczenia się. Pole zakreskowane na rysunku jest miarą pracy wykonanej przeciw siłom tarcia wewnętrznego, kosztem której wydziela się ciepło.

Przy małych odkształceniach mięsień zachowuje się jak lepka ciecz i odkształca się pod działaniem znikomo małej siły. Dopiero przy większych odkształceniach pojawiają się w mięśniu siły sprężyste, przeciwstawiające się sile odkształcającej. W tym sensie mówi się o *lepko-sprężystych* właściwościach mięśnia.

Z właściwościami lepko-sprężystymi wiążą się zjawiska *relaksacji*. Rozróżniamy dwa rodzaje relaksacji:

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- *relaksację naprężenia* – kiedy po nagłym wydłużeniu i dalszym utrzymywaniu stałej długości mięśnia występujące w nim naprężenie maleje z czasem;

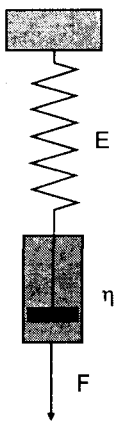
- *relaksację odkształcenia* – gdy przy utrzymywaniu stałej siły odkształcającej długość mięśnia rośnie z czasem; zjawisko to zwane jest również *płynięciem* bądź *pełzaniem*.

Zjawiska relaksacji modeluje się za pomocą tzw. modeli *modeli reologicznych*. Składają się one z elementów sprężystych oraz lepkościowych w postaci tłumików wiskotycznych.

Wielu badaczy proponowało różne modele mięśnia niepobudzonego. Większość z nich bazuje jednak na dwóch podstawowych modelach reologicznych: Maxwella i Kelvina-Voigta.

3.8.1.1. Model Maxwella

Model ten stanowi szeregowe połączenie elementu sprężystego o module Younga E i tłumika o lepkości η (rys. 3.24). Przy takim typie połączenia naprężenie w obu elementach jest jednakowe, zaś odkształcenie całkowite układu jest sumą odkształceń sprężyny i tłumika.



Rys. 3.24. Model Maxwella

Odkształcenie względne sprężyny ε określone jest wzorem

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma}{E}, \tag{3.1}$$

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

co po zróżniczkowaniu względem czasu daje zależność

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{\dot{\sigma}}{E} . \tag{3.2}$$

Naprężenie w tłumiku wiskotycznym jest wprost proporcjonalne do prędkości odkształcenia

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\sigma}{\eta} . \tag{3.3}$$

Dodając (3.2) i (3.3) otrzymujemy

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_s + \dot{\varepsilon}_t = \frac{1}{E}\dot{\sigma} + \frac{1}{\eta}\sigma . \tag{3.4}$$

Jest to równanie stanu modelu Maxwella.

Jeśli założymy, że odkształcenie jest stałe, z równania stanu otrzymamy następujące równanie różniczkowe

$$\dot{\sigma} + \frac{1}{\tau}\sigma = 0 , \tag{3.5}$$

gdzie $\tau = E/\eta$.

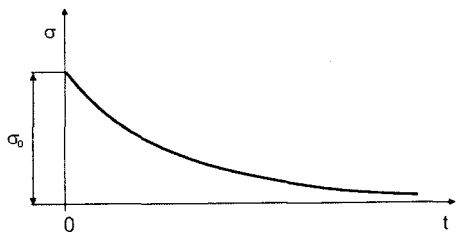
Rozwiązanie równania (3.5) ma następującą postać ogólną

$$\sigma = Ce^{-\frac{t}{\tau}} . \tag{3.6}$$

Przy przyjęciu warunku początkowego $\sigma(0) = \sigma_0$ rozwiązanie (3.6) przybiera formę

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} . \tag{3.7}$$

Wykres naprężenia w funkcji czasu dla modelu Maxwella, przy stałym odkształceniu, przedstawia rys. 3.25.



Rys. 3.25. Przebieg naprężenia w modelu Maxwella (w warunkach izometrycznych)

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rys. 3.25 wskazuje na występowanie w modelu Maxwella *relaksacji naprężeń*. Po czasie $t = \tau$ naprężenie osiąga wartość

$$\sigma(\tau) = \sigma_0 \frac{1}{e} . \tag{3.8}$$

Wzór (3.8) pokazuje, że po czasie τ początkowe naprężenie maleje e razy. Wielkość τ nosi nazwę *czasu relaksacji*.

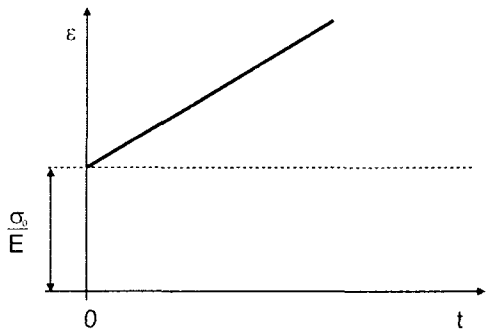
Rozpatrzmy z kolei przypadek, gdy naprężenie w modelu jest stałe, tzn. $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$. Z równania stanu otrzymujemy wówczas:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta} . \tag{3.9}$$

Widzimy, że odkształcenie zmienia się jednostajnie ze stałą prędkością. Całkując równanie (3.9) otrzymujemy wzór określający odkształcenie w funkcji czasu:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_0}{\eta} t . \tag{3.10}$$

Przebieg tej zależności przedstawia rys. (3.26).



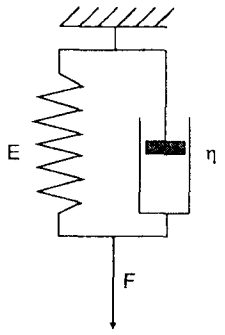
Rys. 3.26. Przebieg odkształcenia w modelu Maxwella (przy stałym naprężeniu)

3.8.1.2. Model Kelvina-Voigta

Model ten składa się z równolegle połączonych elementów sprężystego i tłumiącego. Przy tym typie połączenia oba elementy odkształcają się jednakowo. Całkowity opór układu stawiany obciążeniu zewnętrznemu jest sumą oporu sprężyny i tłumika.

$$F = F_K + F_C . \tag{3.11}$$

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.27. Model Kelvina-Voigta

Reologiczne równanie stanu ma postać

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \ . \tag{3.12}$$

Zakładając, że odkształcenie pozostaje stałe, tzn. $\varepsilon = \varepsilon = \text{const}$, a więc $\dot{\varepsilon} = 0$, otrzymujemy następujące równanie określające naprężenie

$$\sigma = E\varepsilon_0 = \text{const} \ . \tag{3.13}$$

Z równania (3.13) wynika, że przy stałym odkształceniu naprężenie pozostaje stałe. Tak więc, model Kelvina-Voigta nie wykazuje obserwowanej w ciałach rzeczywistych relaksacji naprężeń.

Przyjmijmy teraz, że stałe jest naprężenie, tzn. $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$. Równanie stanu przyjmuje postać

$$\eta\dot{\varepsilon} + E\varepsilon = \sigma_0 \tag{3.14}$$

lub

$$\dot{\varepsilon} + \alpha\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta} \ . \tag{3.15}$$

Równanie (3.15) jest równaniem różniczkowym niejednorodnym. Jego rozwiązanie szczególne ma postać

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_0}{E} \ . \tag{3.16}$$

Rozwiązanie ogólne równania jednorodnego ma formę

$$\varepsilon_j = Ce^{-\alpha t} \ , \tag{3.17}$$

gdzie C jest stałą całkowania.

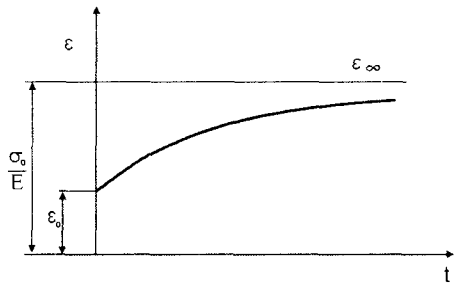
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rozwiązanie ogólne równania (3.15), będące sumą rozwiązania szczególnego równania niejednorodnego i rozwiązania ogólnego równania jednorodnego, ma zatem postać

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + Ce^{-\alpha t} . \tag{3.18}$$

Przyjmując warunek początkowy $\varepsilon(0) = \varepsilon_0$ otrzymujemy

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E}\right) e^{-\alpha t} . \tag{3.19}$$



Rys. 3.28. Przebieg odkształcenia w modelu Kelvina-Voigta (przy stałym naprężeniu)

Wykres równania (3.19) przedstawiony jest na rys. 3.28. Jak widać, wraz z upływem czasu odkształcenie dąży do wartości skończonej

$$\varepsilon_\infty = \frac{\sigma_0}{E} . \tag{3.20}$$

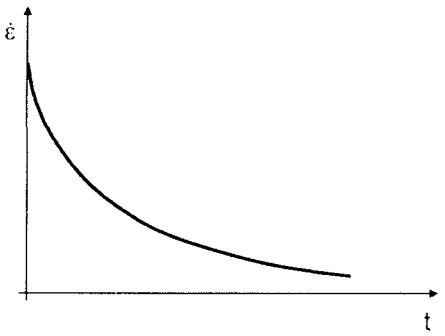
Tak więc w modelu Kelvina-Voigta, przy stałym naprężeniu, mamy do czynienia z *relaksacją odkształcenia*.

Prędkość odkształcenia określona jest wzorem

$$\dot{\varepsilon} = -\alpha \left(\varepsilon - \frac{\sigma_0}{E}\right) e^{-\alpha t} . \tag{3.21}$$

W modelu Kelvina-Voigta początkowo całe obciążenie jest przenoszone przez tłumik, zatem szybkość odkształcenia jest maksymalna. W miarę rozciągania sprężyny jej naprężenie wzrasta, obniżając tym samym naprężenie działające na tłumik. Szybkość odkształcenia dąży do zera w miarę jak zbliża się ono do wartości maksymalnej, przy której naprężenie całkowite równe jest naprężeniu sprężyny.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.29. Przebieg prędkości odkształcenia w modelu Kelvina-Voigta (przy stałym naprężeniu)

3.8.2. Modele mięśnia pobudzonego

3.8.2.1. Równanie Hilla dla mięśnia w stanie skurczu tężcowego

Równanie Hilla (sformułowane przez Archibalda Viviana Hilla[2] w 1938 roku) jest najbardziej znanym równaniem w mechanice mięśni. Ma ono postać:

$$(v + b)(P + a) = b(P_0 + a) \ , \tag{3.22}$$

gdzie: P – siła rozwijana izotonicznie przez mięsień (napięcie mięśnia), v – prędkość skracania mięśnia, a, b – stałe współczynniki, zależne od długości spoczynkowej mięśnia, temperatury, stężenia jonów wapnia, itp., mające odpowiednio wymiar siły i prędkości, P_0 – maksymalna siła rozwijana przez mięsień o długości L_0 w warunkach izometrycznych.

W zgrubnym przybliżeniu, przy pominięciu stałych a i b, równanie (3.22) mówi nam, że wielkość pracy włożonej, a więc wielkość energii uzyskanej z reakcji chemicznych, jest stała. Wydaje się to uzasadnione w przypadku skurczu tężcowego, dla którego równanie zostało napisane.

Równanie Hilla opisuje zdolność mięśnia do skracania się w stanie skurczu tężcowego. Jest to równanie empiryczne bazujące na danych uzyskanych podczas badania mięśnia krawieckiego żaby (*sartorius*). Utrzymywana była stała długość L_0 wiązki mięśniowej, przy stałym zamocowaniu jej końców. Wiązka była stymulowana elektrycznie impulsami o odpowiednio wysokim napięciu i częstotliwości tak, aby uzyskać maksymalne napięcie mięśnia P_0 (będące funkcją jego długości

[2] A.V. Hill został w 1922 r. laureatem nagrody Nobla w dziedzinie medycyny za odkrycia związane z powstawaniem ciepła w mięśniach.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

L_0). W warunkach skurczu tężcowego zupełnego mięsień był gwałtownie zluźniany (przez uwolnienie jednego z końców) i jego napięcie osiągało wartość P mniejszą od P_0. Mięsień zaczynał się niezwłocznie kurczyć i w tym czasie mierzono prędkość skracania v. Związek między P i v przedstawiono na wykresie. Równanie opisujące przebieg badania skonstruowano tak, aby możliwie najlepiej aproksymowało dane uzyskane z doświadczenia.

Równanie Hilla wskazuje na hiperboliczną zależność między P i v. Im większe jest obciążenie, tym mniejsza jest prędkość skracania, i odwrotnie, im wyższa prędkość, tym mniejsze napięcie mięśnia. Zachowanie to kontrastuje z lepkosprężystym zachowaniem materiału biernego (mięśnia niepobudzonego), dla którego wyższa prędkość odkształcenia wiąże się z większymi siłami powodującymi to odkształcenie. Dlatego aktywne skracanie mięśnia nie wykazuje podobieństwa do elastoplastyczności materiału biernego. Oryginalne wyprowadzenie tego równania jest następujące. Zapiszmy przede wszystkim równanie równowagi energii:

$$E = A + W + S \,, \tag{3.23}$$

gdzie: E – wielkość wyzwalanej energii, A – energia aktywacji mięśnia, W – wielkość wykonanej pracy, równa $P \cdot v$, S – ciepło wydzielane podczas skracania mięśnia.

Jeśli mięsień nie ma możliwości skracania się, tzn. pracuje w warunkach izometrycznych, wówczas równanie (3.23) redukuje się do postaci

$$E = A \,, \tag{3.24}$$

tzn. wielkość energii wyzwalanej jest równa energii aktywacji. Gdy mięsień skraca się, pojawiają się dodatkowe reakcje chemiczne, w wyniku których wyzwalana jest dodatkowa energia równa sumie wykonanej pracy i ciepła skracania, tzn. $W + S$ w równaniu (3.23). Mierząc E i A, Hill zidentyfikował człon $W + S$, wielkość dodatkowej energii, i pokazał, że jest on reprezentowany przez równanie empiryczne:

$$S + W = b(P_0 - P) \,, \tag{3.25}$$

gdzie P_0 jest maksymalnym napięciem izometrycznym. Następnie stwierdził doświadczalnie, że

$$S = a v \,. \tag{3.26}$$

Z równań (3.25) i (3.26), wiedząc że $W = P \cdot v$, otrzymujemy

$$S + W = b(P_0 - P) = a \cdot v + P \cdot v \,. \tag{3.27}$$

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Porządkując równanie (3.27) sprowadzamy je do postaci

$$(a + P)v = b(P_0 - P) = b(-P - a) + b \cdot P_0 + a \cdot b \ ,$$

skąd otrzymujemy równanie Hilla w klasycznej formie (3.22).

Największy wkład Hilla polegał na opracowaniu pomysłowych metod dokładnego pomiaru ciepła E, A, W i S. Jego metoda wyprowadzenia równania (3.22) pozwalała nadać stałym a i b interpretację termomechaniczną. Później, stosując technikę szybkiego zamrażania i analizy fosfatowej, inni badacze określili E poprzez pomiar zawartości fosfokreatyny, otwierając tym drogę do biochemicznych badań nad skracaniem mięśni.

W 1935 r., trzy lata przed Hillem, Fenn i Marsh przedstawili związek między v i P w następującej postaci

$$P = A \cdot e^{-v/B} + C \ , \tag{3.28}$$

gdzie A, B i C są stałymi.

Chociaż równanie (3.28) różni się znacznie od równania (3.22) jeśli chodzi o formę, to w zakresie $0 < P < P_0$, $0 < v < v_0$ numerycznie zachowuje się bardzo podobnie. Z kolei Polissar (1952) zaproponował inne wyrażenie

$$v = C\left(k_L \cdot e^{-C_L P} - k_S \cdot e^{C_S P}\right) \ , \tag{3.29}$$

gdzie C, k_L, C_L, k_S i C_S są stałymi.

Mimo istnienia różnych wzorów matematycznych opisujących zależność siły w mięśniu od prędkości jego skracania, najpopularniejsze pozostaje nadal równanie Hilla. Wiele lat po jego opublikowaniu, w roku 1970 Hill przyznał, że lepiej jest traktować równanie (3.22) jako bezpośredni związek *siła-prędkość*, niż jako wyrażenie termomechaniczne, ponieważ poprawione doświadczenia nie zawsze były zgodne z równaniami (3.25) i (3.26).

W 1966 Hill zmienił stałą a w równaniu (3.22) na α w celu odróżnienia jej od poprzedniego znaczenia.

Tak więc, z punktu widzenia biomechaniki, równanie Hilla należy traktować jako równanie empiryczne opisujące związek *siła-prędkość* w mięśniu w stanie skurczu tężcowego, po natychmiastowym uwolnieniu go ze stanu izometrycznego.

3.8.2.2. Bezwymiarowa postać równania Hilla

Podsumujmy wcześniej prowadzone rozważania. Równanie Hilla odnosi się do własności mięśnia szkieletowego w stanie skurczu tężcowego. Wiązka mięśniowa

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

utrzymywana w stanie izometrycznym ma długość L_0. Mięsień jest stymulowany elektrycznie przy częstotliwości wystarczająco dużej, by mógł on osiągnąć stan maksymalnego skurczu (tężcowego) T_0 (od tego momentu używamy T dla określenia napięcia mięśnia w miejsce P). Będący w tym stanie mięsień zostaje następnie uwolniony i osiąga długość L (mniejszą od L_0) lub nowe napięcie T (mniejsze od T_0). Natychmiast po zluźnieniu mierzone są prędkość skracania $v = -\frac{dL}{dt}$ i napięcie mięśnia T. Empiryczną zależność między T i v wyraża równanie Hilla (3.22). Można je zapisać w postaci

$$v = b \cdot \frac{T_0 - T}{T + a}, \tag{3.30}$$

lub

$$T = \frac{bT_0 - av}{v + b} = a\frac{v_0 - v}{v + b}. \tag{3.31}$$

Gdy $T = 0$ prędkość v osiąga swoje maksimum

$$v_0 = \frac{b\,T_0}{a}, \tag{3.32}$$

które występuje w równaniu (3.31). Równania (3.30) i (3.31) możemy zapisać w postaci bezwymiarowej

$$\frac{v}{v_0} = \frac{1 - (T/T_0)}{1 + c(T/T_0)} \tag{3.33}$$

oraz

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1 - (v/v_0)}{1 + c(v/v_0)}, \tag{3.34}$$

gdzie $c = T_0/a$.

Zazwyczaj za v_0 przyjmuje się maksymalną prędkość i oznacza ją przez v_{max}. Jednak gdy przyłożone zostanie małe naprężenie ściskające (tak jak może to być w mięśniu sercowym), prędkość skracania może przekroczyć v_0. A zatem v_0 nie jest maksymalną osiągalną prędkością. Podobnie, jeśli mięsień w stanie skurczu tężcowego przy długości L_0 zostanie rozciągnięty nieco ponad L_0, napięcie może przekroczyć T_0 i wówczas T_0 również nie jest maksymalnym osiągalnym napięciem.

3.9. Anatomiczny podział mięśni

Wyróżnia się trzy metody klasyfikacji mięśni: rozwojową, czynnościową i topograficzną. *Metoda rozwojowa* opiera się na embrionalnym pochodzeniu mięśni.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Metoda czynnościowa dzieli mięśnie na grupy działające na poszczególne stawy. *Metoda topograficzna* klasyfikuje mięśnie wg ich położenia w stosunku do kośćca.

Główne mięśnie szkieletowe człowieka przedstawiono na rysunkach 3.30 i 3.31. Poniżej przedstawiono podział mięśni wg metody topograficznej, najczęściej stosowanej ze względów dydaktycznych [5].

1) Mięśnie grzbietu

A. Powierzchowne mięśnie grzbietu

(i) Mięśnie kolcowo-ramienne (*spinohumerales*)
1. m. czworoboczny (*trapezius*),
2. m. najszerszy grzbietu (*latissimus dorsi*),
3. m. równoległoboczny mniejszy (*rhomboideus minor*),
4. m. równoległoboczny większy (*rhomboideus major*),
5. dźwigacz łopatki (*levator scapulae*),

(ii) Mięśnie kolcowo-żebrowe (*spinocostales*)
1. m. zębaty tylny górny (*serratus posterior superior*),
2. m. zębaty tylny dolny (*serratus posterior inferior*).

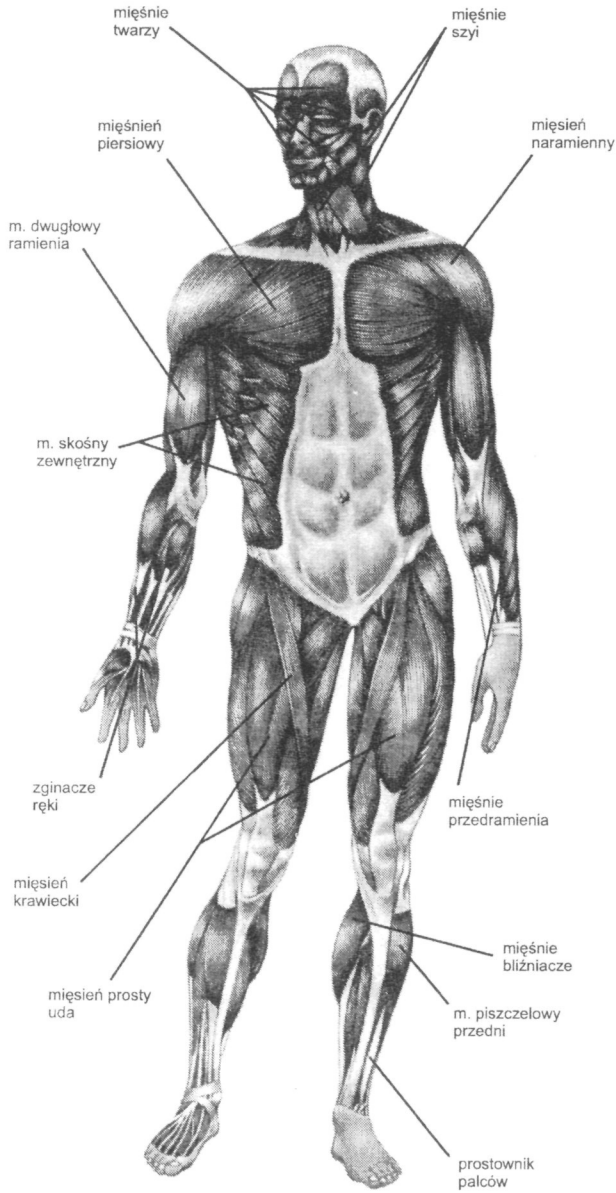
B. Głębokie mięśnie grzbietu

(i) Długie mięśnie grzbietu
1. mm. kolcowo-poprzeczne (*splenii*) – m. płatowaty głowy (*splenius capitis*) + m. płatowaty szyi (*splenius cervicis*),
2. m. krzyżowo-grzbietowy (*sacrospinalis*) – m. biodrowo-żebrowy (*iliocostalis*) + m. najdłuższy (*longissimus*),
3. m. kolcowy (*spinalis*),
4. mm. poprzeczno-kolcowe,
5. m. wielodzielny (*multifidus*),
6. mm. skręcające (*rotatores*),

(ii) Krótkie mięśnie grzbietu
1. mm. międzykolcowe (*interspinales*),
2. m. krzyżowo-guziczny tylny (*sacrococcygeus dorsalis*),
3. mm. międzypoprzeczne (*intertransversarii*),
4. m. krzyżowo-guziczny przedni (*sacrococcygeus ventralis*),
5. mm. dźwigacze żeber (*levatores costarum*),

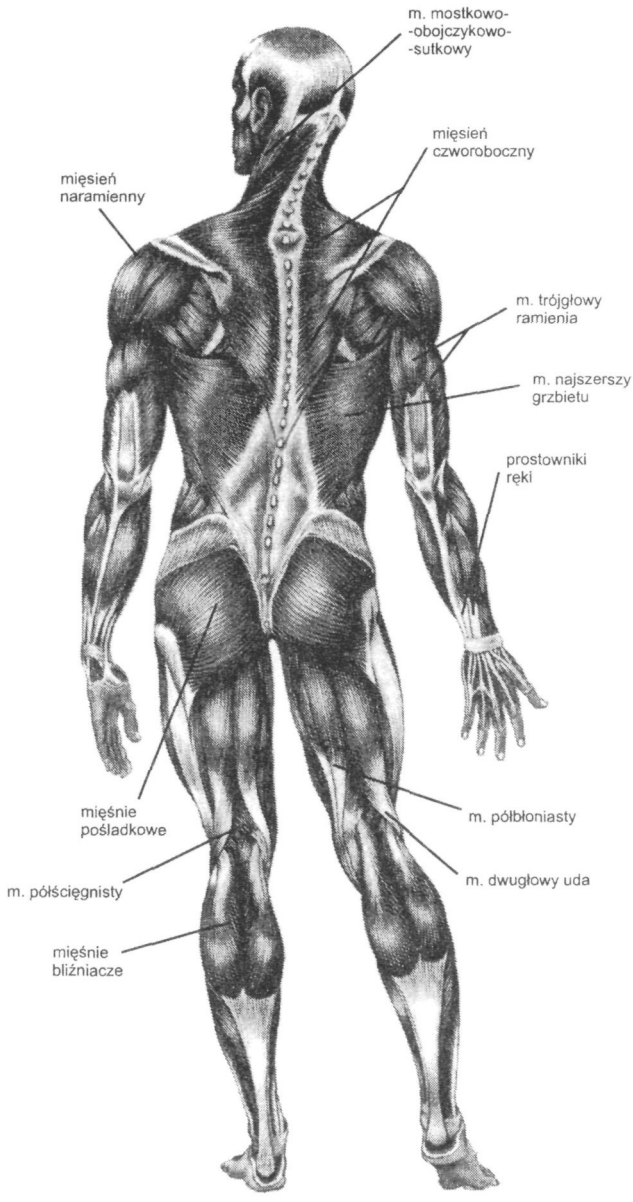
(iii) Mięśnie podpotyliczne (*suboccipitales*)
1. m. skośny górny głowy (*obliquus capitis superior*),
2. m. prosty tylny mniejszy głowy (*rectus capitis posterior minor*),

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.30. Główne mięśnie szkieletowe człowieka – widok z przodu

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.31. Główne mięśnie szkieletowe człowieka – widok z tyłu

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3. m. prosty tylny większy głowy (*rectus capitis posterior major*),
4. m. skośny dolny głowy (*obliquus capitis inferior*),
5. m. prosty boczny głowy (*rectus capitis lateralis*).

2) Mięśnie klatki piersiowej

A. Powierzchowne mięśnie klatki piersiowej

(i) m. piersiowy większy (*pectoralis major*),
(ii) m. piersiowy mniejszy (*pectoralis minor*),
(iii) m. podobojczykowy (*subclavius*),
(iv) m. zębaty przedni (*serratus anterior*),

B. Głębokie (właściwe)

(i) mm. międzyżebrowe (*intercostales*),
(ii) m. poprzeczny klatki piersiowej (*transversus thoracis*),

C. Przepona (*diaphragma*)

3) Mięśnie brzucha

A. Boczne i przednie mięśnie brzucha

(i) m. skośny zewnętrzny brzucha (*obliquus externus abdominis*),
(ii) m. skośny wewnętrzny brzucha (*obliquus internus abdominis*),
(iii) m. poprzeczny brzucha (*transversus abdominis*),
(iv) m. prosty brzucha (*rectus abdominis*),
(v) m. piramidowy (*piramidalis*),

B. Tylne mięśnie brzucha

(i) m. czworoboczny lędźwi (*quadratus lumborum*)

4) Mięśnie szyi

A. Grupa powierzchowna mięśni szyi

(i) m. szeroki szyi (*platysma*),
(ii) m. mostkowo-obojczykowo-sutkowy (*sternocleidomastoideus*),

B. Grupa środkowa mięśni szyi

(i) Mięśnie podgnykowe
1. m. mostkowo-gnykowy (*sternohyoideus*),
2. łopatkowo-gnykowy (*omohyoideus*),
3. m. mostkowo-tarczowy (*sternohyroideus*),

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

4. m. tarczowo-gnykowy (*thyrohyoideus*)

(ii) Mięśnie nadgnykowe

1. m. dwubrzuścowy (*digastricus*),
2. m. rylcowo-gnykowy (*stylohyoideus*),
3. m. żuchwowo-gnykowy (*mylohyoideus*),
4. m. bródkowo-gnykowy (*geniohyoideus*),

C. Grupa głęboka mięśni szyi

(i) Mięśnie pochyłe

1. m. pochyły przedni (*scalenus anterior*),
2. m. pochyły środkowy (*scalenus medius*),
3. m. pochyły tylny (*scalenus posterior*),
4. m. pochyły najmniejszy (*scalenus minimus*),

(ii) Mięśnie przedkręgowe

1. m. prosty przedni głowy (*rectus capitis anterior*),
2. m. długi głowy (*longus capitis*),
3. m. długi szyi (*longus colli*)

5) Mięśnie głowy

A. Mięśnie wyrazowe głowy

(i) Mięśnie sklepienia czaszki

1. m. potyliczno-czołowy (*occipitofrontalis*),
2. brzusiec czołowy (*venter frontalis*),
3. m. skroniowo-ciemieniowy (*temporoparientalis*),

(ii) Mięśnie otoczenia szpary powiek

1. m. okrężny oka (*orbicularis oculi*),
2. m. marszczący brwi (*corrugator supercilii*),
3. m. podłużny (*procerus*)

(iii) Mięśnie otoczenia szpary ust

1. m. szeroki szyi (*platysma*),
2. m. obniżacz wargi dolnej (*depressor labii inferioris*),
3. m. bródkowy (*mentalis*),
4. m. obniżacz kąta ust (*depressor anguli oris*),
5. m. śmiechowy (*risorius*),
6. m. jarzmowy większy (*zygomaticus major*),
7. dźwigacz wargi dolnej i skrzydła nosa (*levator labii superioris alaeque nasi*),
8. dźwigacz wargi górnej (*levator labii superioris*),
9. m. jarzmowy mniejszy (*zygomaticus minor*),

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

10. m. dźwigacz kąta ust (*levator anguli oris*),
11. m. policzkowy (*buccinator*),
12. m. okrężny ust (*orbicularis oris*),

(iv) Mięśnie otoczenia nozdrzy

1. m. nosowy (*nasalis*),
2. m. obniżacz przegrody (*depressor septi*),

(v) Mięśnie małżowiny usznej

1. m. uszny przedni (*auricularis anterior*),
2. m. uszny górny (*auricularis superior*),
3. m. uszny tylny (*auricularis posterior*),

B. Mięśnie żucia

(i) m. skroniowy (*temporalis*),
(ii) m. żwacz (*masseter*),
(iii) m. skrzydłowy przyśrodkowy (*pterygoideus medialis*),
(iv) m. skrzydłowy boczny (*pterygoideus lateralis*).

6) Mięśnie kończyny górnej

A. Mięśnie obręczy kończyny górnej

(i) m. naramienny (*deltoideus*),
(ii) m. nadgrzebieniowy (*supraspinatus*),
(iii) m. podgrzebieniowy (*infraspinatus*),
(iv) m. obły mniejszy (*teres minor*),
(v) m. obły większy (*teres major*),
(vi) m. podłopatkowy (*subscapularis*),

B. Mięśnie ramienia

(i) Grupa przednia mięśni ramienia (zginacze)

1. m. kruczo-ramienny (*coracobrachialis*),
2. m. dwugłowy ramienia (*biceps brachii*),
3. m. ramienny (*brachialis*),

(ii) Grupa tylna mięśni ramienia (prostowniki)

1. m. trójgłowy ramienia (*triceps brachii*),
2. m. łokciowy (*anconeus*)

C. Mięśnie przedramienia

(i) Grupa przednia mięśni przedramienia (zginacze)

- Warstwa powierzchowna

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

1. m. nawrotny obły (*pronator teres*),
2. m. zginacz promieniowy nadgarstka (*flexor carpi radialis*),
3. m. dłoniowy długi (*palmaris longus*),
4. m. zginacz łokciowy nadgarstka (*flexor carpi ulnaris*),
5. m. zginacz powierzchowny palców (*flexor digitorum superficialis*)

- Warstwa głęboka
  1. m. zginacz głęboki palców (*flexor digitorum profundus*),
  2. m. zginacz długi kciuka (*flexor pollicis longus*),
  3. m. nawrotny czworoboczny (*pronator quadratus*),

(ii) Grupa boczna mięśni przedramienia (prostowniki)

1. m. ramienno-promieniowy (*brachioradialis*),
2. m. prostownik promieniowy długi nadgarstka (*extensor carpi radialis longus*),
3. m. prostownik promieniowy krótki nadgarstka (*extensor carpi radialis brevis*),
4. m. odwracacz (*supinator*)

(iii) Grupa tylna mięśni przedramienia (prostowniki)

- Warstwa powierzchowna
  1. m. prostownik palców (*extensor digitorum*),
  2. m. prostownik palca małego (*extensor digiti minimi*),
  3. m. prostownik łokciowy nadgarstka (*extensor carpi ulnaris*),
- Warstwa głęboka
  4. m. odwodziciel długi kciuka (*abductor pollicis longus*),
  5. m. prostownik krótki kciuka (*extensor pollicis brevis*),
  6. m. prostownik długi kciuka (*extensor pollicis longus*),
  7. m. prostownik wskaziciela (*extensor indicis*),

D. Krótkie mięśnie ręki

(i) Mięśnie kłębu kciuka

1. m. odwodziciel krótki kciuka (*abductor pollicis brevis*),
2. m. zginacz krótki kciuka (*flexor pollicis brevis*),
3. m. przeciwstawiacz kciuka (*opponens pollicis*),
4. m. przywodziciel kciuka (*adductor pollicis*),

(ii) Mięśnie kłębu palca małego

1. m. dłoniowy krótki (*palmaris brevis*),
2. m. odwodziciel palca małego (*abductor digiti minimi*),
3. m. zginacz krótki palca małego (*flexor digiti minimi brevis*),
4. m. przeciwstawiacz palca małego (*opponens digiti minimi*)

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

(iii) Mięśnie środkowe dłoni
1. mm. glistowate (*lumbricales*),
2. mm. międzykostne dłoniowe (*interosse palmaresi*),
3. mm. międzykostne grzbietowe (*interosse dorsales*).

7) Mięśnie kończyny dolnej

A. Mięśnie obręczy kończyny dolnej

(i) Grupa przednia mięśni grzbietowych obręczy kończyny dolnej
1. m. lędźwiowy większy (*m. psoas major*),
2. m. lędźwiowy mniejszy (*m. psoas minor*),
3. m. biodrowy (*m. iliacus*)

(ii) Grupa tylna mięśni grzbietowych obręczy kończyny dolnej
1. m. pośladkowy wielki (*m. gluteus maximus*),
2. m. naprężacz powięzi szerokiej (*m. tensor fasciae latae*),
3. m. pośladkowy średni (*m. gluteus medius*),
4. m. pośladkowy mały (*m. gluteus minimus*),
5. m. gruszkowaty (*m. piriformis*)

(iii) Grupa mięśni brzusznych obręczy kończyny dolnej
1. m. zasłaniacz wewnętrzny (*obturator internus*),
2. górny i dolny (*mm. gemelli superior et inferior*),
3. m. czworoboczny uda (*m. quadratus femoris*),
4. m. zasłaniacz zewnętrzny (*m. obturator externus*).

B. Mięśnie uda

(i) Grupa przednia mięśni uda
1. m. krawiecki (*sartorius*),
2. m. czworogłowy uda (*quadriceps femoris*),
3. m. prosty uda (*rectus femoris*),
4. m. obszerny boczny (*vastus lateralis*),
5. m. obszerny przyśrodkowy (*vastus medialis*),
6. m. obszerny pośredni (*vastus intermedius*),
7. m. stawowy kolana (*articularis genus*),

(ii) Grupa przyśrodkowa mięśni uda
1. m. grzebieniowy (*pectineus*),
2. m. smukły (*gracilis*),
3. m. przywodziciel długi (*adductor longus*),
4. m. przywodziciel krótki (*adductor brevis*),
5. m. przywodziciel wielki *adductor magnus*),

(iii) Grupa tylna mięśni uda

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

1. m. półścięgnisty (*semitendinosus*),
2. m. półbłoniasty (*semimembranosus*),
3. m. dwugłowy uda (*biceps femoris*).

C. Mięśnie goleni

(i) Grupa przednia mięśni goleni

1. m. piszczelowy przedni (*tibialis anterior*),
2. m. prostownik długi palców (*extensor digitorum longus*),
3. m. prostownik długi palucha (*extensor hallucis longus*),

(ii) Grupa boczna mięśni goleni

1. m. strzałkowy długi (*peroneus longus s. fibularis longus*),
2. m. strzałkowy krótki (*peroneus brevis s. fibularis brevis*).

(iii) Grupa tylna mięśni uda

- Warstwa powierzchowna
  1. m. brzuchaty łydki (*gastrocnemius*),
  2. m. płaszczkowaty (*soleus*),
  3. m. podeszwowy (*plantaris*),
- Warstwa głęboka
  4. m. podkolanowy (*popliteus*),
  5. m. zginacz długi palców (*flexor digitorum longus*),
  6. m. piszczelowy tylny (*tibialis posterior*),
  7. m. zginacz długi palucha (*flexor hallucis longus*).

D. Krótkie mięśnie stopy

(i) Mięśnie grzbietu stopy

1. m. prostownik krótki palców (*extensor digitorum brevis*),
2. m. prostownik krótki palucha (*extensor hallucis brevis*),

(ii) Mięśnie podeszwy

- Mięśnie wyniosłości przyśrodkowej
  1. m. odwodziciel palucha (*abductor hallucis*),
  2. m. zginacz krótki palucha (*flexor hallucis brevis*),
  3. m. przywodziciel palucha (*adductor hallucis*),
- Mięśnie wyniosłości bocznej
  4. m. odwodziciel palca małego (*abductor digitis minimi*),
  5. m. zginacz krótki palca małego (*flexor digiti minimi brevis*),
  6. m. przeciwstawiacz palca małego (*opponens digiti minimi*),
- Mięśnie wyniosłości pośredniej
  7. m. zginacz krótki palców (*flexor digitorum brevis*),
  8. m. czworoboczny podeszwy (*quadratus plantae*),
  9. mm. glistowate (*lumbricales*),
  10. mm. międzykostne (*interossei*).


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

3.10. Narządy pomocnicze mięśni

Z mięśniami współdziałają tzw. narządy pomocnicze. Należą do nich: powięzie, kaletki maziowe, pochewki ścięgien, bloczki ścięgien i trzeszczki.

Powięzie są to błony utworzone z tkanki łącznej włóknistej otaczające poszczególne mięśnie, grupy mięśni i całą mięśniówkę. Ich grubość jest zmienna, a cechą charakterystyczną jest równoległy układ włókien, zazwyczaj prostopadły do kierunku włókien mięśniowych. Między powięzią a namięsną, błoną pokrywającą bezpośrednio mięsień, występuje cienka warstwa luźnej tkanki łącznej (*paramysium*), pozwalająca na ślizganie się mięśnia podczas skurczu w otoczce powięziowej. Powięź jest więc podczas skurczu nieruchoma i nie bierze udziału w ruchach mięśni, w przeciwieństwie do namięsnej poruszającej się wraz z mięśniami.

Kaletki maziowe są to twory przypominające budową torebki stawowe. Występują one tam, gdzie konieczne jest zmniejszenie tarcia i ułatwienie ślizgania się narządów względem siebie. Ściana kaletki składa się z włóknistej warstwy zewnętrznej i delikatnej maziowej warstwy wewnętrznej.

Pochewka ścięgna występuje w postaci cewki otaczającej ścięgno. Cewka ta, podobnie jak kaletka maziowa, zbudowana jest z zewnętrznej warstwy włóknistej i wewnętrznej warstwy maziowej.

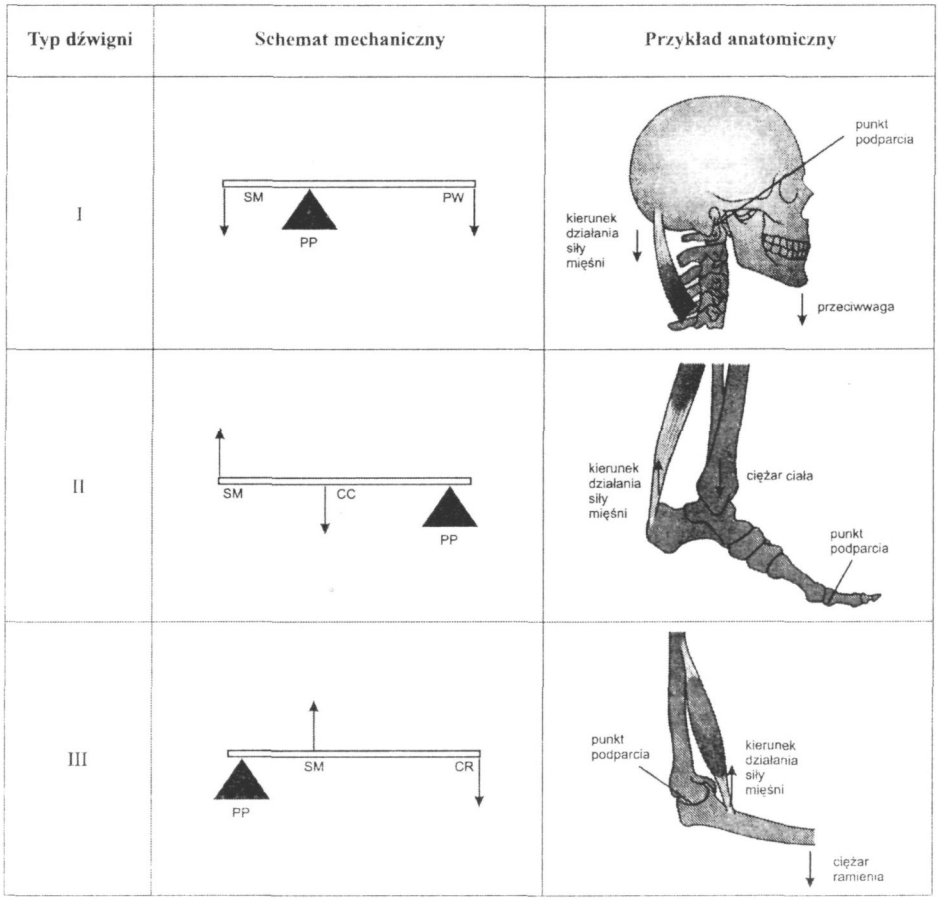
Bloczki mięśni są to chrzęstne lub kostne twory, dokoła których owijają się ścięgna mięśni, zmieniając zazwyczaj kierunek przebiegu i pociągania mięśni. Z mechanicznego punktu widzenia bloczki stanowią punkty podparcia dźwigni.

Trzeszczki są to kostki umiejscowione w ścięgnach mięśni w pobliżu ich przyczepu. Ich działanie jest podobne do działania bloczków, tzn. zmieniają kierunek przebiegu ścięgna.

3.11. Typy dźwigni występujące w układzie ruchu człowieka

Mięśnie można traktować jako silniki biologiczne wprawiające w ruch dźwignie, jakimi są kości. W organizmie człowieka występują trzy rodzaje dźwigni. Rysunek 3.32 przedstawia ich schematy mechaniczne oraz odpowiadające im przykłady anatomiczne.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 3.32. Typy dźwigni występujące w układzie ruchu człowieka

Najczęściej mięśnie pracują w niekorzystnych warunkach mechanicznych, przy przełożeniach dźwigni kostnych nawet w stosunku 10 : 1 (III typ dźwigni, najczęściej występujący w organizmie człowieka).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rozdział 4

Układ nerwowy

Układ nerwowy ma wśród innych narządów i układów ustroju pozycję centralną i jest ich administratorem. Każda bowiem czynność czy zadanie wykonywane przez określony narząd lub układ narządów, pozostaje pod jego ścisłym nadzorem. Za pośrednictwem zmysłów, z którymi jest bezpośrednio – anatomicznie i fizjologicznie – związany, układ nerwowy zapewnia ustrojowi możliwość komunikowania się ze światem zewnętrznym. Potrafi odbierać z zewnątrz najrozmaitsze bodźce (sygnały, informacje), przewodzić je do własnych ośrodków odczytujących ich treść, selekcjonować i wreszcie przetwarzać w zrozumiałe dla siebie pojęcia i wyobrażenia oraz wydawać polecenia zwrotne. Układ nerwowy człowieka w ciągu jednej sekundy odbiera z otoczenia aż 10^9 bitów informacji. Do świadomości dociera jednak znikoma ich część, bo jedynie 10^2 bitów/s. Oznacza to, że przytłaczająca większość informacji docierających do mózgu jest tam przetwarzana w sposób całkowicie nieświadomy.

Informacje, zarówno te, które pochodzą z zewnątrz organizmu, jak i te, które płyną z poszczególnych narządów wewnętrznych, po dotarciu do ośrodkowego układu nerwowego oczywiście nie pozostają bez jego reakcji. Reakcja ta może być natychmiastowa lub opóźniona w czasie, w zależności od bieżących potrzeb. Niektóre sygnały są po zakodowaniu deponowane w mózgu w postaci trwałego lub czasowego śladu pamięciowego.

4.1. Tkanki układu nerwowego

Układ nerwowy zbudowany jest z *tkanki nerwowej* i *tkanki glejowej*, ściśle ze sobą powiązanych. Poza nimi występuje też *tkanka łączna*, która w ośrodkowym

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

układzie nerwowym ogranicza się do opon obejmujących mózgowie oraz rdzeń kręgowy i towarzyszy ich naczyniom krwionośnym, natomiast w układzie obwodowym otacza zwoje i nerwy a także wnika do nich, pokrywając właściwe osłonki komórek zwojowych i włókien nerwowych [5].

4.1.1. Tkanka nerwowa

Podstawową jednostką anatomiczno-czynnościową tkanki nerwowej jest *komórka nerwowa*, inaczej *neuron*. Składa się ona z *ciała* (*somy*, *perikarionu*), licznych zazwyczaj wypustek cytoplazmatycznych noszących nazwę *dendrytów* oraz pojedynczej wypustki osiowej, zwanej *neurytem* lub *aksonem*.

Ciało komórki zawiera z reguły jedno duże *jądro* (stosunkowo rzadko zdarzają się dwa lub więcej jąder). Jądro najczęściej ma kształt zbliżony do kulistego (o wyglądzie pęcherzyka) i jest otoczone błoną jądrową. Wewnątrz jądra leży kuliste *jąderko*, które produkuje kwas rybonukleinowy. Cytoplazma komórki nerwowej (neuroplazma) w istocie podstawowej zawiera submikroskopowe siateczki przestrzenne podwójnych błonek endoplazmatycznych, pokrytych ziarnkami rybosomów bogatych w kwas rybonukleinowy. Z takich warstwowo ułożonych błonek zbudowane są (skupione w sąsiedztwie jądra) *ciałka Nissla (tigroid)* – siedziba intensywnej syntezy ciał białkowych. W cytoplazmie ciała komórki nerwowej i jej wypustek występują również liczne *mitochondria*, zawierające enzymy niezbędne do oddychania komórkowego i wytwarzania energii.

Innym składnikiem komórki nerwowej są włókienka nerwowe, inaczej *neurofibryle*, które w perikarionie tworzą sieć, a w wypustkach komórki nerwowej układają się w równolegle biegnącą wiązkę. Neurofibryle są skupieniem nitkowatych *neurofilamentów*, a w niektórych włókienkach nerwowych mają strukturę cienkich rurek – *neurotubuli*.

Budowa **dendrytów** mało różni się od budowy cytoplazmy ciała komórki nerwowej. Stąd też pochodzi ich druga nazwa – wypustka protoplazmatyczna. Błona plazmatyczna dendrytów pokryta jest również licznymi synapsami. Główne różnice między perikarionem a dendrytami są następujące: brak ciałek Nissla w odległych drobnych rozgałęzieniach dendrytów i pokrycie powierzchni dendrytów krótkimi stożkowatymi kolcami – siedzibą jednej z odmian synaps. Dendryty w warunkach fizjologicznych przewodzą impulsy w stronę perikarionu, czyli dośrodkowo.

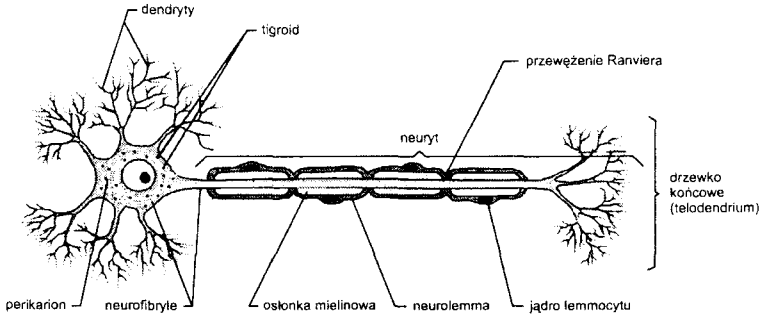
Neuryt ma budowę odmienną niż dendryt, przystosowaną do przewodzenia impulsów nerwowych jako swej czynności głównej. Wypustka ta zaczyna się od ciała komórki (rzadziej od jednego z głównych pni dendrytów), tzw. stożkiem

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

odejścia. Stożek przedłuża się w cienką nić prawie równej grubości. Na końcu neuryt rozgałęzia się na liczne cienkie gałązki, tworzące *drzewko końcowe* (*telodendrium*); synapsami dochodzą one do innych komórek nerwowych.

W neuroplazmie aksonu między neurofibrylami znajdują się drobne ziarniste lub pałeczkowate mitochondria oraz drobne wodniczki poruszajace się wolno z prądem aksoplazmy ku obwodowi aksonu. Neuryt przewodzi impulsy z komórki na obwód, czyli odśrodkowo.

Pewne pojęcie o proporcjach budowy neuronu może dać następujące porównanie: jeśliby ciało neuronu, którego akson biegnie do mięśni stopy, było wielkości piłki tenisowej, to dendryty zajęłyby przestrzeń odpowiadającą średniemu pokojowi, a akson miałby długość ok. 1.5 km (przy średnicy 1 cm). W rzeczywistości typowy neuron wraz z wypustkami zajmuje powierzchnię kilku tysięcznych cm^2.



Rys. 4.1. Ogólna budowa komórki nerwowej

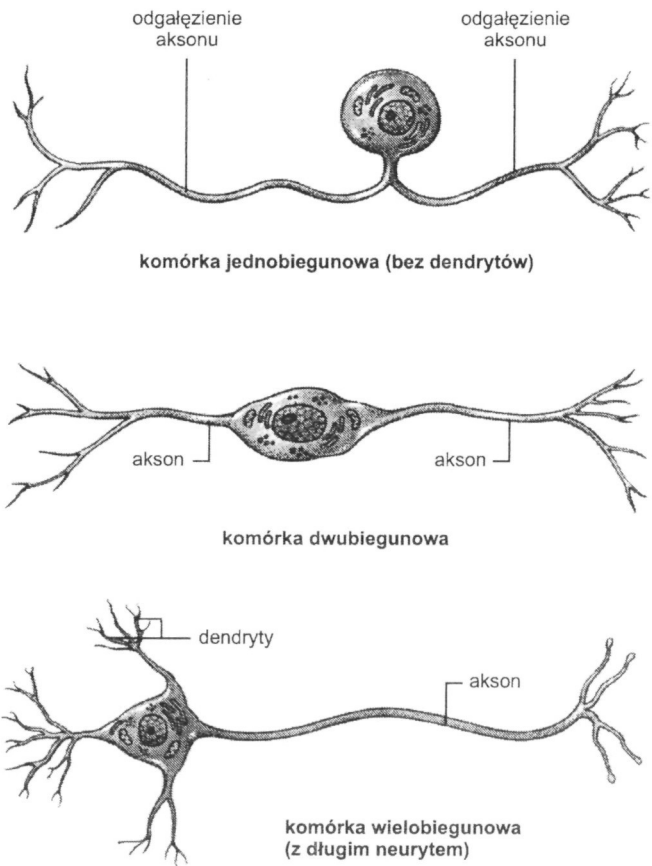
Liczba wypustek w komórce nerwowej może być różna. Biorąc ją za kryterium podziału wyróżniamy komórki jedno-, dwu- i wielobiegunowe (nazwa bierze się stąd, że każda wypustka w miejscu „odejścia" od perikarionu tworzy wybrzuszenie zwane wzgórkiem lub biegunem).

Komórki jednobiegunowe (a właściwie *rzekomojednobiegunowe*) – wyglądają tak, jakby miały tylko jedną wypustkę, rozgałęzioną w pewnej odległości od perikarionu na kształt litery „T". W rzeczywistości są to neurony dwubiegunowe, których obie wypustki w swoich początkowych odcinkach zlały się ze sobą, tworząc wrażenie jednobiegunowości. Są to jedyne neurony, w których dendryty tworzą długie wypustki. Sięgają one do różnych nabłonków i mięśni, skąd przewodzą impulsy do perikarionów tworzących w głębi ciała, przy ośrodkowym układzie nerwowym, tzw. zwoje rdzeniowe i mózgowe. Neuryty tych komórek „wchodzą" do centralnego układu nerwowego i przekazują impulsy innym neu-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

ronom. Ze względu na charakter czynnościowy neurony tej klasy zalicza się do czuciowych (aferentnych). Znaleźć je można np. w jądrze śródmózgowiowym nerwu trójdzielnego.

Komórki dwubiegunowe posiadają dwie wypustki, często obie o charakterze neurytów. Spotykamy je w siatkówce oka, w zwoju przedsionkowym i ślimakowym, ponadto w innych zwojach mózgowiowych i rdzeniowych u płodu i noworodka. Stosunkowo długie neuryty komórek dwubiegunowych przekazują bodźce w nerwie wzrokowym i węchowym do mózgu. Ponieważ tego typu komórki „doprowadzają" bodźce z obwodu do ośrodkowego układu nerwowego, należy zaliczyć je do aferentnych.



Rys. 4.2. Typy komórek nerwowych wg kryterium liczby wypustek [25]

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Komórki wielobiegunowe, najliczniejsze w ośrodkowym układzie nerwowym, mają zawsze jeden neuryt i większą liczbę dendrytów. Komórki te występują w dwóch różnych postaciach, zwanych typami Golgiego.

Przykładem *komórek I typu Golgiego*, zwanego też typem Deitersa, jest komórka ruchowa rogów przednich rdzenia kręgowego. W komórce takiej dendryty mają szeroką podstawę i rozgałęziają się w niedużej od niej odległości na gałązki drugiego i dalszych rzędów. Dendryty często pokryte są stożkowatymi wyrostkami podobnymi do kolców, które powiększają ich powierzchnię. W odróżnieniu od dendrytów neuryt ma powierzchnię gładką i jest znacznie dłuższy od nich (długość jego może przekraczać jeden metr). W niewielkiej odległości od miejsca swego stożkowatego odejścia oddaje on nieliczne cienkie gałązki, tzw. *bocznice*, czyli *kolaterale*, i dopiero w pobliżu swego końca rozgałęzia się na liczne drobne gałązki, tzw. *drzewko końcowe*, czyli *telodendrium*.

Komórki II typu Golgiego w przeciwieństwie do typu I mają neuryt krótki, rozgałęziający się na gałązki końcowe blisko swego wyjścia z ciała komórki. Z wielkością, liczbą i sposobem odejścia wypustek związany jest kształt i wielkość ciała komórki nerwowej. Kształt ten może być zbliżony do kulistego, może być gruszkowaty czy podobny do piramidy lub wrzeciona, najczęściej jednak jest gwiazdkowaty.

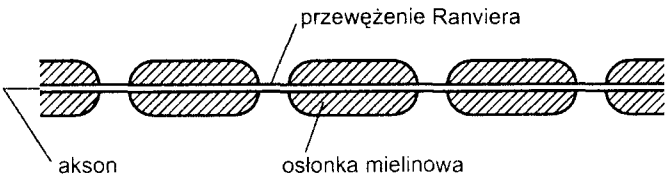
Włóknami nerwowymi nazywamy wypustki komórki nerwowej (zazwyczaj są to neuryty), które kończą się w znacznej odległości od perikarionu. Ich długość u człowieka może wynosić do 1 metra. Jedne włókna mają osłonkę zbudowaną z substancji białkowo-lipidowej, zwanej mieliną, i te nazywamy *włóknami rdzennymi* lub *mielinowymi* (rys. 4.3), inne jej nie posiadają i wówczas noszą nazwę *włókien bezrdzennych* lub *bezmielinowych*.

Mielina pokrywająca włókna rdzenne nie jest ciągłą osłonką aksonu, lecz odcinkowo tworzy przewężenia (*przewężenia Ranviera*). W obwodowym układzie nerwowym (z wyjątkiem nerwu wzrokowego i nerwów węchowych) na osłonce mielinowej znajduje się osłonka komórkowa, zwana *neurolemmą* lub *osłonką Schwanna*. Jest ona utworzona przez komórki noszące nazwę *lemmocytów*. Odcinek leżący między dwoma przewężeniami zawiera tylko jeden lemmocyt. W miejscu przewężenia sąsiadujące ze sobą dwa lemmocyty stykają się swymi wypustkami.

W skład mieliny wchodzą różne lipidy, np. cholesterol, fosfolipidy.

W przewodnictwie nerwowym mielina spełnia funkcję izolatora, a obecność przewężeń Ranviera umożliwia skokowy przekaz impulsów nerwowych (od przewężenia do przewężenia), który jest znacznie szybszy i bardziej energooszczędny

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

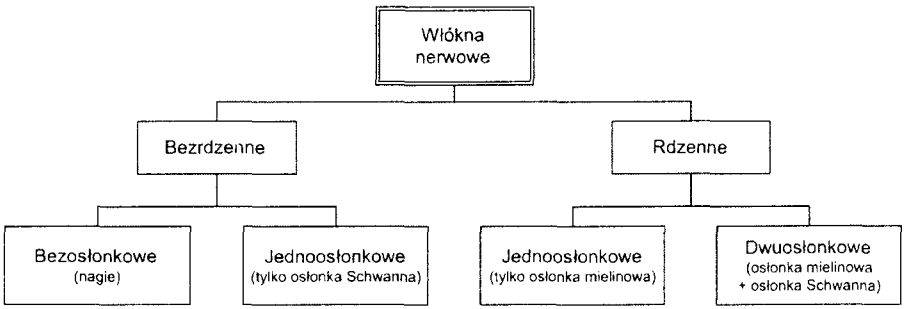


Rys. 4.3. Schematyczny obraz typowego, zmielinizowanego aksonu

w porównaniu z falowym rozprzestrzenianiem się impulsu nerwowego we włóknie bezrdzennym.

Włókna nerwowe w nerwach węchowych nie mają żadnej osłonki i te należą do *bezosłonkowych*, czyli *nagich* (włókna nerwowe z jedną lub dwiema osłonkami w pobliżu perikarionu i w zakończeniu włókna również są nagie).

Część włókien nerwowych jest pokryta tylko jedną osłonką: mielinową lub Schwanna; są to włókna *jednoosłonkowe*.



Rys. 4.4. Podział włókien nerwowych

Podział włókien nerwowych ze względu na rodzaj pokrywającej je osłonki przedstawia schemat zamieszczony na rys. 4.4.

4.1.2. Uszkodzenia i regeneracja tkanki nerwowej

Zmiany zwyrodnieniowe w układzie nerwowym, powstałe wskutek urazów fizycznych, chorób neurodegeneracyjnych oraz procesów starzenia się, prowadzą do poważnych zaburzeń jego funkcji. Układ nerwowy dzięki zdolności do zmian plastycznych może w pewnym stopniu zrekompensować zaburzenia wywołane uszkodzeniem. Jednak w porównaniu z innymi tkankami organizmu jego zdolność do naprawy uszkodzeń jest bardzo mała, albowiem najważniejsze funkcjo-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

nalnie elementy strukturalne układu nerwowego, czyli komórki nerwowe, różnicują się nieodwracalnie w okresie rozwoju i tracą całkowicie (z pewnymi wyjątkami) zdolność do podziału i namnażania się w czasie dorosłego życia.

Lokalnie w miejscu uszkodzenia, np. wskutek urazów fizycznych, zniszczeniu mogą ulec albo ciała komórek nerwowych albo tylko ich aksony. Uraz, który powoduje uszkodzenie ciał komórek nerwowych, nieodwracalnie prowadzi do ich śmierci. Również uszkodzenie włókien aksonalnych neuronów może powodować śmierć tych neuronów. Ponieważ ubytek neuronów nie może być zastąpiony przez nowe komórki, stąd ich śmierć prowadzi zwykle do długotrwałej lub wręcz nieodwracalnej utraty funkcji. Urazy, które powodują zniszczenie jedynie dróg aksonalnych, nie zawsze muszą prowadzić do śmierci macierzystych komórek. W pewnych okolicznościach neurony są zdolne zregenerować uszkodzony akson, odtworzyć jego połączenia z innymi komórkami i przywrócić projekcję sygnałów.

Przecięcie aksonu dzieli go na dwie części. Tę, która pozostaje połączona z neuronem nazywamy *odcinkiem proksymalnym*, natomiast fragment izolowany od komórki wskutek przecięcia – *odcinkiem dystalnym*.

Natychmiast po przecięciu aksonu aksoplazma wycieka na zewnątrz z obu uszkodzonych końców tak długo, aż błona komórkowa aksonu, dzięki fuzji, nie odzyska swojej ciągłości. Oba uszkodzone końce odsuwają się od siebie i ulegają spęcznieniu. Pęcznienie uszkodzonych końców jest skutkiem nagromadzania się produktów metabolicznych przenoszonych zarówno postępującym, jak i wstecznym transportem aksonalnym.

Kolejnym skutkiem przerwania ciągłości aksonu jest szybka utrata przewodnictwa synaptycznego w miejscach zakończeń aksonalnych. Jest to oczywiste w świetle faktu, że synteza większości substancji metabolicznych zachodzi tylko w ciele neuronu i w proksymalnych odcinkach dendrytów.

Akson oraz jego zakończenia synaptyczne są całkowicie zależne od transportu tych substancji z ciała komórki. Bardzo wiele obserwacji potwierdza rzeczywiście bardzo szybki zanik przewodnictwa synaptycznego. Zachodzi on w ciągu kilku godzin od uszkodzenia i często występuje wcześniej niż zmiany morfologiczne w degenerującym odcinku dystalnym przeciętego aksonu. Jednak tempo zaniku przewodnictwa synaptycznego zależne jest od tego, w którym miejscu akson został przecięty. Im krótszy jest odcinek dystalny, tym tempo jest gwałtowniejsze. Po kilku dniach od uszkodzenia, zakończenia aksonu tworzące synapsy wypełniają się splotami neurofilamentów oplatających uszkodzone i obumarłe mitochondria. Około tygodnia po przecięciu aksonu kontakt pomiędzy zakończeniami synaptycznymi a neuronem postsynaptycznym, bądź komórka-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

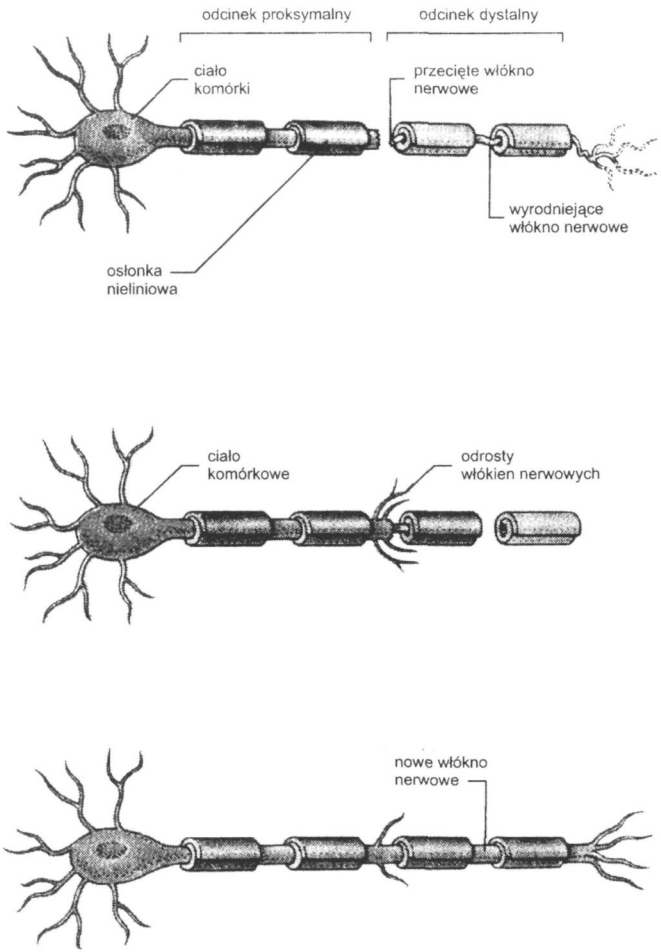
mi docelowymi w przypadku obwodowych dróg nerwowych, zostaje całkowicie zablokowany przez inwazję komórek glejowych, które masowo pojawiają się w miejscu uszkodzenia.

Co dzieje się z obu uszkodzonymi częściami neuronu po przecięciu aksonu? Odcinek dystalny, nawet jeżeli jego neuron macierzysty przeżył uraz, zwykle ulega całkowitemu zanikowi. Proces ten nazywa się *degeneracją walerianowską*, od nazwiska Augusta Wallera, który opisał go w dziewiętnastym wieku. Na początku zanika osłonka mielinowa uszkodzonych włókien. Zbite bryłki splątanych neurofilamentów i mikrotubul wypełniają dystalny odcinek aksonu, powodując jego pęcznienie, a potem rozerwanie na drobne kawałeczki. W obwodowym układzie nerwowym te szczątki aksonu ulegają degeneracji w ciągu dni lub tygodni, podczas gdy w ośrodkowym układzie nerwowym proces ten może trwać kilka miesięcy.

A co dzieje się z odcinkiem proksymalnym i neuronem, którego akson został przecięty? W większości typów neuronów zmiany morfologiczne w ciele komórki pojawiają się już w kilka dni po aksotomii. Neurony tracą swój charakterystyczny kształt, pęcznieją, stają się kuliste i mogą nawet dwukrotnie powiększyć swoje rozmiary. Pęcznieje także jądro neuronu i przesuwa się ze swojej pozycji centralnej ku błonie komórkowej, zwykle w kierunku przeciwnym do wzgórka aksonalnego. Następnie dezintegracji ulega siateczka śródplazmatyczna szorstka. Rozpadające się błony siateczki skupiają się na peryferiach komórki, zamiast otaczać jej jądro tak, jak ma to miejsce w nieuszkodzonych neuronach. Te zmiany metaboliczne odzwierciedlają przypuszczalnie gotowość komórki do podjęcia procesów naprawy i odbudowy uszkodzonych części. Jeżeli neuron z powodzeniem zregeneruje uszkodzony akson, który utworzy nowe połączenia synaptyczne, to wraca on do normalnej postaci morfologicznej i aktywności biologicznej. Niepowodzenie w utworzeniu nowego połączenia synaptycznego z komórką docelową powoduje zwykle atrofię i śmierć neuronu.

Reasumując można stwierdzić, że regeneracja tkanki nerwowej (o ile jest w ogóle możliwa) przebiega powoli i jest procesem bardzo złożonym. W sprzyjających warunkach może doprowadzić do odtworzenia pierwotnej struktury włókna nerwowego i do przywrócenia jego funkcji. Taki wynik można stosunkowo łatwo osiągnąć w przypadku uszkodzenia i przerwania ciągłości włókna nerwu obwodowego, bardzo trudno natomiast w układzie nerwowym ośrodkowym. Kolejne etapy regeneracji aksonu nerwu obwodowego przedstawia schematycznie rys. 4.5.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

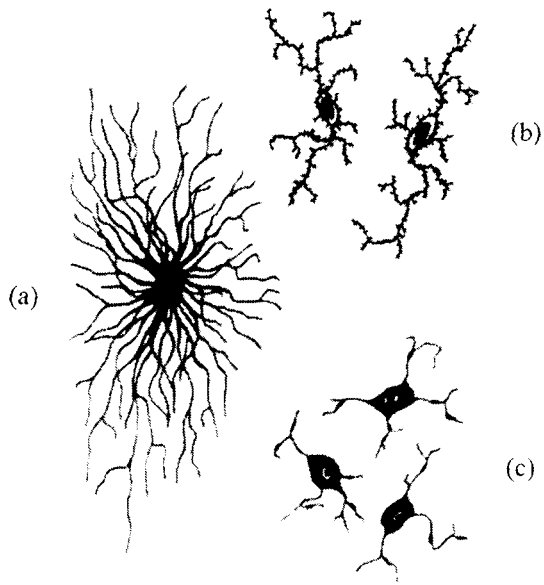


Rys. 4.5. Regeneracja aksonu nerwu obwodowego [25]

4.1.3. Tkanka glejowa

Tkanka glejowa zbudowana jest z tzw. *komórek podporowych*. Są to niepobudliwe komórki, które wypełniają przestrzeń między ciałami neuronów i ich wypustkami, tworząc dla nich podstawę strukturalno-funkcjonalną, swoisty zrąb. Według szacunkowych badań w układzie nerwowym jest 10 razy więcej komórek glejowych niż komórek nerwowych. Stanowią one ok. 50% objętości ośrodkowego

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.6. Typy komórek glejowych: a) astrocyty, b) komórki mikrogleju, c) oligodendrocyty

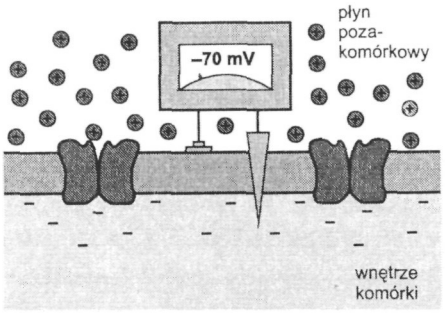
układu nerwowego. W odróżnieniu od neuronów, komórki podporowe nie przewodzą impulsów nerwowych, natomiast chronią i odżywiają neurony. Tkankę glejową cechuje duża różnorodność jej komórek, zarówno pod względem morfologicznym jak i fizjologicznym. Najmniejsze z nich, komórki *mikrogleju*, pochłaniają i niszczą drobnoustroje. Komórki zwane *oligodendrocytami* owijają się swoją błoną cytoplazmatyczną wokół aksonów w mózgowiu i rdzeniu kręgowym, wytwarzając osłonkę mielinową. *Astrocyty*, najliczniejsze spośród komórek glejowych wszystkich typów, tworzą złożone sieci w obrębie szarej istoty mózgu. Swą nazwę zawdzięczają drobnym wypustkom cytoplazmatycznym, nadającym komórce kształt gwiaździsty (gr. *ástron* – gwiazda). Niektóre z wypustek łączą się z kapilarami i uczestniczą w wymianie substancji między krwią a mózgiem oraz rdzeniem kręgowym. *Ependymocyty*, komórki *wyściółki*, pokrywającej wewnętrzną powierzchnię przestrzeni zawartej w ośrodkowym układzie nerwowym i wypełnionej płynem mózgowo rdzeniowym, wspomagają jego krążenie i izolują aksony. W układzie nerwowym obwodowym komórkom glejowym odpowiadają komórki *płaszczowe*, które otaczają komórki zwojowe oraz *komórki Schwanna* tworzące osłonki włókien nerwowych.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

4.2. Przewodnictwo nerwowe

Przewodzenie impulsów nerwowych wyjaśnia *teoria membranowa*. Nazwa związana jest z faktem udziału w tym procesie błony komórkowej neuronów, *neurolemmy*.

W czasie spoczynku, gdy impulsy nie są przewodzone, błona neuronu jest spolaryzowana. Oznacza to, że po obu jej stronach rozmieszczenie ładunków elektrycznych nie jest równomierne. Dokładnie mówiąc, dodatnie jony sodowe dyfundują z wnętrza komórki powodując, że wewnętrzna część błony komórkowej jest naładowana ujemnie. Jest to skutek działania licznych białek aktywnych wbudowanych w błonę neuronu, pracujących jako „pompy sodowo-potasowe". Przerzucają one jony na drugą stronę błony, wbrew gradientowi stężeń – jony Na^+ na zewnątrz, zaś jony K^+ do wnętrza komórki. Różnica potencjału między wewnętrzną a zewnętrzną powierzchnią neurolemmy wynosi –70 mV (nazywa się to *potencjałem spoczynkowym* (rys. 4.7)).



Rys. 4.7. Potencjał spoczynkowy błony komórki nerwowej

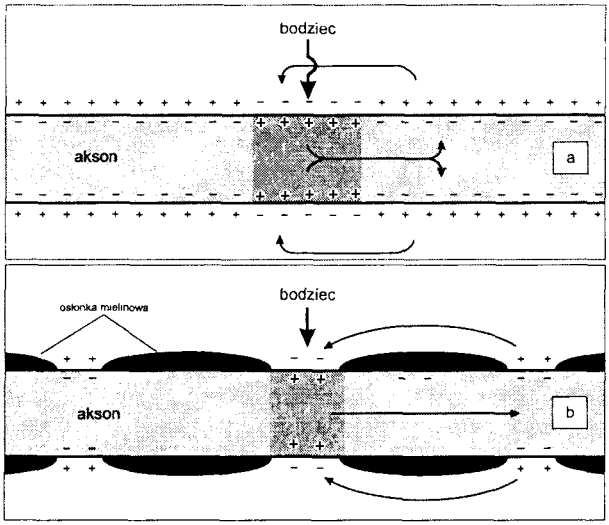
Na skutek działania bodźca niosącego dostatecznie dużą porcję energii (przekraczającą *wartość progową*) następuje lokalne otwarcie się kanałów jonowych, poprzez które jony sodu i potasu gwałtownie zmieniają swoje położenie. Sód przechodzi do wnętrza komórki, a potas przemieszcza się na zewnątrz. Proces ten, noszący nazwę *depolaryzacji*, powoduje lokalną zmianę ładunku wewnętrznej błony komórkowej z ujemnego na dodatni. Osiągnięty zostaje chwilowy stan charakteryzujący się różnicą potencjału +40 mV. Jest to tzw. *potencjał czynnościowy*. Sytuacja ta trwa krótko, ok. 1 ms, po czym kanały jonowe zamykają się i wznawiają swoją działalność pompy sodowo-potasowe przywracając stan początkowy (następuje *repolaryzacja* błony).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Lokalna depolaryzacja wywołuje podobny efekt w sąsiednich rejonach błony. W ten sposób powstaje *fala depolaryzacyjna*, przemieszczająca się wzdłuż błony aksonu.

Prędkość przesuwania się fali depolaryzacyjnej jest wprost proporcjonalna do grubości włókien nerwowych. Istotną rolę odgrywa tutaj występowanie lub brak osłonki mielinowej pokrywającej aksony. We włóknach bezmielinowych (bezrdzennych) fala ma charakter ciągły, a prędkość jej przemieszczania się jest niewielka – wynosi 0.3–2 m/s. Inny jest mechanizm przewodzenia we włóknach z osłonką mielinową (rdzennych). Przewodzą one impulsy skokowo i znacznie szybciej, z prędkoścla od kilku do 120 m/s. Duża szybkość przewodzenia w tym typie włókien spowodowana jest przeskakiwaniem impulsów od pobudzonego do niepobudzonego przewężenia Ranviera oraz tym, że odcinki między przewężeniami Ranviera (odizolowane od płynu tkankowego osłonką mielinową) są bardzo długie i wynoszą od 1 do 3 mm.

Szybkość przewodzenia w nerwach obwodowych maleje przy obniżaniu temperatury lub w trakcie niedokrwienia nerwu, a także wskutek działania różnych czynników uszkadzających (urazy, zatrucia, zaburzenia przemiany materii np. w cukrzycy).



Rys. 4.8. Schemat przewodzenia impulsów nerwowych we włóknach nerwowych: bezrdzennych (a) i rdzennych (b).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Pojedyncze włókno nerwowe przewodzi zgodnie z zasadą „wszystko albo nic", inaczej mówiąc przewodzi albo nie przewodzi, w zależności od tego, czy bodziec ma amplitudę mniejszą czy większą od progowej. Każdy bodziec nadprogowy, niezależnie od jego wartości, powoduje powstanie potencjału czynnościowego o jednakowej amplitudzie, przebiegu i czasie trwania w danym typie włókien. Zasada „wszystko albo nic" obowiązuje w aksonach. W pozostałych częściach neuronu amplituda potencjałów stopniowo rośnie wraz ze wzrostem siły działania bodźca.

4.3. Zakończenia nerwowe – synapsy

Działanie złożonego układu, jakim jest system nerwowy, wymaga przekazywania pobudzenia z jednego elementu na drugi. Przewodzenie impulsu nerwowego z jednej komórki nerwowej na drugą lub z komórki nerwowej na efektor (mięsień, gruczoł) zapewniają styki zwane *synapsami*. Pierwsze z nich nazywają się *międzyneuronalnymi*, drugie – *neuronowo-efektorowymi*.

Synapsa międzyneuronalna jest zazwyczaj stykiem między rozgałęzionym zakończeniem neurytu jednego neuronu a dendrytem (bądź perikarionem) drugiego neuronu. Błona plazmatyczna zakończenia neurytu nazywa się *błoną presynaptyczną*, a błona dendrytu (lub perikarionu) – *błoną postsynaptyczną*.

Ze względu na sposób przekazywania impulsu nerwowego wyróżnia się *synapsy chemiczne* i *synapsy elektryczne*. W synapsie chemicznej między neuronami występuje wąska szczelina synaptyczna, a przewodzenie impulsu jest jednokierunkowe (od neurytu jednego neuronu do dendrytu drugiego neuronu). W synapsie elektrycznej błony synaptyczne przylegają do siebie, a przewodzenie impulsu ma charakter dwukierunkowy.

4.3.1. Budowa synapsy chemicznej

Synapsa chemiczna (rys. 4.9) umożliwia przekazywanie pobudzenia elektrycznego pomiędzy błonami dwu komórek: presynaptycznej (przekazującej pobudzenie) i postsynaptycznej (odbierającej je). Budowa i działanie synapsy chemicznej zostaną omówione na przykładzie *synapsy nerwowo-mięśniowej*. Komórką presynaptyczną jest w tym przypadku komórka nerwowa, której wypustki (aksony) na zakończeniach kontaktujących się z powierzchnią komórki postsynaptycznej (mięśniowej) uformowane są w kształt kolbek – nazywamy je *kolbkami synaptycznymi*. Błona kolbki synaptycznej znajduje się w odległości 30-50 nm od powierzchni błony komórki mięśniowej – przestrzeń pomiędzy tymi błonami

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

nazywamy *szczeliną synaptyczną*. Istotnymi z punktu widzenia pełnionej przez synapsę funkcji elementami kolbki presynaptycznej są: pęcherzyki synaptyczne, napięciowo-zależne kanały wapniowe oraz tzw. strefy aktywne. Pęcherzyki synaptyczne o średnicy ok. 50 nm wypełnione są substancją przenoszącą sygnał chemiczny – *mediatorem* (*transmiterem, neuroprzekaźnikiem*). Mediatory synaps powstają w perikarionie i po zamknięciu w pęcherzyki są transportowane do zakończenia aksonu. Można je podzielić ogólnie na dwie grupy: pobudzające, czyli depolaryzujące błonę postsynaptyczną oraz hamujące, powodujące jej hiperpolaryzację. W połączeniu nerwowo-mięśniowym transmiterem jest acetylocholina (ACh). Innymi mediatorami pobudzającymi są dopamina, adrenalina, noradrenalina, histamina, serotonina. Głównym mediatorem hamującym jest kwas gamma-aminomasłowy (GABA).

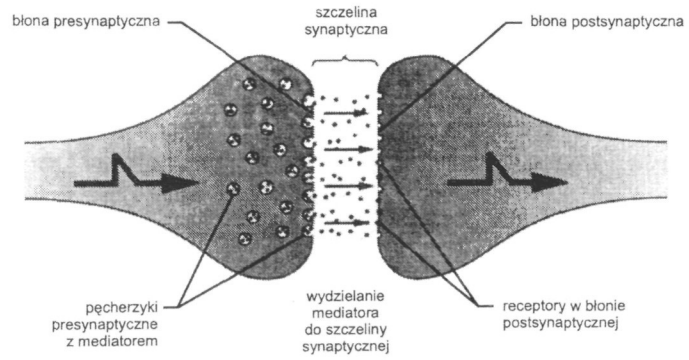
W błonach pęcherzyków znajdują się białka mające za zadanie zakotwiczenie pęcherzyków przy błonie presynaptycznej w rejonie stref aktywnych i następnie umożliwienie fuzji (połączenia się) błon pęcherzyków z błoną presynaptyczną. W szczelinie synaptycznej znajduje się enzym (esteraza acetylocholinowa) rozkładający acetylocholinę na cholinę i octan. W błonie postsynaptycznej znajduje się znaczna liczba kanałów jonowych zależnych od ligandu – receptorów acetylocholiny (AChR) oraz napięciowo-zależnych kanałów sodowych.

Synapsy chemiczne charakteryzują się występowaniem w nich opóźnienia w przekazywaniu potencjału czynnościowego pomiędzy komórkami. Spowodowane jest ono tym, że przetworzenie presynaptycznego potencjału czynnościowego na sygnał chemiczny, przekazanie tego sygnału i przetworzenie go na potencjał czynnościowy postsynatyczny wymaga pewnego czasu. Oprócz tej „wady" synapsy chemiczne posiadają ogromną zaletę, jaką jest bardzo szeroka gama możliwości regulacji ich działania.

4.3.2. Transmisja w synapsie nerwowo-mięśniowej

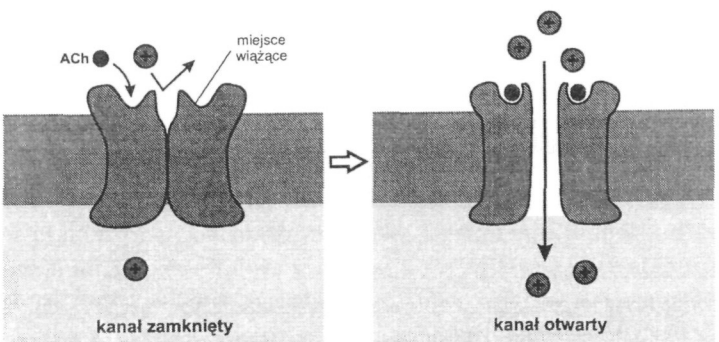
Impuls nerwowy rozchodzący się po błonie komórki nerwowej dociera do zakończenia nerwowego i powoduje otwarcie kanałów wapniowych znajdujących się w błonie kolbki synaptycznej. Jony wapnia napływające do wnętrza kolbki wyzwalają szereg procesów prowadzących do fuzji pęcherzyków synaptycznych z błoną presynaptyczną i wyrzucenia zawartego w nich transmitera do szczeliny synaptycznej. W typowym połączeniu nerwowo-mięśniowym jednorazowo z błoną łączy się około 200–300 pęcherzyków, na skutek czego do szczeliny synaptycznej wyrzucanych jest około 10 000 cząsteczek transmitera. Cząsteczki acetylocholiny dyfundując w szczelinie synaptycznej docierają do powierzch-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.9. Schemat synapsy chemicznej

ni błony postsynaptycznej i przyłączają się do *miejsc wiążących* znajdujących się w cząsteczkach białek kanałów zależnych od ligandu[1]. To z kolei powoduje otwarcie tych kanałów (rys. 4.10); napływ do wnętrza komórki postsynaptycznej (mięśniowej) jonów sodu i w rezultacie jej depolaryzację, nazywaną postsynaptycznym potencjałem pobudzającym (EPSP, ang. *Excitatory PostSynaptic Potential*).



Rys. 4.10. Mechanizm otwierania kanałów sodowych pod wpływem acetylocholiny (ACh)

Jeśli depolaryzacja związana z EPSP przekroczy wartość potencjału progowego dla danej błony, to dzięki obecności w niej napięciowo-zależnych kanałów sodowych wyzwalany jest potencjał czynnościowy komórki postsynaptycznej.

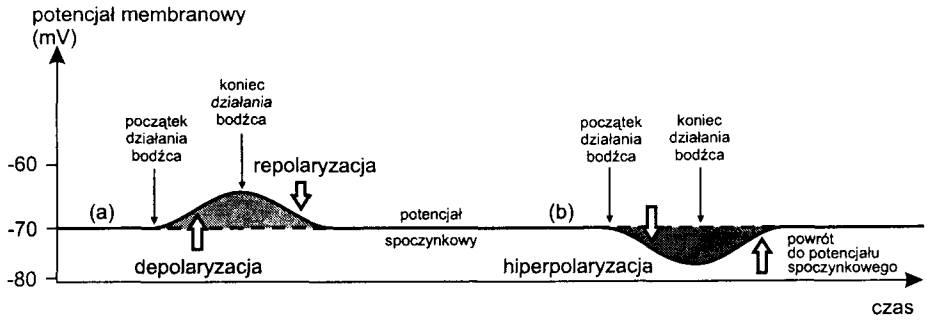
[1]Ligand (substancja sygnałowa, przekaźnik pierwszego rzędu, przekaźnik pierwotny) – jon lub obojętna cząsteczka dołączona do centralnego jonu metalu w związku kompleksowym; aktywuje receptory błonowe.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Cząsteczki acetylocholiny nie mogą długo przebywać w szczelinie synaptycznej – powodowałyby one ciągłe pobudzanie błony postsynaptycznej. Za usuwanie cząsteczek transmitera ze szczeliny synaptycznej odpowiedzialne są trzy mechanizmy: rozkładanie przez enzym (esterazę acetylocholinową), dyfuzyjna ucieczka ze szczeliny oraz ponowne „wciągnięcie" do pęcherzyków synaptycznych (endocytoza). Pewna część pęcherzyków w chwilę po wypuszczeniu transmitera nie wtapia się bowiem w błonę presynaptyczną, ale powraca do wnętrza kolbki synaptycznej.

4.3.3. Synapsy pobudzające i hamujące

Omówiona powyżej synapsa nerwowo-mięśniowa jest przykładem *synapsy pobudzającej*. Sygnał chemiczny przenoszony przez szczelinę synaptyczną powoduje bowiem depolaryzację błony postsynaptycznej, czyli pobudza komórkę do generowania potencjału czynnościowego. Takie działanie synapsy wynika z tego, że sygnał chemiczny otwiera kanały kationo-selektywne – wpuszczające dodatnie jony do wnętrza komórki i powodujące tym samym wzrost potencjału błonowego.



Rys. 4.11. Efekt działania synaps pobudzającej (a) i hamującej (b) w postaci depolaryzacji i hiperpolaryzacji błony komórkowej

W *synapsach hamujących* pojawienie się transmitera w szczelinie synaptycznej powoduje otwieranie się kanałów aniono-selektywnych (chlorkowych). Po otwarciu przepuszczają one ujemne jony chlorkowe Cl^- do wnętrza komórki postsynaptycznej powodując tym samym jej hiperpolaryzację (postsynaptyczny potencjał hamujący, IPSP, ang. *Ihibitory PostSynaptic Potential*). Obniżenie potencjału błonowego utrudnia pobudzenie komórki, bowiem osiągnięcie w tym stanie progu pobudzenia wymaga podniesienia potencjału błonowego o wartość większą niż wówczas, gdy komórka jest w stanie spoczynku.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Zmiany potencjału membranowego związane z działaniem synaps pobudzającej i hamującej przedstawia rys. 4.11.

Synapsy pobudzające i hamujące pełnią bardzo ważną rolę w sterowaniu procesem generowania potencjałów czynnościowych np. komórek nerwowych. Na ich powierzchni znajduje się na ogół wiele połączeń synaptycznych i w związku z tym o pobudzeniu pojedynczej komórki decyduje wypadkowy efekt ich działania. Tego typu sterowanie zachowaniem komórek nerwowych jest podstawą działania sieci neuronowych.

Procesy pobudzania i hamowania umożliwiają eliminację przekazywania impulsów wywołanych bodźcami o małym znaczeniu biologicznym, a wzmacniają przewodzenie impulsów powstałych pod wpływem bodźców o dużym znaczeniu biologicznym.

4.3.4. Synapsy elektryczne

Potencjał czynnościowy może być przekazywany z jednej komórki do drugiej nie tylko za pośrednictwem opisanej wcześniej synapsy chemicznej, ale również poprzez *synapsę elektryczną* nazywaną też *połączeniem szczelinowym*. Tego typu synapsa stanowi bezpośrednie elektryczne połączenie pomiędzy komórkami. Odległość pomiędzy błonami komórek jest w takiej synapsie znacznie mniejsza niż w synapsie chemicznej i wynosi zaledwie około 3–5 nm. W błonach obu kontaktujących się komórek w rejonie złącza znajdują się cząsteczki białka (koneksyny) tworzące razem tzw. *konekson* łączący wnętrza obu komórek. Dzięki temu potencjał czynnościowy z jednej z tych komórek przenosi się bez pośrednictwa etapu chemicznego do drugiej z nich. Zaletą synaps elektrycznych jest niewątpliwie szybkość ich działania – sygnał jest przekazywany pomiędzy komórkami praktycznie bez opóźnienia. W odróżnieniu jednak od synaps chemicznych istnieje znacznie mniej możliwości regulowania ich działania. Z tego względu synapsy elektryczne spotykane są w organizmie jedynie tam, gdzie istnieje potrzeba szybkiego przekazania potencjału czynnościowego praktycznie bez możliwości wyrafinowanego sterowania tym przekazem (np. w niektórych częściach mięśnia sercowego).

4.4. Nerwy

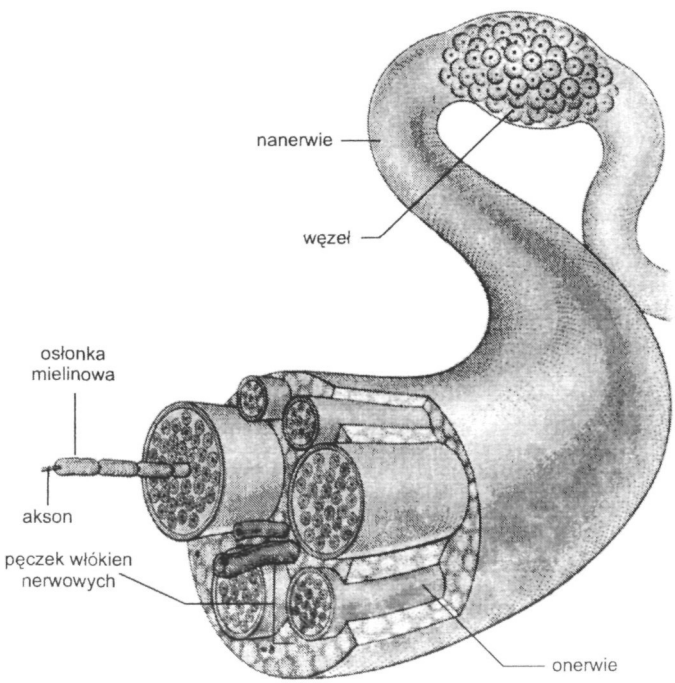
Nerw jest wiązką równolegle biegnących włókien nerwowych (aksonów) spojonych tkanką łączną wiotką. Poszczególne włókna powiązane są tkanką zwaną *śródnerwiem*; tkanka wiotka, która otacza grupy drobnych pęczków, nazywa się

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

onerwiem, zaś otaczająca cały nerw – *nanerwiem*. Razem z tkanką wiotką do środka nerwu wnikają naczynia krwionośne i limfatyczne.

Większość nerwów biegnie do określonego miejsca ciała i zawiera dwa rodzaje włókien: *czuciowe* (*dośrodkowe*, *aferentne*), przewodzące impulsy z receptorów skóry, narządów zmysłów i narządów wewnętrznych do mózgowia i rdzenia kręgowego, oraz *ruchowe* (*odśrodkowe*, *eferentne*), przewodzące sygnały z mózgowia i rdzenia kręgowego do mięśni lub gruczołów. W zależności od składu włókien wyróżnia się nerwy czuciowe, ruchowe i mieszane. Nerwy czuciowe stanowią zbiór włókien neuronów czuciowych, nerwy ruchowe składają się z włókien neuronów ruchowych, a nerwy mieszane (czuciowo-ruchowe) zawierają oba rodzaje włókien.

Najgrubszym nerwem w ustroju jest nerw kulszowy, którego średnica (w odcinku początkowym) wynosi ok. 2 cm. Odgałęzienia nerwu kulszowego unerwiają mięśnie i skórę kończyny dolnej.



Rys. 4.12. Budowa nerwu [25]

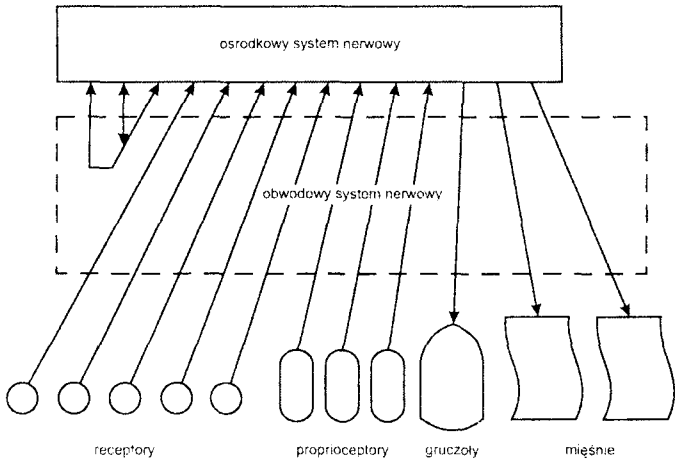
Jeśli włókna nerwowe nie są zorientowane równolegle i biegną w różnych kierunkach, noszą nazwę *splotów*. Przykładem może być *splot słoneczny*.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

4.5. Podział układu nerwowego

Układ nerwowy składa się z trzech zasadniczych części:

- *ośrodkowego* (*centralnego*) układu nerwowego,
- *obwodowego* (*peryferyjnego*) układu nerwowego,
- *autonomicznego* (*wegetatywnego*) układu nerwowego.



Rys. 4.13. Schemat współdziałania ośrodkowego i obwodowego układu nerwowego [27]

4.6. Ośrodkowy układ nerwowy

Ośrodkowy układ nerwowy ma budowę najbardziej złożoną. Jego dolną, mniejszą część, tworzy *rdzeń kręgowy* leżący w kanale kręgowym, natomiast część górną, znacznie większą, tworzy *mózgowie* znajdujące się w jamie czaszki. W mózgowiu można wyróżnić parzyste *półkule mózgu* o powierzchni pofałdowanej, przykryty przez nie *móżdżek* oraz twory leżące na podstawie czaszki (*śródmózgowie*, *most* i *rdzeń przedłużony*) noszące wspólną nazwę *pnia mózgu*. Cały ośrodkowy układ nerwowy okryty jest błonami łącznotkankowymi, które noszą nazwę *opon*. Oddzielają one mózgowie i rdzeń kręgowy od ścian jamy czaszki i kanału kręgowego.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Centralny system nerwowy zawiera skupiska *przetwarzających* informacje komórek i masę włókien i wypustek nerwowych wyspecjalizowanych w *przekazywaniu* sygnałów pomiędzy komórkami. Sieć połączeń tworzy *substancję białą*, w odróżnieniu od *substancji szarej*, na którą składają się komórki przetwarzające informacje.

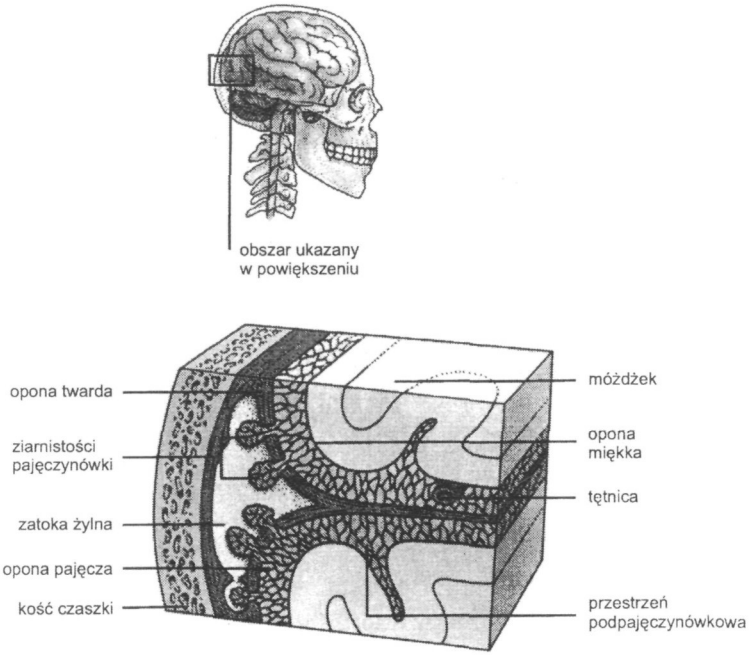
Substancje biała i szara są w ośrodkowym systemie nerwowym rozmieszczone w formie wyraźnie rozgraniczonych skupisk, przy czym w mózgowiu (a zwłaszcza w półkulach mózgowych oraz w móżdżku) obowiązuje zasada, że substancja szara znajduje się na powierzchni, tworząc warstwowo zbudowaną korę. W pozostałej części ośrodkowego układu nerwowego (rdzeniu kręgowym, rdzeniu przedłużonym oraz częściowo w pniu mózgu) obowiązuje ułożenie odwrotne, tzn. szara substancja zajmuje wnętrze odpowiednich struktur, zaś substancja biała pokrywa powierzchnię.

4.6.1. Mózgowie

Mózgowie (rys. 4.15) wypełnia jamę czaszki i jest okryte trzema błonami zwanymi oponami. Czaszkę wyścieła od środka, najbardziej zewnętrznie położona, *opona twarda*, zawierająca tętnice i żyły odżywiające kości czaszki. W oponie twardej znajdują się zamknięte przestrzenie zwane zatokami opony twardej, którymi płynie krew pochodząca ze wszystkich mózgowych naczyń żylnych. Następną (w kierunku do wewnątrz) jest *opona pajęcza* (pajęczynówka), składająca się z „pajęczynowatej" i elastycznej tkanki łącznej. Bezpośrednio przy powierzchni mózgowia znajduje się *opona miękka*. Między tą najgłębiej położoną oponą a pajęczynówką mieści się przestrzeń podpajęczynówkowa, zawierająca naczynia krwionośne i tworząca zbiorniki wypełnione płynem rdzeniowo-mózgowym. Zbiorniki te stanowią część skomplikowanego systemu „wodnego" mózgowia, w skład którego, oprócz jamy podpajęczynówkowej, wchodzą także wewnętrzne śródmózgowe komory: dwie obszerne komory boczne, komora trzecia i komora czwarta oraz przewody je łączące.

Wewnątrzmózgowe przestrzenie płynowe mają połączenie z przestrzeniami płynowymi rdzenia kręgowego. Płyn rdzeniowo-mózgowy, o unikatowym składzie biochemicznym i morfologicznym, jest stale produkowany przez specjalne sploty naczyniówkowe w komorach mózgowia w ilości 650 ml na dobę. Płyn jest swego rodzaju „płaszczem ochronnym mózgowia". Działa on chłodząco (pracujący mózg bardzo szybko się przegrzewa), chroni mózgowie przed urazami mechanicznymi oraz reguluje ciśnienie wewnątrzczaszkowe. Płyn rdzeniowo-mózgowy

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



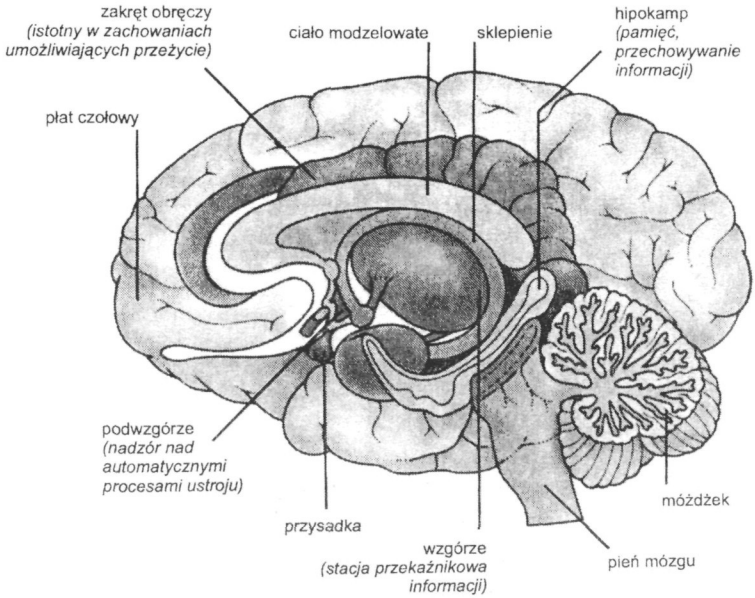
Rys. 4.14. Opony mózgowe [25]

oddzielony jest od krwi specjalną barierą, chroniącą przed mieszaniem się obu płynów ustrojowych i zapewniającą przez to unikatowość jego składu.

Rozwój filogenetyczny mózgowia – zmiany zachodzące w trakcie jego ewolucji – jest wyraźnie zaznaczony zarówno w jego budowie, jak i w funkcjach. Nie stanowi on więc jednorodnej struktury. Dlatego mówimy o mózgowiu (a nie o mózgu), które obejmuje zarówno struktury filogenetycznie stare, jak i młode. Przyglądając się mózgowiu łatwo dostrzec, że na jego „stare" struktury nakładają się młodsze, stanowiąc niejako ich „nadbudowę".

Najlepiej to widać na przykładzie mózgu, czyli kresomózgowia, najmłodszej części mózgowia, który jak płaszcz okrywa inne, filogenetycznie starsze struktury: międzymózgowie, śródmózgowie, most i – częściowo – rdzeń przedłużony (śródmózgowie, most i rdzeń przedłużony tworzą tzw. pień mózgu). Jedynie móżdżek nie jest „okryty" przez kresomózgowie, choć należy on do starszych filogenetycznie struktur mózgowia.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.15. Mózgowie [25]

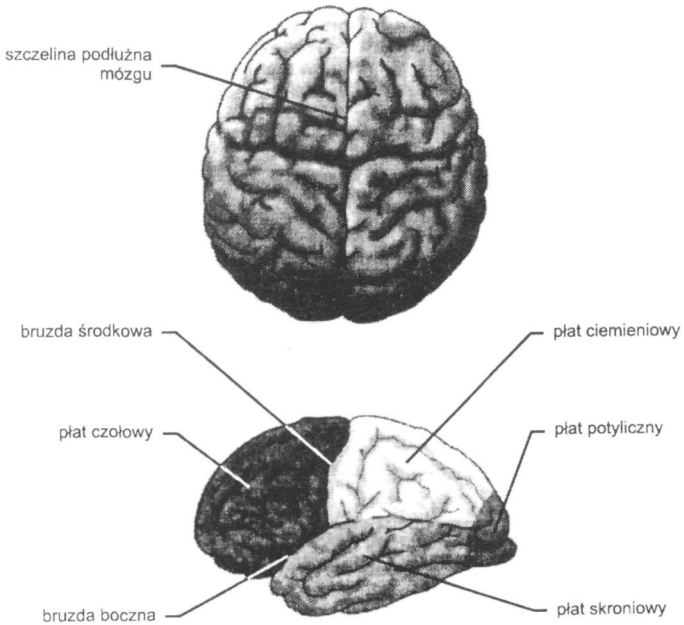
4.6.1.1. Mózg (kresomózgowie)

Mózg (kresomózgowie) skupia ponad połowę wszystkich neuronów układu nerwowego. Jego przeciętne wymiary są następujące: wymiar podłużny – tj. od czoła do potylicy – ok. 16 cm, wymiar poprzeczny – pomiędzy skroniami – – ok. 14 cm, wymiar pionowy – liczony od podstawy ku szczytowi – ok. 12 cm.

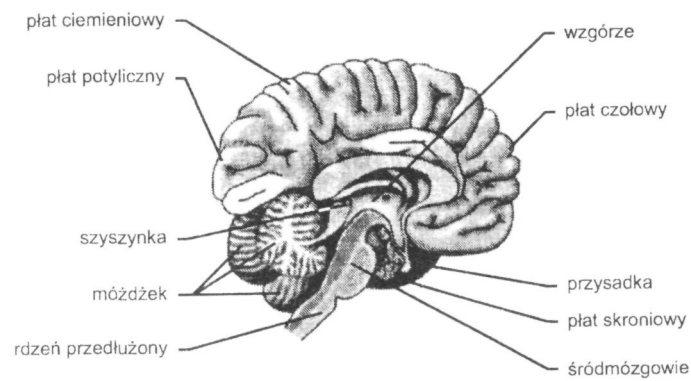
Do sklepienia czaszki mózg przylega swoją powierzchnią wypukłą, zwaną inaczej powierzchnią grzbietowo-boczną. Od dołu poprzez podstawę, czyli powierzchnię podstawną opiera się on na kościach oddzielających mózgoczaszkę od twarzoczaszki i oczodołów.

Od góry widać, że mózg jest narządem parzystym. Ma on bowiem dwie półkule, lewą i prawą (rys. 4.16). Pomiędzy nimi znajduje się głęboka podłużna szczelina, na dnie której znajduje się przebiegające ku podstawie tzw. *spoidło wielkie*, utworzone przede wszystkim przez liczne drogi nerwowe łączące obie półkule. Powierzchnia mózgu jest wyraźnie pofałdowana. Widoczne są na niej dość głębokie *bruzdy*, pomiędzy którymi znajdują się fałdy, zwane *zakrętami* mózgu. Zakręty tworzą większe anatomiczne struktury – *płaty* mózgu. Podłużna bruzda dzieli mózgowie na dwie półkule, natomiast bruzdy boczna i środkowa

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.16. Mózg – widok z góry i z boku



Rys. 4.17. Mózg – widok strzałkowy

dzielą każdą z półkul na 4 płaty (rys 4.16): *czołowy*, *skroniowy*, *ciemieniowy* i *potyliczny*. Od przodu widoczne są dwa płaty czołowe, z lewego i prawego boku – płaty skroniowe; od góry, za płatami czołowymi, znajdują się dwa płaty ciemieniowe, a za nimi dwa płaty potyliczne. Pod widocznymi od góry płatami:

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

czołowym, skroniowym i ciemieniowym, chowa się jeszcze jeden, piąty, parzysty płat. Jest to tzw. *wyspa*. Anatomiczne granice między płatami nie są bardzo wyraźne, często jeden płat przechodzi wprost w drugi.

Powierzchnię zakrętów i wnętrza bruzd prawej i lewej półkuli pokrywa *kora mózgu*. Jej powierzchnia wynosi ok. 2200 cm^2, a grubość – do 4.5 cm. U człowieka ponad 40% kory przypada na płaty czołowe. Na przekroju podłużnym widać, że kora składa się z dwóch warstw: *istoty szarej*, utworzonej przez sieć 9 miliardów komórek nerwowych – neuronów (2/3–3/4 wszystkich komórek mózgu), tworzących w korze filogenetycznie młodszej, czyli „nowej", aż sześć warstw (w korze "starej", stanowiącej niewielką część mózgu, tych warstw jest o połowę mniej), oraz *istoty białej* – w skład której wchodzą przede wszystkim włókna nerwowe i tkanka glejowa oraz naczynia krwionośne. W głębi półkul znajdują się otoczone istotą białą osobne skupiska istoty szarej, nie mające bezpośredniej łączności z korą – zwane *jądrami podkorowymi* albo *jądrami podstawnymi*.

W korze można zlokalizować pola, które zasadniczo różnią się między sobą spełnianą funkcją. I tak, w tylnej części płatów czołowych zlokalizowana jest tzw. *kora ruchowa*, która zawiaduje ruchami zamierzonymi. Z elektrofizjologicznych badań wynika, że każda część narządu ruchu, a dokładniej grup mięśniowych, ma tam swoją reprezentację. Największą mają ręce, szczególnie palce oraz mięśnie twarzy i języka, wyraźnie mniejszą – tułów i kończyny dolne. Jest to zrozumiałe zważywszy, jak skomplikowane czynności może wykonać ludzka ręka, czy – jak złożone ruchy wykonują mięśnie mimiczne, np. podczas artykulacji ludzkiej mowy. Ruch (motoryka) ma swą reprezentację także w jądrach podkorowych (jądro ogoniaste, jądro soczewkowate, ciało migdałowate), których zadaniem jest, między innymi, wytworzenie napędu ruchowego oraz regulowanie napięcia mięśni i korygowanie (czynienie jej zgodnej z powziętym zamiarem) czynności motorycznej inicjowanej w korze.

Oprócz kory ruchowej jest też *kora czuciowa* – zlokalizowana w płatach ciemieniowych, w której analizowane jest czucie powierzchowne i głębokie, następnie *kora słuchowa* – w płatach skroniowych oraz *kora wzrokowa* – w płatach potylicznych.

Węch też ma swoją reprezentację w mózgu. *Kora węchowa* znajduje się w jego części podstawnej (pod płatami czołowymi) i jest utworzona przez położone zewnątrzmózgowo opuszki i pasma węchowe oraz struktury znajdujące się wewnątrz mózgu. Kora węchowa jest najstarszą filogenetycznie częścią kresomózgowia (tzw. kora „stara").

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Bardzo ważną rolę w mózgowiu odgrywają płaty czołowe. To w nich w dużej mierze jest kształtowana nasza osobowość, zdolność do myślenia i wyrażania woli. Prawdopodobnie nasze uczucia też tam mają swój prapoczątek.

Niektóre obszary płatów czołowych i ciemieniowych oraz inne struktury korowe, takie jak hipokamp, część kory węchowej, a także niektóre struktury położone poza korą, np. ciało migdałowate, tworzą tzw. *układ limbiczny*, który kieruje naszymi zachowaniami, emocjami i jest miejscem powstawania popędów. Na dodatek układ limbiczny poprzez inne struktury pozakorowe (np. podwzgórze, o którym będzie mowa dalej) ma wpływ na czynności narządów wewnętrznych. Jest on dlatego nazywany czasem mózgowiem trzewnym.

Oprócz pól kory mózgowej, których rola jest wyraźnie określona i związana z poszczególnymi czynnościami organizmu, a przede wszystkim z przetwarzaniem bodźców pochodzących z narządów zmysłów oraz z motoryką, jest też w mózgu kora niespecyficzna, w której dokonuje się analiza zjawisk powstających wewnątrz ośrodkowego układu nerwowego. Jest to tzw. *kora asocjacyjna*, zlokalizowana w płatach czołowych, a także – w mniejszym zakresie – w płatach skroniowych, ciemieniowych i potylicznych. To w niej zachodzi zjawisko integracji różnych funkcji kory, czyniąc je spójnymi, adekwatnymi do powziętych zamiarów. Tam też jest przeprowadzana analiza okoliczności zewnętrznych, poprzedzająca wydanie dyrektywy (polecenia) wykonania określonej czynności. W korze asocjacyjnej dokonywana jest analiza zasobów pamięci i tam też pamięć jest na bieżąco wykorzystywana. Częścią kory mającą istotny udział w procesie zapamiętywania jest tzw. kora stara (5% kory), zwłaszcza zaś *hipokamp*, położony wewnątrz mózgu. Współcześnie uważa się, że to właśnie hipokamp tworzy ślady pamięci w określonych polach kory asocjacyjnej, tworzących osobne „wyspy pamięci", a następnie – w miarę potrzeby – sam je odczytuje. Uszkodzenia hipokampa powodują, że człowiek nie potrafi płynnie korzystać ze swoich zasobów pamięci.

Kora jest miejscem powstawania świadomości, na którą składają się takie umiejętności, jak zdolność do abstrakcji czy umiejętność wyrażenia za pomocą słów powstałych myśli, zdolność do wąskiego ukierunkowania uwagi.

Świadomość to także samoświadomość, a więc poczucie tożsamości i odrębności osobniczej. Częścią świadomości jest mowa. W mózgu człowieka jest unikatowa struktura zwana *ruchowym ośrodkiem mowy* (*ośrodek Broca*). Znajduje się zwykle (u praworęcznych) w korze lewej półkuli.

Istota biała kory mózgowej jest utworzona przez liczne szlaki (drogi) nerwowe, łączące poszczególne części kory ze sobą oraz ze strukturami pozakorowymi mózgu. Są więc drogi korowo rdzeniowe, korowo-jądrowe, korowo-podkorowe,

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

itd. Wszystkie drogi wychodzące z półkul i biegnące do innych części mózgowia mają wachlarzowaty wygląd; zbiegając się, tworzą konary mózgu. Szczególną rolę odgrywają szlaki kojarzeniowe, których sprawność („drożność") określa naszą inteligencję. Człowiek w dorosłym życiu codziennie traci określoną liczbę neuronów, co nie oznacza, że z każdym dniem jest intelektualnie słabszy. Mniej ważna jest bowiem liczba utraconych komórek niż utrzymanie prawidłowych połączeń pomiędzy pozostałymi.

Półkule mózgu z pozoru są jednakowe. W rzeczywistości – zarówno morfologicznie, jak też (przede wszystkim) funkcjonalnie – dość zasadniczo różnią się między sobą. Zawsze jedna z półkul dominuje nad drugą, z reguły jest to półkula lewa (u osób praworęcznych). W niej na przykład zlokalizowane są ośrodki mowy związane z jej rozumieniem, zapamiętywaniem i odtwarzaniem, także w formie pisanej. W drugiej półkuli (zazwyczaj prawej) znajdują się ośrodki zawiadujące orientacją w przestrzeni, zapamiętywaniem, odtwarzaniem i porównywaniem wrażeń wzrokowych i słuchowych. Prawej półkuli przypisywane są również zdolności artystyczne.

4.6.1.2. Móżdżek

Z tyłu za półkulami mózgu znajduje się kolejna, wyraźnie wyodrębniona część mózgowia – móżdżek. Wypełnia on tylną część dołu czaszki. Ma kształt spłaszczonej elipsoidy o długości 9–11 cm, szerokości 5–6 cm i wysokości – 5 cm.

Móżdżek, podobnie do mózgu, dzieli się na dwie półkule oddzielone tzw. *robakiem*, krótką walcowato wydłużoną strukturą. Półkule móżdżku mają liczne równolegle biegnące, wąskie zakręty, oddzielone szczelinami. Są podzielone na płaty i płaciki. Móżdżek, podobnie jak mózg, posiada istotę szarą, czyli korę szarą oraz znajdującą się pod nią – istotę białą, tworzącą tzw. *ciało rdzenne*. W istocie białej znajdują się osobne skupiska istoty szarej. Są to tzw. *jądra móżdżku*. Ciekawe, że kora móżdżku jest znacznie bardziej pofałdowana niż kora mózgu. Móżdżek jest znacznie mniejszy od mózgu (stanowi 1/7 jego objętości); jego powierzchnia jednak, dzięki pofałdowaniu, osiąga aż 3/4 powierzchni półkul mózgu.

Kora móżdżku utworzona jest przez komórki nerwowe, neurony. Ciało rdzenne, z wyjątkiem jąder, jest utworzone przez włókna nerwowe. Te włókna formują drogi nerwowe, własne – wewnątrzmóżdżkowe oraz drogi doprowadzające pobudzenia do móżdżku i drogi odmóżdżkowe. Drogi grupują się, tworząc konary móżdżku: górny, środkowy i dolny, i łączą móżdżek z innymi częściami mózgowia.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Móżdżek jest ośrodkiem kierującym ruchami. Koordynuje je, a także wpływa na postawę. Kieruje też ruchami gałek ocznych, optymalizując i korygując ruchy całego ciała. Od sprawności móżdżku zależy zdolność utrzymywania równowagi. Móżdżek ma ścisłe fizjologiczne powiązania ze zmysłem równowagi zlokalizowanym w uchu wewnętrznym.

Na dodatek móżdżek programuje motorykę: inicjuje, koordynuje i kończy ruchy celowe. Jest też „dystrybutorem mocy"; decyduje bowiem o sile skurczu mięśni szkieletowych.

4.6.1.3. Międzymózgowie i podwzgórze

Na podstawie mózgu widoczny jest fragment kolejnej osobnej struktury mózgowia zwanej międzymózgowiem. Widziany w całości ma klinowaty kształt ostrzem skierowanym do przodu. Z przodu i z boku zrasta się z półkulami mózgu. Jego dolna, podstawna część to podwzgórze – bardzo ważna struktura mózgowia, kontrolująca czynności wegetatywne organizmu, takie jak pobieranie pokarmu, wody, termoregulacja. Podwzgórze wpływa na bieżącą czynność układu krążenia. Kontroluje i reguluje funkcje płciowe, ma wpływ na sen. Integruje czynności wpływające na stan środowiska wewnętrznego ustroju. Jest też miejscem powstawania napędów, które pobudzają do zachowań zgodnych z bieżącymi potrzebami ustroju. W tym zakresie jest fizjologicznie sprzężone z układem limbicznym, bowiem właśnie w podwzgórzu rodzą się podstawy zachowań tworzących reakcję alarmową.

W podwzgórzu wytwarzane są neurohormony, regulujące hormonalną czynność przysadki. Ich produkcja jest ściśle powiązana ze stanem hormonalnym ustroju i aktywność podwzgórza wpływa na homeostazę hormonalną.

Z podwzgórzem związany jest strukturalnie i funkcjonalnie niewielki narząd wydzielania wewnętrznego – przysadka, położony na dnie mózgoczaszki w tzw. siodle tureckim. Z podwzgórzem łączy się za pomocą powrózkowatej struktury, zwanej lejkiem. Tylny płat przysadki jest miejscem wydzielania do krwi hormonów wyprodukowanych w podwzgórzu – wazopresyny (hormonu antydiuretycznego) i oksytocyny. W przednim płacie przysadka sama produkuje i wydziela do krwi hormony, takie jak: ACTH, FSH, GH, LH, FSH, pozostając pod także hormonalną kuratelą podwzgórza.

W skład międzymózgowia wchodzą także: wzgórze z ponad 100 jądrami, pasma wzrokowe, ciało kolankowate oraz szyszynka. Jądra wzgórza są stacjami przekaźnikowymi bodźców płynących z różnych struktur mózgowia. Najważniejsze z nich to jądra asocjacyjne, które czynnościowo są sprzężone z korą mózgo-

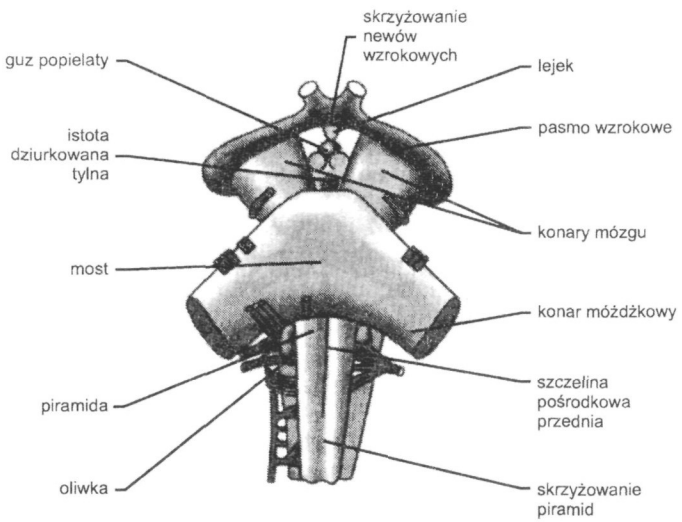
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

wą w zakresie integracji pobudzeń czuciowych, płynących z rdzenia kręgowego. Aktywność jąder wzgórza ma także wpływ na nastroje i samopoczucie.

Szyszynka jest narządem międzymózgowia, której funkcja nie została do końca wyjaśniona. Szyszynka prawdopodobnie hamuje czynność gruczołów płciowych aż do okresu dojrzewania, ma także wpływ na dobową chronobiologię – na rytm dobowy (dzień-noc) człowieka, bowiem filogenetycznie jest narządem zmysłu światła.

4.6.1.4. Śródmózgowie i most

Śródmózgowie jest krótkim odcinkiem pnia mózgu utworzonym przez parzyste grube pasma istoty białej, zwane konarami mózgu, które biegną do półkul mózgu. Na schowanej (okrytej przez płaszcz kory mózgu) powierzchni grzbietowej śródmózgowia znajdują się ważne skupiska komórek nerwowych. Są to m.in. jądra niektórych nerwów czaszkowych.



Rys. 4.18. Rdzeń przedłużony i most

Śródmózgowie przechodzi w most, w skład którego wchodzą zarówno „białe" włókna nerwowe, jak i istota szara, którą tworzą skupiska neuronów. Most jest uwypukleniem ku podstawie pnia mózgu z charakterystycznym zagłębieniem w środku. Ma pofałdowaną powierzchnię, przechodzącą z boku w grube

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

konary móżdżku. Znajdują się w nim, tak jak w śródmózgowiu, jądra nerwów czaszkowych, m.in. nerwu trójdzielnego i twarzowego.

4.6.1.5. Twór siatkowaty

Znaczną część wnętrza mostu zajmuje struktura bardzo ważna dla całego ośrodkowego układu nerwowego. Jest to tzw. twór siatkowaty. W jego skład wchodzą liczne neurony, tworzące skupiska zwane jądrami tworu siatkowatego oraz włókna nerwowe przebiegające w różnych kierunkach ku poszczególnym częściom mózgowia.

Obszarowo twór siatkowaty przekracza granice mostu, sięgając z jednej strony (część zstępująca) – niżej położonego rdzenia przedłużonego, a nawet szyjnej części rdzenia kręgowego, z drugiej (część wstępująca) – śródmózgowia, a nawet struktur podkorowych, usytuowanych w pobliżu kory. W tworze siatkowatym zbiegają się drogi doprowadzające pobudzenia powstałe we wszystkich narządach zmysłu, w tym płynące z rdzenia kręgowego oraz pochodzące z jąder podkorowych. Część wstępująca tworu siatkowatego rozprowadza impulsy do wszystkich pól kory, do ośrodków podkorowych, kierujących zachowaniem oraz do ośrodków kontrolujących układ autonomiczny i nadzorujących układ dokrewny. Część zstępująca tworu siatkowatego sprawuje nadzór nad czynnością rdzenia kręgowego, wpływając na stan napięcia mięśni szkieletowych.

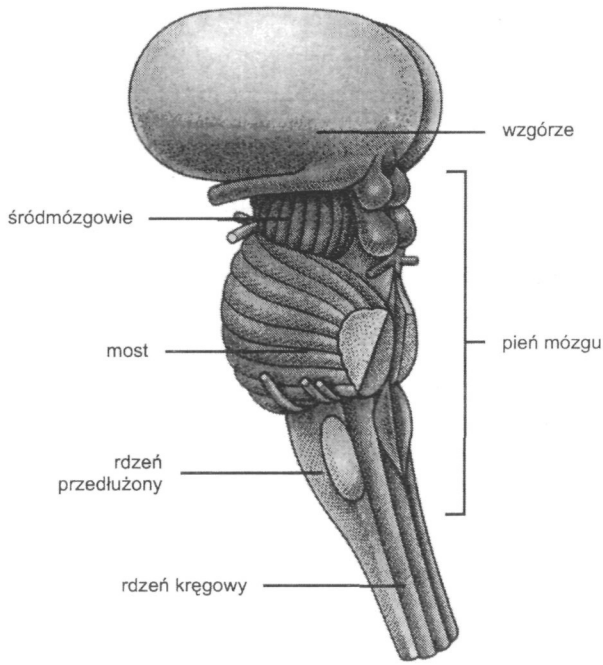
Twór siatkowaty ma zasadniczy udział w regulacji zjawisk związanych z czuwaniem i snem, aktywując fazę czuwania.

4.6.1.6. Rdzeń przedłużony

Ostatnią (najstarszą) strukturą mózgowia, stanowiącą rodzaj łącznika mózgu z położonym pozaczaszkowo rdzeniem kręgowym, jest rdzeń przedłużony, zwany inaczej opuszką.

Ma on kształt spłaszczonego stożka łączącego się podstawą z mostem, a ściętym końcem – z rdzeniem kręgowym. Ma dwie powierzchnie: podstawną i grzbietową. Na powierzchni podstawnej widoczne są grube powrózki ciągnące się wzdłuż rdzenia, oddzielone głęboką bruzdą. Są to tzw. piramidy. W dolnej części rdzenia przedłużonego piramidy krzyżują się. W tym miejscu umownie zaczyna się rdzeń kręgowy. Z boku piramid leżą – oddzielone od nich bruzdą – sznury boczne z obecną u ich szczytu charakterystyczną wyniosłością, zwaną oliwką. Na powierzchni grzbietowej rdzenia przedłużonego biegną pęczki włókien nerwowych. U góry rdzeń przechodzi w konary dolne móżdżku.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.19. Wzgórze i pień mózgu [25]

Rdzeń przedłużony zawiera zarówno istotę szarą, jak i istotę białą, jednak ich rozmieszczenie jest odmienne niż w mózgu: na zewnątrz jest istota biała, wewnątrz – szara. Istotę białą tworzą liczne drogi nerwowe, spośród których wyróżniają się wymienione już wcześniej piramidy, które są utworzone przez drogi rdzeniowo-korowe.

W rdzeniu przedłużonym, a dokładniej w tworze siatkowatym rdzenia, znajdują się centra kontrolujące podstawowe funkcje narządów wewnętrznych. Są tam zlokalizowane ośrodki oddychania, naczynioruchowe i sercowe, jak również ośrodki związane z czynnością przewodu pokarmowego. W tym obszarze „centrum" stanowi jednocześnie ośrodkową część autonomicznego układu nerwowego.

4.6.2. Rdzeń kręgowy

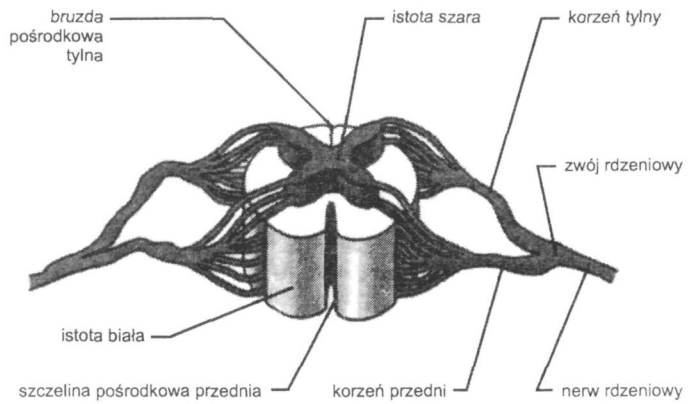
Oprócz mózgowia do ośrodkowego układu nerwowego należy także rdzeń kręgowy. Znajduje się on poza czaszką w kanale kręgowym kręgosłupa. Ma wydłużony

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

walcowaty kształt z wrzecionowatymi poszerzeniami (zgrubieniami) w okolicy szyjnej i lędźwiowej. Zaczyna się poniżej skrzyżowania piramid, na wysokości otworu owalnego czaszki, na jej podstawie i kończy się stożkowato poprzez tzw. stożek rdzeniowy na wysokości drugiego kręgu lędźwiowego.

Długość rdzenia kręgowego wynosi ok. 45 cm. Jest on, tak jak mózg, otoczony trzema oponami. Także i tutaj pomiędzy oponą twardą i podpajeczą znajduje się przestrzeń wypełniona płynem rdzeniowo-mózgowym. W okolicy lędźwiowej ta przestrzeń jest dość łatwo dostępna; można się do niej dostać cienką igłą i pobrać nieco płynu do badania.

Na powierzchni rdzenia widoczne są podłużne bruzdy, dzielące rdzeń na sześć sznurów. Z przodu rdzenia znajduje się szczelina dzieląca go na dwie symetryczne części. Również z tyłu występuje dość głęboka bruzda będąca „lustrzanym odbiciem" przedniej bruzdy. Rdzeń, podobnie do mózgu, jest także zlateralizowany, tzn. ma dwie w pełni symetryczne części, prawą i lewą.



Rys. 4.20. Schemat rdzenia kręgowego z korzeniami nerwów rdzeniowych

Rdzeń kręgowy ma budowę segmentową. Wyróżnia się w nim 31 par odcinków, tzw. *neuromerów*: 8 szyjnych (C1-C8), 12 piersiowych (Th1-Th12), 5 lędźwiowych (L1-L5), 5 krzyżowych (S1-S5) i 1 guziczny (C0), z którymi łączy się 31 par *nerwów rdzeniowych* – szyjnych, piersiowych, lędźwiowych, krzyżowych i guziczny.

Nerwy łączą się z rdzeniem za pomocą tzw. *korzeni nerwowych* brzusznych i grzbietowych. Każdy z nich składa się z 5-10 nici korzeniowych, będących pęczkami nerwowymi. W korzeniach tylnych, niedaleko od powierzchni rdzenia, już poza blaszką opony twardej, w otworach międzykręgowych znajdują się

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

zwoje rdzeniowe. Korzenie nerwów lędźwiowych, krzyżowych i nerwu guziczne-go tworzą gruby pęczek, otoczony oponą twardą, biegnący ku dołowi i zwany końskim ogonem.

Na przekroju poprzecznym rdzenia widać, iż składa się on (tak jak mózg) z istoty szarej i białej, z tym że – w przeciwieństwie do mózgu, a tak samo jak w rdzeniu przedłużonym – istota biała jest na obwodzie rdzenia, a szara znajduje się wewnątrz. Charakterystyczny jest w przekroju poprzecznym wygląd istoty szarej: przypomina ona dużą literę H. Ramiona tej litery to tzw. *rogi rdzenia*, które w trójwymiarowej rzeczywistości tworzą słupy: z przodu – dwa (symetryczne) rogi (słupy) przednie, z tyłu – dwa rogi (słupy) tylne. Pomiędzy nimi leży istota szara pośrednia, której zewnętrzna część obwodowa tworzy niewielkie uwypuklenie, zwane rogiem (słupem) bocznym.

Rogi (słupy) przednie zawierają neurony ruchowe, których długie wypustki, aksony, tworzą korzenie przednie, te zaś – nerwy. Rogi (słupy) tylne zawierają neurony czuciowe. Nie są to jednak pierwsze neurony drogi czuciowej, ponieważ jeszcze przed nimi usytuowane są neurony tworzące zwoje rdzeniowe.

Kora rdzenia ma swoją reprezentację ruchową w rogach przednich. Jej własna aktywność powoduje niekontrolowany, mimowolny ruch grup mięśniowych (np. kończyn) oparty na prostych odruchach. Ta aktywność jest jednak stale modyfikowana przez korę mózgu oraz układy podkorowe i móżdżek. Pobudzenia powstałe w tych strukturach biegną zstępującymi drogami nerwowymi, z których największe znaczenie mają drogi korowo-rdzeniowe (piramidowe) w sznurach przednich (piramidach) istoty białej rdzenia, dzięki którym człowiek może wykonywać skomplikowane ruchy. Nie mniej ważne są drogi pozapiramidowe, którymi biegną do rdzenia kręgowego pobudzenia powstałe w jądrach podkorowych. Ich wpływ na motorykę nie jest uświadomiony, nie podlega woli człowieka. Polega on z grubsza na korygowaniu ruchów dowolnych, czyniąc je płynnymi i dostosowując zakres ruchu do przyjętych wcześniej zamiarów.

Na granicy rdzenia przedłużonego piramidy (drogi korowo-rdzeniowe) krzyżują się. Oznacza to, że prawa półkula sprawuje nadzór nad aktywnością neuronów rogu (słupa) przedniego lewego, lewa półkula kontroluje zaś aktywność neuronów prawego rogu (słupa) przedniego.

Reprezentacja czuciowa rdzenia mieści się w rogach tylnych, do których dopływają bodźce z obwodu. Wstępnie jednak docierają do neuronów zwojów rdzeniowych umieszczonych poza rdzeniem. Stamtąd, po wniknięciu do rdzenia, sznurem tylnym pobudzenia zdążają do wszystkich struktur mózgowia, które rejestrują i przetwarzają pobudzenia czuciowe (dotyku, ucisku, bólu, temperatu-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

ry, wibracji, czucia głębokiego), zwłaszcza zaś do pól czuciowych kory (drogi rdzeniowo-korowe).

Pomiędzy korą czuciową i ruchową rdzenia występują liczne połączenia wewnętrzne, tzw. pęczki własne, łączące komórki nerwowe bezpośrednio sąsiadujących lub blisko siebie położonych segmentów, zapewniające rdzeniowi pewien zakres autonomii w odbieraniu wrażeń czuciowych i kreowaniu ruchu w drodze prostych mono- i kilkusynaptycznych odruchów.

Istota biała rdzenia to drogi nerwowe, wstępujące i zstępujące, łączące rdzeń wstępująco i zstępująco z wszystkimi strukturami mózgowia.

4.7. Obwodowy układ nerwowy

Obwodowy układ nerwowy jest utworzony przez *nerwy* i związane z nimi *zwoje*. Nerwy tworzą jakby przedłużenie i rozgałęzienie ośrodkowego układu nerwowego w całym ustroju. Zależnie od tego, czy łączą się one z rdzeniem kręgowym czy z mózgowiem, nazywamy je *nerwami rdzeniowymi* lub *nerwami czaszkowymi*. Nerwy rdzeniowe występują w liczbie 31 par, nerwów czaszkowych jest zaś tylko 12 par.

4.7.1. Nerwy czaszkowe

Nerwy czaszkowe (rys. 4.21) spełniają funkcje ruchowe (zależne lub nie od naszej woli), czuciowe i mieszane (czuciowo-ruchowe). Są to:

Nerw I (węchowy). Jest zlokalizowany poniżej półkul mózgowych. Odchodzą od niego włókna kierujące się do błony śluzowej jamy nosowej, gdzie odbierają bodźce węchowe.

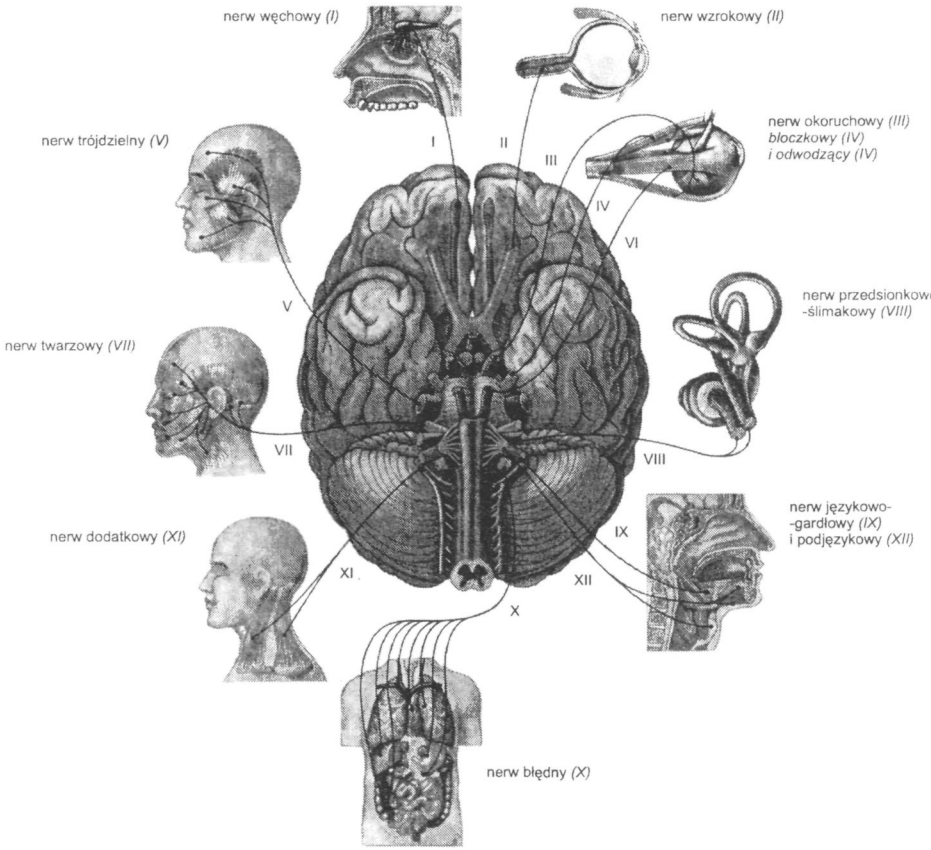
Nerw II (wzrokowy). Od siatkówki gałki ocznej odchodzą nerwy wzrokowe, które biegną do mózgu i tam krzyżują się ze sobą, tworząc tzw. skrzyżowanie nerwów wzrokowych.

Nerw III (okoruchowy). Jest odpowiedzialny za większość ruchów gałki ocznej. Jego pobudzenie powoduje również zwężenie źrenicy (*miosis*).

Nerw IV (bloczkowy). Unerwia mięsień skośny górny, który kieruje gałką oczną ku dołowi i w stronę przyśrodkową.

Nerw V (trójdzielny). Jego część czuciowa unerwia całą twarz, część ruchowa zaś unerwia mięśnie żwaczowe.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.21. Nerwy czaszkowe [25]

Nerw VI (odwodzący). Jest wyłącznie ruchowy. Kieruje gałkę oczną na zewnątrz.

Nerw VII (twarzowy). Jego część czuciowa odbiera bodźce z przedniej części języka, część ruchowa unerwia mięśnie twarzy (ta ostatnia funkcja jest najważniejsza).

Nerw VIII (słuchowy). Jest wyłącznie czuciowy. Przekazuje bodźce słuchowe do kory mózgowej, przewodzi także bodźce z narządu równowagi.

Nerw IX (językowo-gardłowy). Jego część ruchowa unerwia mięśniówkę gardła, część czuciowa zaś unerwia jamę ustną, część języka i gardło.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Nerw X (błędny). Jest mieszany (czuciowo-ruchowy). Kieruje się do krtani i trzewi jamy brzusznej. Przebiegają w nim włókna przywspółczulne, biegnące do serca i innych narządów klatki piersiowej i jamy brzusznej.

Nerw XI (dodatkowy). Jest nerwem ruchowym, unerwia mięśnie szyi, krtani i podniebienia miękkiego.

Nerw XII (podjęzykowy). Umożliwia ruchy języka, pomagając przy żuciu, połykaniu i fonacji.

4.7.2. Nerwy rdzeniowe

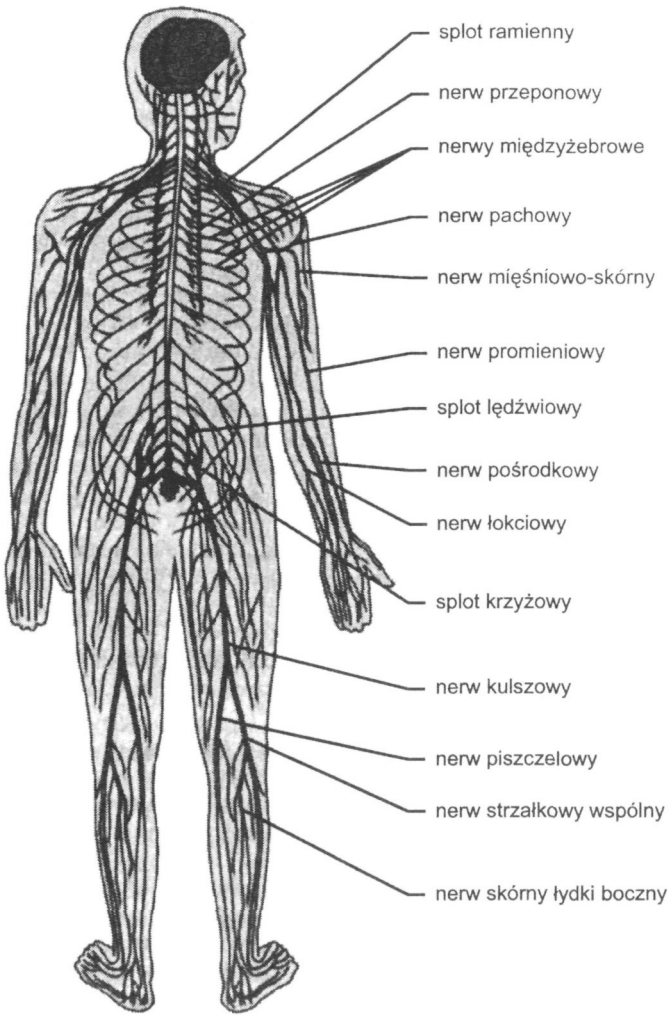
Nerwy rdzeniowe (albo obwodowe) (rys. 4.22) są nerwami mieszanymi. Biorą swój początek w istocie szarej rdzenia, leżącej, w odróżnieniu od mózgowia, w jego wnętrzu i otoczonej istotą białą. Każdy nerw tworzą dwa osobne korzenie: *korzeń brzuszny*, wychodzący z rogu przedniego rdzenia i *korzeń grzbietowy*, wychodzący z rogu tylnego. Po przejściu przez otwory międzykręgowe oba korzenie łączą się w pojedynczy nerw rdzeniowy, który później rozgałęzia się. *Gałąź brzuszna*, dzieląca się następnie na tysiące małych gałązek, zdąża do szyi, rąk, przedniej części tułowia i do nóg. *Gałąź grzbietowa* zakręca w kierunku pleców. Odgałęzienia jednego nerwu rdzeniowego mogą się łączyć z innymi nerwami i tworzyć gęste sieci, *sploty nerwowe*. Sploty nerwowe unerwiają obszary będące siedliskiem złożonych czynności lub ruchów, jak np. barki i szyja. Nerwy rdzeniowe, podobnie jak kręgosłup, dzieli się na odcinki.

Odcinek szyjny tworzy osiem par nerwów (*C1-C8*), które łącząc się tworzą dwie sieci: splot szyjny (*C1-C4*) i splot ramienny (*C5-C8* i *Th1*). Sploty te unerwiają tył czaszki, szyję, barki, kończyny górne z dłońmi oraz przeponę.

Odcinek piersiowy (*Th1-Th12*). Począwszy od nerwu *Th1*, zaopatrującego częściowo splot barkowy, nerwy rdzeniowe odcinka piersiowego łączą się bezpośrednio z mięśniami międzyżebrowymi, głębokimi mięśniami grzbietu i mięśniami brzucha.

Odcinek lędźwiowy (*L1-L5*). Cztery z pięciu par nerwów rdzeniowych odcinka lędźwiowego (*L1 L4*) tworzą splot lędźwiowy zaopatrujący dolną część grzbietu oraz częściowo kończyny dolne. Segmenty *L4* i *L5* posiadają też połączenia z pierwszymi czterema parami nerwów rdzeniowych w odcinku krzyżowym (*S1-S4*).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.22. Nerwy rdzeniowe

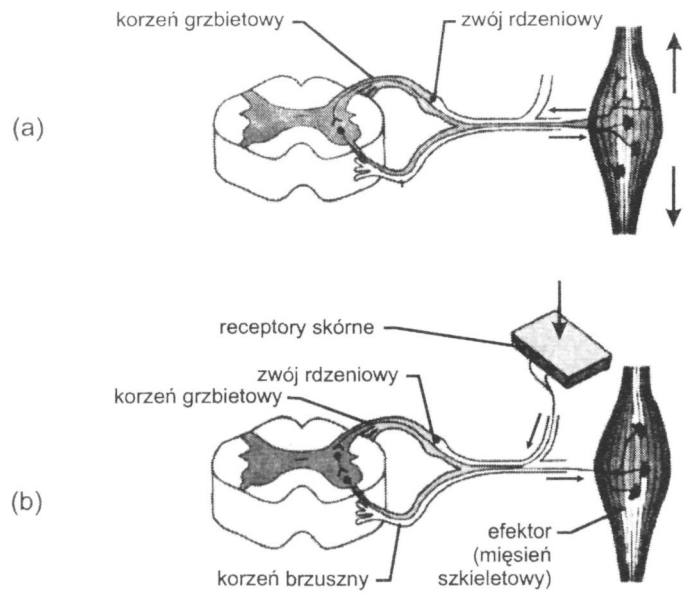
Odcinek krzyżowy (*S1-S5*). Dwie sieci nerwowe, splot krzyżowy (*L5-S3*) i splot guziczny (*S4*, *S5* i korzenie guziczne, *Co1*), unerwiają uda, pośladki, mięśnie i skórę podudzi i stóp oraz okolicę odbytu i krocza.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

4.8. Odruchowe działanie układu nerwowego

Najprostszą, stereotypową reakcją układu nerwowego na pobudzenie bodźcem czuciowym jest *odruch*. Układ połączeń neuronów, którym impuls nerwowy przemierza drogę od receptora do efektora nosi nazwę *łuku odruchowego*. W jego skład wchodzą neuron czuciowy, motoneuron (neuron ruchowy) i zazwyczaj wstawione między nie interneurony pobudzające lub hamujące.
Etapy drogi najprostszego łuku odruchowego są następujące:
receptor – droga aferentna – ośrodek ruchowy – droga eferentna – efektor .

W zależności od liczby interneuronów, a co za tym idzie synaps wchodzących w skład łuku odruchowego, wyróżniamy odruchy *monosynaptyczne* i *polisynaptyczne* (rys. 4.23).



Rys. 4.23. Łuk odruchowy monosynaptyczny (A), polisynaptyczny (B)

Jedynym przykładem odruchu monosynaptycznego jest odruch na rozciąganie (miotatyczny), w którym skurcz mięśnia następuje na skutek uprzedniego ich rozciągania. Odruch ten kontroluje długość mięśnia na drodze ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Czas, jaki upływa między zadziałaniem bodźca a reakcją efektora nosi nazwę *czasu odruchu* lub *latencji odruchu*. Jego wielkość zależy przede wszystkim

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

od prędkości przewodzenia aksonów i liczby synaps w odpowiednim obwodzie nerwowym.

Najprostsze odruchy wykształcone na drodze przemian ewolucyjnych noszą nazwę *odruchów bezwarunkowych* (*wrodzonych*). Ich uruchomienie i wykonanie zachodzi bez udziału świadomości, co znacznie skraca czas reakcji. Przykładami takich odruchów mogą być nagłe cofnięcie ręki po dotknięciu gorącego żelazka lub zwężenie źrenicy przy gwałtownym impulsie świetlnym. Odruchy obronne organizmu związane z działaniem ośrodków rdzenia kręgowego i ośrodków podkorowych mózgowia (bez udziału kory mózgowej) nazywane są *niższymi czynnościami nerwowymi*.

Wszystkie odruchy mogą być modyfikowane przez doświadczenie. Osłabienie odruchu, będące efektem działania powtarzającego się stałego, nieszkodliwego bodźca nazywamy *habituacją*. Przeciwnie, powtarzalne pobudzanie bodźcem bólowym powoduje wzmocnienie odruchu zwane *sensytyzacją* (*uwrażliwieniem*). Zarówno habituacja, jak i sensytyzacja są przykładami nieasocjacyjnego uczenia się, ponieważ występuje w nich tylko jeden bodziec. W przypadku, gdy występują dwa bodźce skoordynowane w czasie ma miejsce bardziej skomplikowany proces uczenia się asocjacyjnego. Jego wynikiem są tzw. *odruchy warunkowe* (*nabyte*). Powstają one w wyniku doświadczenia nabywanego podczas życia osobniczego (ontogeneza). Zaistnienie odruchu warunkowego polega na skojarzeniu bodźca pierwotnego wywołującego odruch bezwarunkowy z bodźcem obojętnym, przy czym oba bodźce muszą być skorelowane w czasie. Jednym z najsłynniejszych badaczy odruchów był fizjolog rosyjski, I.P. Pawłow (1849-1936). Jego klasyczne już dziś doświadczenie polegało na podawaniu psu jedzenia i jednoczesnym włączaniu sygnału świetlnego lub dźwiękowego. Po pewnym czasie takiego treningu sam bodziec świetlny lub dźwiękowy powodował wydzielanie śliny, wykształcony więc został odruch warunkowy.

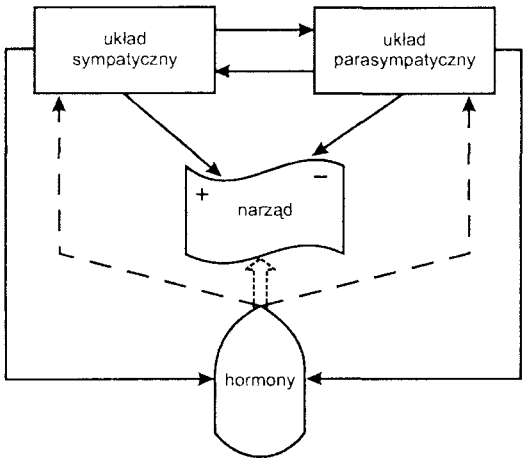
Odruchy warunkowe wymagają podtrzymywania, w przeciwnym razie zanikają. Czynności wykonywane na skutek nabywania doświadczeń życiowych, do realizacji których zaangażowana jest kora mózgowa, noszą nazwę *wyższych czynności nerwowych*.

4.9. Autonomiczny (wegetatywny, trzewny) układ nerwowy

Zadaniem autonomicznego układu nerwowego jest umożliwienie reakcji natychmiastowych, niezależnych od woli. Reguluje on czynności ustroju w celu za-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

chowania homeostazy, czyli równowagi wewnętrznej. Kieruje funkcjami układu sercowo-naczyniowego, oddechowego, pokarmowego i przemiany materii. Układ autonomiczny nazywamy często *wegetatywnym*. Nazwa podkreśla jego znaczenie w regulowaniu środowiska wewnętrznego organizmu, co jest konieczne dla utrzymania ustroju przy życiu (w stanie wegetacji). Układ wegetatywny jest czynnościowo ściśle połączony z układem hormonalnym. Jego ośrodki sterujące znajdują się w centralnym układzie nerwowym.



Rys. 4.24. Schemat współdziałania układów współczulnego i przywspółczulnego [27]

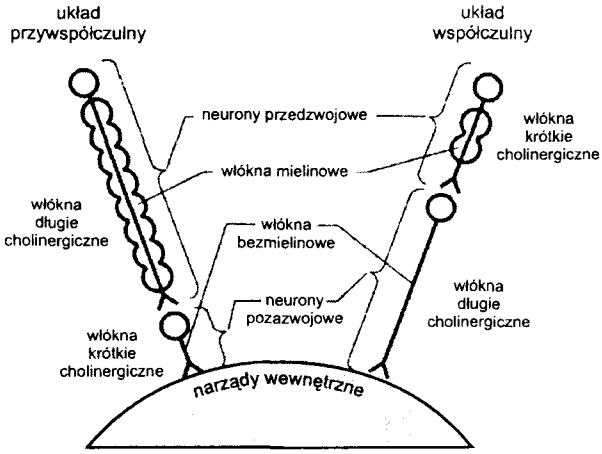
Układ autonomiczny dzieli się na dwie części (rys. 4.24):

- *układ współczulny* (*sympatyczny*);
- *układ przywspółczulny* (*parasympatyczny*).

Różnice w ich budowie przedstawia rysunek 4.25.

Ośrodki układu sympatycznego (rys. 4.26) zlokalizowane są w bocznych rogach rdzenia kręgowego w odcinku piersiowym i lędźwiowym. Impulsy docierające do narządów z układu współczulnego zazwyczaj wywierają efekt pobudzający, np. przyspieszają czynność serca i ruchy oddechowe oraz zwężają naczynia krwionośne, podnosząc ciśnienie krwi, ale równocześnie obniżają aktywność przewodu pokarmowego i jego gruczołów. Funkcją układu sympatycznego jest więc podnoszenie ogólnej aktywności organizmu. Odgrywa on pierwszoplanową rolę w sytuacjach stresowych, w okolicznościach wywołujących napięcie emocjonalne, wymagających pełnej mobilizacji organizmu. Uzyskuje wówczas przewagę

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.25. Różnice między układem współczulnym i przywspółczulnym

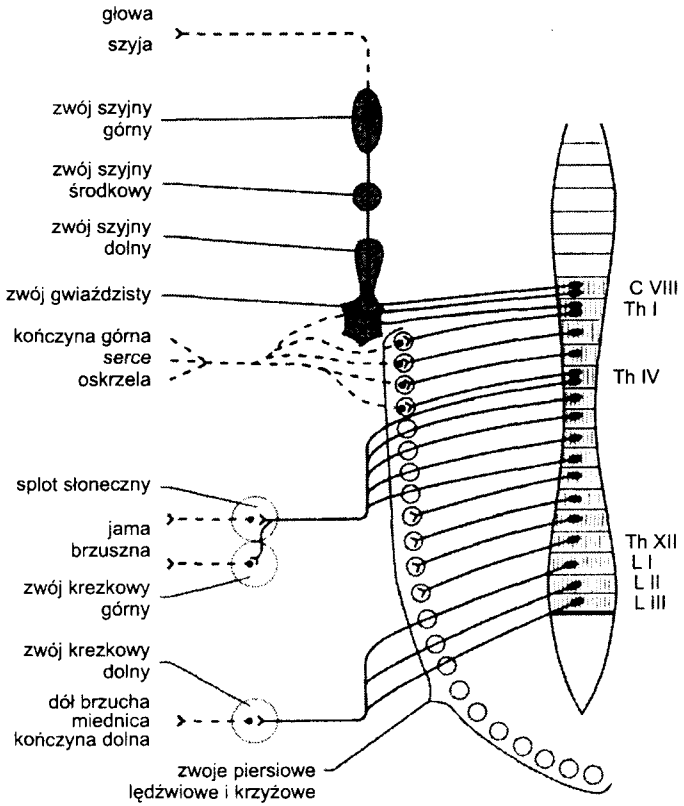
nad antagonistycznym układem przywspółczulnym, który zazwyczaj oddziałuje hamująco na unerwiane narządy, pobudza jednak pracę przewodu pokarmowego i jego gruczołów i, przyspieszając procesy trawienia, wywołuje równocześnie obniżanie się temperatury ciała, zwalnianie akcji serca, itp.

Ośrodki parasympatyczne (rys. 4.27) znajdują się w międzymózgowiu i odcinku krzyżowym rdzenia kręgowego. Uszkodzenie włókien wegetatywnych wyzwala tzw. bóle kauzalgiczne, które mają charakter piekąco-palący, często nasilają się nocą i słabo reagują na leki przeciwbólowe.

Tworami najbardziej charakterystycznymi dla układu autonomicznego są: *pień współczulny*, leżący po obu stronach kręgosłupa oraz *sploty nerwowe autonomiczne*, szczególnie obfite dokoła naczyń krwionośnych. Włókna i komórki należące do układu autonomicznego nie tylko jednak tworzą samodzielne nerwy lub sploty, lecz biegną również w nerwach czaszkowych i rdzeniowych oraz w ośrodkowym układzie nerwowym.

Również ośrodki układu autonomicznego nie leżą oddzielnie, lecz znajdują się w mózgowiu i rdzeniu kręgowym. Układ autonomiczny nie jest więc ostro odgraniczony ani od układu obwodowego, ani od ośrodkowego. W związku z tym podział układu nerwowego na trzy zasadnicze części nie jest ścisły, lecz ma raczej znaczenie dydaktyczne.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



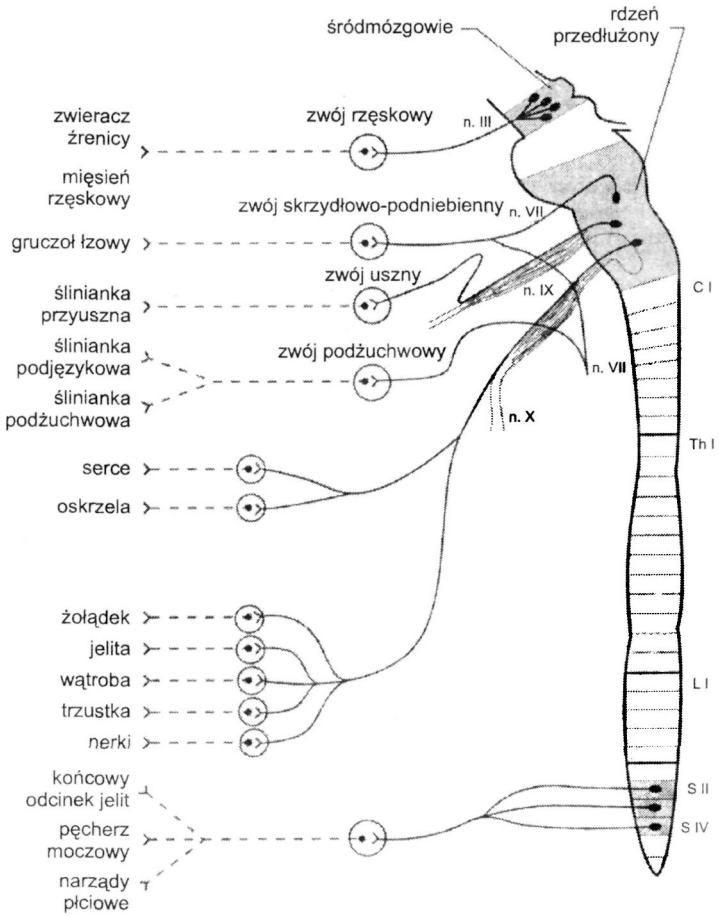
Rys. 4.26. Układ współczulny – rozmieszczenie ośrodków i zwojów oraz przebieg włókien

4.10. Ośrodki i drogi nerwowe

4.10.1. Ośrodki nerwowe

Ciała komórek nerwowych znajdują się głównie w istocie szarej ośrodkowego układu nerwowego oraz w zwojach układu obwodowego i autonomicznego. W istocie szarej są one rozmieszczone w sposób nieregularny, lub też skupiają się w oddzielne, choć często niezbyt wyraźnie odgraniczone grupy noszące nazwę *ośrodków nerwowych*. Nazwy tej używamy najczęściej w znaczeniu czynnościowym, zależnie od roli, jaką dany ośrodek spełnia. Rozróżniamy więc np. ośrodki oddychania, krążenia, ośrodki ruchowe, czuciowe, itp. Z punktu widzenia morfologicznego grupę komórek o podobnej budowie dającą się oddzielić od

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 4.27. Układ przywspółczulny – rozmieszczenie ośrodków i zwojów oraz przebieg włókien

komórek sąsiednich określamy zwykle mianem *jądra*. Tam, gdzie odgraniczenie nie jest wyraźne, mówimy raczej o *polu* lub *okolicy*. Czasami komórki układają się w postaci cienkich blaszek, zwanych inaczej *warstwami*.

4.10.2. Drogi nerwowe

Włókna nerwowe w ośrodkowym układzie nerwowym są albo rozproszone, albo też łączą się w pęczki. Wiązkę włókien lub pęczek posiadający wspólny początek i dążący do tego samego ośrodka określamy mianem *drogi nerwowej*. Zależnie od

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

kierunku przewodzenia impulsów można wyodrębnić drogi nerwowe wstępujące i zstępujące.

Drogi nerwowe wstępujące przewodzą impulsy nerwowe z niższych pięter ośrodkowego układu nerwowego do wyższych, np. z rdzenia kręgowego do mózgowia. Impulsy dochodzą do nich z receptorów przez włókna dośrodkowe nerwów obwodowych. Drogi wstępujące ze względu na spełnianą przez nie czynność nazywamy zwykle „drogami czuciowymi".

Drogi nerwowe zstępujące mają odwrotny kierunek przebiegu, od góry ku dołowi. Najdłuższe z nich rozpoczynają się w ośrodkach ruchowych kory mózgu i dochodzą aż do najniższych segmentów rdzenia (drogi korowo-rdzeniowe czyli piramidowe), inne przebiegają na krótszym odcinku. Zarówno jedne jak i drugie są to przeważnie „drogi ruchowe", a ich zniszczenie powoduje zaburzenia motoryki.

Drogi wstępujące i zstępujące obejmujemy wspólną nazwą *dróg rzutowych (projekcyjnych)*, gdyż niejako rzutują one impulsy do odległych nieraz części układu nerwowego. Oprócz dróg projekcyjnych wyróżniamy drogi kojarzeniowe i spoidłowe.

Drogi kojarzeniowe (asocjacyjne) są łącznikiem między drogami wstępującymi i zstępującymi. Rozpoczynają się one i kończą w tym samym piętrze ośrodkowego układu nerwowego, nie przekraczając granicy płaszczyzny pośrodkowej. Przykładem takich dróg mogą być pęczki włókien łączące z sobą poszczególne części jednej półkuli mózgu.

Drogi spoidłowe (komisuralne) łączą z sobą jednoimienne ośrodki prawej i lewej połowy mózgowia lub rdzenia kręgowego. Do najsilniej rozwiniętych dróg tego typu należy u człowieka ciało modzelowate (spoidło wielkie), łączące obie półkule mózgu. Liczne połączenia między stroną prawą i lewą są utworzone również przez włókna rzutowe, które w wielu miejscach krzyżują się w płaszczyźnie pośrodkowej z jednoimiennymi włóknami strony przeciwległej jako *skrzyżowanie* drogi nerwowej.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rozdział 5

Narządy zmysłów

Organizm człowieka za pomocą zmysłów, będących systemami postrzegania stale odbiera z otoczenia, bliskiego i odległego, informacje w postaci rozmaitych bodźców: mechanicznych, świetlnych, akustycznych albo chemicznych. Narządy zmysłów są wyposażone w wyspecjalizowane jednostki fizjologiczne, zwane receptorami albo sensorami.

Narządy zmysłów mogą mieć budowę stosunkowo prostą – stanowić na przykład zakończenie pojedynczego włókna nerwowego i być pojedynczym receptorem (np. rozmaite narządy czucia skórnego) albo bardziej złożoną – tworzącą strukturę składającą się z większych skupisk pojedynczych receptorów (np. skomplikowany układ odbiorczo-analizujący, jakim jest oko czy ucho), w którym występujące w ogromnej liczbie receptory stanowią najważniejszy, choć tylko jeden z wielu elementów składowych zwartej całości.

Za pomocą zmysłów organizm nie tylko odbiera zewnętrzne bodźce, ale także je wstępnie przetwarza i wysyła do centrów układu nerwowego, gdzie są ostatecznie analizowane i przetwarzane.

Potocznie uważa się, że człowiek ma pięć zmysłów.[1] Są to: dotyk, wzrok, słuch, powonienie i smak. Dwa spośród nich, tj. wzrok i słuch, odgrywają szczególnie istotną rolę w procesach lokomocji i manipulacji człowieka. Zapewniają

[1] Z fizjologicznego punktu widzenia można ich wyodrębnić więcej. Na przykład dotyk jest jednym z kilku rodzajów czucia skórnego. Oprócz dotyku, przez skórę, dzięki obecnym w niej wyspecjalizowanym i mającym różną budowę receptorom, odczuwamy także: ucisk, zmiany temperatury (zimno i ciepło), ból powierzchowny oraz wibrację. Zamiast potocznego określenia „zmysł dotyku" powinno się więc używać pojęcia „zmysły skórne". Ponadto ze zmysłem słuchu połączony jest anatomicznie zmysł równowagi, dzięki któremu organizm może określić swoją pozycję w przestrzeni.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

one orientację w przestrzeni, odbierając i analizując dochodzące z otoczenia bodźce w postaci fal świetlnych i dźwiękowych. W dalszej części omówione zostaną narządy tych właśnie dwóch zmysłów.

5.1. Narząd wzroku

Zdolność układu nerwowego do odbierania bodźców świetlnych i przetwarzania ich w mózgu na wrażenia wzrokowe jest określana jako zmysł wzroku. Anatomiczną postacią tego zmysłu jest narząd wzroku. Narząd ten składa się z umiejscowionej w oczodole gałki ocznej, która odbiera wrażenia wzrokowe i przekazuje je poprzez drogi wzrokowe do korowych ośrodków wzrokowych mózgu. W nich odbierane są i przetwarzane impulsy, przesyłane następnie do dalszych ośrodków mózgowych tak, aby ustrój zareagował odpowiednią czynnością na bodziec wzrokowy. Za pomocą oczu odbieramy około 80% wszystkich informacji o otoczeniu i aż 10% kory mózgowej zaangażowane jest w interpretację tych informacji.

5.1.1. Budowa narządu wzroku

5.1.1.1. Oczodół

Gałka oczna, wraz z narządami dodatkowymi, znajduje się w kostnej jamie, zwanej oczodołem. Głębokość oczodołu wynosi 45 mm, objętość 30 cm^3, z czego gałka oczna zajmuje zaledwie 1/4 tej przestrzeni. Resztę zajmują: gruczoł łzowy, umiejscowiony w górno zewnętrznej części oczodołu i wydzielający łzy do sklepienia górnego spojówki, sześć mięśni zewnętrznych oka, nerwy oraz naczynia krwionośne. Pozostałą część wypełnia miękka podściółka tłuszczowa oczodołu, która odgrywa znaczną rolę w amortyzacji oka. Szczyt oczodołu łączy się z jamą czaszki poprzez dwa otwory: kanał wzrokowy, z przebiegającym w nim nerwem wzrokowym wraz z tętnicą oczną, oraz szczelinę oczodołową górną. Przez tę szczelinę do oczodołu wchodzą wszystkie nerwy czaszkowe unerwiające m. in. gałkę oczną.

5.1.1.2. Powieki i aparat łzowy

Powieki zamykają przedni otwór oczodołu, chroniąc gałkę oczną przed wysychaniem i urazami. Ruch powiek rozprowadza płyn łzowy po powierzchni rogówki i spojówki, zapewniając oku stałe nawilżanie. Na brzegach powieki górnej i dolnej

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

znajduje się około 100–150 rzęs, do ich mieszków uchodzą gruczoły łojowe Zeissa i gruczoły rzęskowe (potowe) Molla. Rusztowanie powiek stanowią tarczki, zbudowane ze zbitej tkanki łącznej, wygięte odpowiednio do krzywizny gałki ocznej. W tarczkach usadowione są gruczoły tarczkowe Meiboma z ujściem przy tylnej krawędzi powieki. W pobliżu kąta przyśrodkowego (od strony nosa) obu powiek, na ich tylnej krawędzi, znajdują się punkty łzowe (górny i dolny), stanowiące początek kanalików łzowych, przez które odprowadzane są łzy do woreczka łzowego i następnie do nosa. Powiekami poruszają zasadniczo dwa mięśnie: biegnący ze szczytu oczodołu do górnego brzegu tarczki dźwigacz powieki górnej z mięśniami tarczkowymi górnym i dolnym, które unoszą powiekę, oraz rozległy, leżący pod skórą powiek mięsień okrężny oka, który zamyka powiekę.

5.1.1.3. Spojówka (*tunica conjunctiva*)

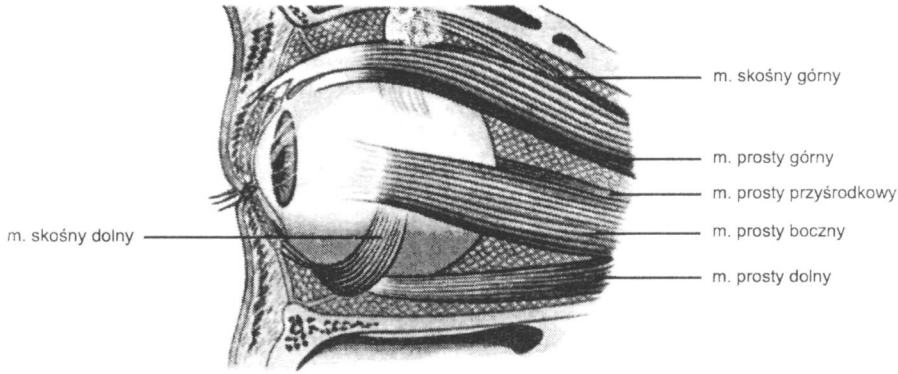
Spojówka (worek spojówkowy) jest cienką, delikatną błoną śluzową, która wyścieła tylną powierzchnię obu powiek, przechodzi następnie na gałkę oczną aż do rogówki, tworząc przy przejściu fałdy, zwane załamkami górnym i dolnym. Spojówka jest ściśle zrośnięta z podłożem tylko w jej części tarczkowej, w załamkach posiada fałdy, a na powierzchni gałkowej jest lekko przesuwalna. Daje to możliwość swobodnych ruchów gałki ocznej. Słabe unerwienie czuciowe spojówki pozwala na jej dotykanie i usuwanie niektórych ciał obcych z jej powierzchni bez stosowania kropli znieczulających (w przeciwieństwie do silnie unerwionej rogówki).

5.1.1.4. Mięśnie poruszające gałką oczną

Gałkę oczną porusza sześć mięśni zewnętrznych oka. Dwie pary antagonistycznych mięśni prostych: górny i dolny oraz wewnętrzny i zewnętrzny, których tylne przyczepy znajdują się daleko za gałką oczną w szczycie oczodołu w tzw. pierścieniu ścięgnistym. Natomiast przednie przyczepy są przymocowane do gałki ocznej w odległości przeciętnie 7 mm od rąbka, w położeniu zgodnym z ustawieniem wskazówki zegara kolejno na godzinie 12, 3, 6, 9.

Odmienny i bardziej złożony jest przebieg dwóch mięśni skośnych, które warunkują odpowiednie ruchy oczu. I tak mięsień skośny górny, przebiegający przez tzw. bloczek kieruje gałkę oczną ku dołowi, odwodzi ją (na zewnątrz) i skręca do wewnątrz (ku nosowi). Mięsień skośny dolny z kolei obraca gałkę ku górze, w kierunku na zewnątrz, a skręca ku skroni. Prawidłowe ruchy oczu oraz

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 5.1. Mięśnie gałki ocznej [25]

równoległe ich ustawienie uwarunkowane jest odpowiednim ich unerwieniem i ukrwieniem. Nawet przy niewielkiej niedomodze mięśniowej oczy ustawiają się w zezie i może nastąpić dwojenie obrazu.

5.1.1.5. Gałka oczna

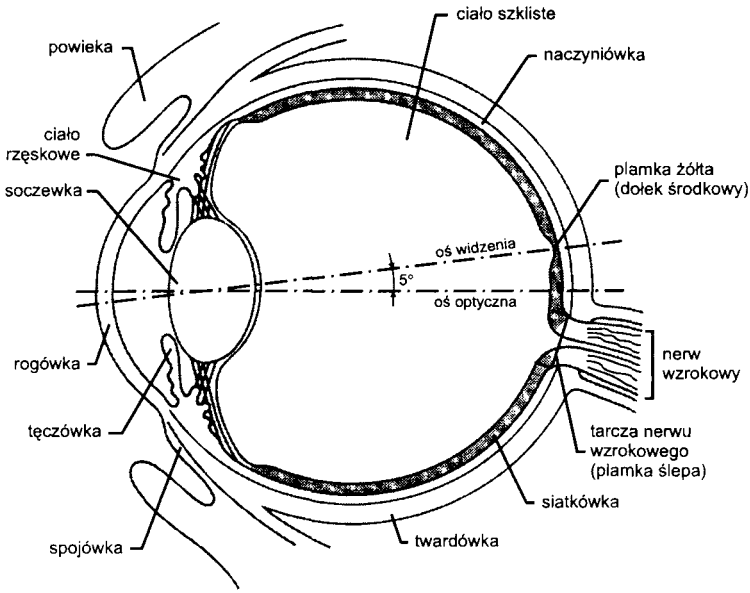
Gałka oczna ma postać prawie kulistą, o przeciętnym wymiarze osi przedniotylnej 25 mm, osi poziomej 23 mm, objętości 6.5 cm^3 i masie 7 g. Zbudowana jest z trzech błon: zewnętrznej błony włóknistej (twardówka i rogówka), środkowej naczyniowej (tęczówka, ciało rzęskowe, naczyniówka) oraz wewnętrznej czuciowej (siatkówka).

Zewnętrzną włóknistą błonę stanowi biała, nieprzejrzysta, zbita tkanka oka, zwana twardówką (potocznie nazywana „białkiem oka"), która w swej części przedniej staje się przezroczysta i nosi nazwę rogówki.

Pod twardówką od strony wewnętrznej oka znajduje się błona naczyniowa oka (dawniej zwana jagodówką), którą możemy podzielić na trzy części. Część przednią, widoczną przez rogówkę i dochodzącą do jej rąbka, nazywamy tęczówką. Ma ona różne zabarwienie i świadczy o kolorze oczu. Druga część, już niewidoczna gołym okiem, bo schowana pod twardówką, to ciało rzęskowe, oraz trzeci, tylny odcinek to naczyniówka.

Siatkówka, najbardziej wewnętrzna błona oka, wyścieła jedynie naczyniówkę.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 5.2. Schemat budowy oka

5.1.1.6. Rogówka (*cornea*)

Rogówka ma kształt wycinka kuli i przypomina wypukłe szkiełko od zegarka wprawione w twardówkę. Średnica pozioma rogówki wynosi 12 mm, pionowa 11 mm. Rogówka jest najcieńsza w centrum i jej grubość wynosi 0.6 mm, natomiast obwodowo przy rąbku około 1 mm. Część centralna rogówki, o średnicy 4 mm, jest bardzo regularna i kulista, i nazywa się częścią optyczną. Rogówka zbudowana jest z pięciu warstw: nabłonka, blaszki granicznej przedniej (błona Bowmana), istoty właściwej (miąższu), blaszki granicznej tylnej (błony Descemeta) oraz najgłębiej położonego śródbłonka. Dzięki swoistej budowie rogówka w warunkach fizjologicznych jest przezroczysta. Nie posiada ona naczyń krwionośnych, a odżywianie jej odbywa się z naczyń rąbka rogówki, z płynu komory przedniej oraz częściowo z łez. Rogówka jest bardzo silnie unerwiona czuciowo, dlatego też reaguje natychmiast bólem i łzawieniem na dotyk czy ciała obce, które znajdują się na jej powierzchni. Poza funkcją ochronną, rogówka bierze udział w załamywaniu promieni świetlnych. Stanowi więc ona główną część układu optycznego oka, a siła łamiąca rogówki wynosi 42 dioptrie. Wadliwa

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

łamliwość rogówki jest główną przyczyną tzw. wady refrakcji, którą trzeba wyrównywać szkłami okularowymi.

5.1.1.7. Twardówka (*sclera*)

Twardówka tworzy sztywną nieprzezroczystą i białą zewnętrzną ścianę gałki ocznej. Zbudowana jest z błony włóknistej łącznotkankowej. W części tylnej, w miejscu gdzie twardówka przechodzi w pochewkę nerwu wzrokowego, grubość jej jest największa i wynosi 1.3 mm. W przedniej części oka (gdzie przechodzi w rogówkę) jej grubość jest najmniejsza i wynosi 0.3 mm. Twardówka jest słabo unaczyniona i mało czuła.

5.1.1.8. Tęczówka (*iris*)

Tęczówka jest umięśnioną częścią błony naczyniowej o nierównej powierzchni, posiada liczne promieniste zagłębienia (krypty) oraz okrężne bruzdy. W zależności od ilości barwnika tęczówka może mieć kolor szary, jasnoniebieski, zielonkawy lub brązowy. W środku tęczówki znajduje się czarny, okrągły otwór – źrenica. Wielkość źrenicy, regulowana przez mięśnie tęczówki, jest niezależna od naszej woli i zmienia się odruchowo pod wpływem rozmaitych bodźców, przede wszystkim w wyniku zmian natężenia światła. Zwężona źrenica pod wpływem światła chroni oko przed nadmiernym olśnieniem. Zwężenie źrenicy w przypadkach wady refrakcji zmniejsza kręgi rozproszenia, co poprawia w pewnym stopniu wyrazistość widzianego obrazu.

5.1.1.9. Ciało rzęskowe (*corpus ciliare*)

Ciało rzęskowe to silnie unaczyniony twór zbudowany głównie z mięśni gładkich, otaczający pierścieniowato obszar leżący za tęczówką, o szerokości 8 mm. Do jego wyrostków rzęskowych przyczepiają się więzadełka Zinna, na których zawieszona jest soczewka. W zależności od skurczu lub rozkurczu mięśnia rzęskowego, soczewka zmienia swój kształt (akomoduje), co pozwala dostosować układ optyczny oka do różnych odległości. W nabłonku wyrostków rzęskowych produkowana jest bardzo ważna dla oka ciecz wodnista, regulująca przez swój stały przepływ odpowiednie ciśnienie oczne.

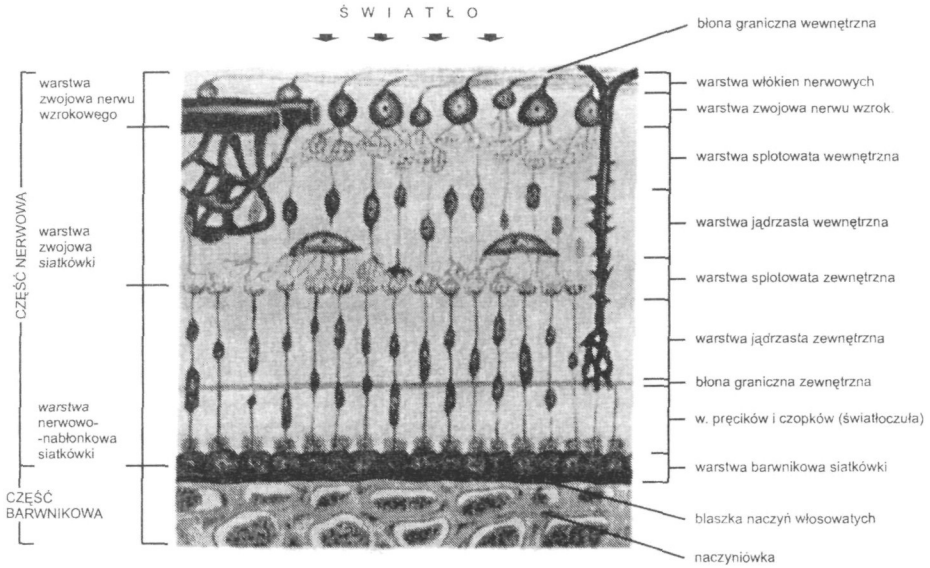
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

5.1.1.10. Naczyniówka (*chorioidea*)

Naczyniówka leżąca pomiędzy twardówką a siatkówką składa się z gęstej sieci naczyń krwionośnych o różnej średnicy, rozdzielonych niewielką ilością tkanki łącznej oraz komórek barwnikowych i włókien elastycznych. Głównym zadaniem naczyniówki jest odżywianie zewnętrznych warstw siatkówki.

5.1.1.11. Siatkówka (*retina*)

Siatkówka jest receptorową częścią oka. Stanowi ją leżąca z tyłu, za soczewką i galaretowatym ciałem szklistym, wewnętrzna błona gałki ocznej wysłana warstwą komórek nerwowych. Przylega ona mocniej do naczyniówki tylko w okolicy nerwu wzrokowego oraz z przodu przy ciele rzęskowym. W pozostałych miejscach siatkówka przyłożona jest lekko do podłoża, przyciskana od wnętrza oka przez ciało szkliste, a od zewnątrz łącząca się z naczyniówką.

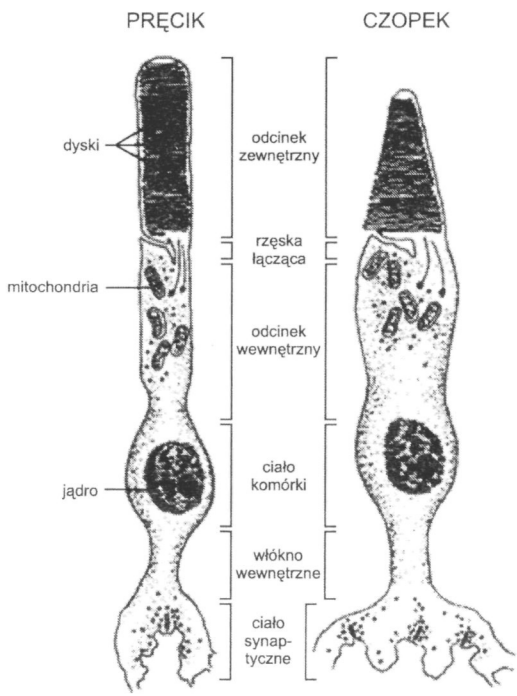


Rys. 5.3. Struktura siatkówki

Budowa histologiczna siatkówki jest bardzo złożona, jej grubość wynosi 0.15–0.18 mm i składa się z dziesięciu warstw. Podczas badania dna oka specjalnym wziernikiem (oftalmoskopem) widać różowo-czerwone zabarwienie siatkówki. W obrębie tzw. bieguna tylnego oka znajduje się dołek środkowy,

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

leżący w obszarze *plamki żółtej*, czyli małej, beznaczyniowej przestrzeni siatkówki. Dołek środkowy jest małym zagłębieniem w plamce przystosowanym do najostrzejszego widzenia. Drugim ważnym elementem dna oka jest *tarcza nerwu wzrokowego* (*plamka ślepa*), leżąca 2 mm od plamki żółtej w kierunku nosowym. Jest to skupisko przede wszystkim komórek nerwowych biegnących z siatkówki, które, zbierając się na tarczy, tworzą nerw wzrokowy. Nerw wychodzi z oczodołu przez kanał nerwu wzrokowego i, krzyżując część swych włókien, dociera do mózgu. Tarczę nerwu wzrokowego widzi się jako różowo-żółtawy krążek, o średnicy 1.5 mm, z centrum którego wychodzą naczynia tętnicze siatkówki, a wchodzą naczynia żylne. W siatkówce odbywa się szereg skomplikowanych procesów fizycznych i biochemicznych, przetwarzających bodziec świetlny na bodziec nerwowy, który przesyłany jest dalej do korowych ośrodków wzroku. Najważniejsze w tym procesie są składniki światłoczułe zajmujące zewnętrzną warstwę siatkówki – 5–7 mln *czopków* i 110–130 mln *pręcików* (rys. 5.4).



Rys. 5.4. Budowa czopków i pręcików

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Pręciki znajdują się głównie na obwodzie siatkówki, a w miarę zbliżania się do plamki żółtej wzrasta liczba czopków tak, że w obrębie dołka środkowego znajdują się tylko same czopki. Czynnością czopków jest widzenie kształtu i barw przedmiotów w jasnym oświetleniu, zaś czynnością pręcików jest przystosowanie oka do słabych oświetleń i rozróżnianie zarysów przedmiotów. Tak więc widzenie plamkowe pozwala na dokładne rozpoznanie szczegółów, kształtu i barwy, zaś widzenie obwodem siatkówki daje nam orientację w przestrzeni.

W siatkówce, w kilku warstwach neuronów wstępnie powstaje obraz obserwowanego przedmiotu. Jednak ostateczna analiza bodźców i ich scalanie w obraz ma miejsce w korze wzrokowej mózgu. Bodźce wzrokowe biegną drogami wzrokowymi nie tylko do kory, ale i do innych struktur mózgowia. Są one analizowane i przetwarzane także przez móżdżek, struktury podkorowe oraz pień mózgu. Jest to potrzebne do utrzymania równowagi i zapewnienia harmonii ruchów.

Siatkówka ma połączenia nerwowe z całym układem mięśniowo-szkieletowym, pozwala to na odruchową reakcję ustroju pod wpływem bodźca wzrokowego, np. uchylenie się przed spadającym na nas przedmiotem, zwężenie źrenicy pod wpływem olśnienia i odwrócenie głowy od źródła światła z zamknięciem powiek.

5.1.1.12. Ciało szkliste (*corpus vitreum*)

Ciało szkliste wypełnia centralną część oka pomiędzy soczewką a siatkówką i stanowi 2/3 objętości gałki ocznej. Jest to przezroczysta, galaretowata substancja w 99% składająca się z wody, pozbawiona nerwów oraz naczyń krwionośnych. Rola ciała szklistego polega na utrzymaniu kształtu oka. Ciało szkliste bierze też udział w załamywaniu promieni świetlnych oraz amortyzuje wstrząsy i ruchy. Odgrywa ono również ważną rolę w regulacji ciśnienia wewnątrzgałkowego. Z wiekiem następuje zwyrodnienie ciała szklistego, a związane z tym zmiany fizykochemiczne powodują u wielu osób spostrzeganie jaśniejszych lub ciemniejszych tworów, tzw. muszek latających. Także z wiekiem ciało szkliste obkurcza się i może odłączyć się od tylnego bieguna oka. Zwyrodnienie włókienkowe i tworzenie się pustych jam występuje u 34% ludzi pomiędzy 10. a 40. rokiem życia, odłączenie tylne ciała szklistego pojawia się u 6% ludzi po 50. roku życia, natomiast między 60. a 70. rokiem życia aż u 65% pacjentów.

5.1.1.13. Soczewka (*lens*)

W części przedniej oka, pomiędzy tęczówką a ciałem szklistym, na obwódce rzęskowej znajduje się soczewka. Jest to przezroczysty, dwuwypukły twór, silnie

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

załamujący światło. Najbardziej zewnętrzną częścią soczewki jest jej włóknista torebka (*capsule*), wewnątrz której umieszczona jest jej miękka część korowa (*cortex*) oraz twardsze, powstające po 20 roku życia, jądro (*nucleus*). Jeśli wyobrazimy sobie soczewkę jako owoc, to torebka jest jego skórką, kora jego miąższem, a jądro pestką.

Z wiekiem jądro twardnieje, staje się większe i zabarwia się stopniowo na kolor żółto-brunatny. W związku z tym zmienia się współczynnik załamywania światła (może powstać tzw. krótkowzroczność soczewkowa) oraz pojawiają się trudności w rozpoznawaniu niektórych barw (starsi ludzie słabo rozpoznają kolor niebieski, widząc jakby przez żółty filtr).

Również kształt soczewki zmienia się wraz z wiekiem. U noworodka soczewka jest prawie kulista, u dorosłego człowieka staje się mniej wypukła, a u osób starszych jeszcze bardziej spłaszczona. Kiedy soczewka oka ma zbyt dużą ogniskową, jest w stanie uchwycić ostro jedynie obraz przedmiotów bardzo odległych (dalekowzroczność), w przypadku zbyt krótkiej ogniskowej oko widzi ostro jedynie przedmioty leżące bardzo blisko (krótkowzroczność).

Soczewka zawieszona jest na więzadełkach biegnących promieniście od jej torebki do okrężnie leżącego ciała rzęskowego. Dzięki takiemu zawieszeniu, w zależności od stanu napięcia obwódki rzęskowej – regulowanego przez mięśnie ciała rzęskowego – zmienia się kształt soczewki na bardziej płaski lub wypukły. Zjawisko to nazywamy *akomodacją* lub nastawnością. Jest to więc zdolność przystosowywania się układu optycznego oka do ostrego widzenia z różnych odległości. Z wiekiem czynność ta ze względu na stwardnienie soczewki znacznie maleje. Przykładowo, w wieku 5 lat wielkość akomodacji wynosi aż 20 dioptrii, w wieku 20 lat spada do 10 dioptrii, a w wieku 70 lat równa jest zeru. Dlatego też starsi ludzie muszą uzupełniać ten brak akomodacji noszeniem szkieł plusowych do patrzenia z bliska.

5.1.1.14. Komory oka

Przednia komora oka jest to przestrzeń ograniczona tylną powierzchnią rogówki, przednią powierzchnią torebki soczewki razem z przednią powierzchnią tęczówki. *Tylna komora* oka znajduje się za tęczówką, pomiędzy boczną częścią soczewki a ciałem rzęskowym. Obie komory wypełnione są cieczą wodnistą, produkowaną przez ciało rzęskowe. Wytworzona ciecz zbiera się najpierw w komorze tylnej, następnie szczeliną między soczewką a tęczówką i dalej przez źrenicę przedostaje się do komory przedniej. Z komory przedniej częściowo jest wchłaniana przez tęczówkę, a reszta odpływa przez tzw. kąt przesączania, znajdu-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

jący się pomiędzy obwodową częścią rogówki a tęczówką. Tam też płyn komory przedniej uchodzi do tzw. żył wodnych, aby ostatecznie dotrzeć do splotów żylnych twardówkowo-nadtwardówkowych, opuszczających oko. Krążenie cieczy wodnej, a więc i prawidłowa budowa komory przedniej i tylnej ma ogromne znaczenie w regulacji ciśnienia śródocznego.

5.1.1.15. Plamka ślepa (Mariotte'a)

Jest to pusta przestrzeń w polu widzenia, spowodowana tym, że na niewielkim obszarze siatkówki, nieco poniżej plamki żółtej, nie występują elementy percepcyjne (czopki i pręciki). Odpowiada to tarczy nerwu wzrokowego (skupieniu włókien nerwowych w obrębie siatkówki). Gdy promienie świetlne zogniskują się na plamce ślepej, występuje niewidzenie małego wycinka z pola widzenia. Jest to zjawisko normalne.

W górno-bocznej części oczodołu znajduje się gruczoł łzowy wydzielający łzy mające za zadanie oczyszczać powierzchnię oka z zabrudzeń i nawilżać ją.

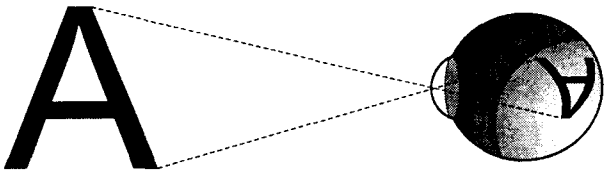
5.1.2. Działanie oka

Układ optyczny oka przyrównać można do aparatu fotograficznego, przy czym rolę soczewek obiektywu spełniają rogówka i soczewka oka, rolę przysłony – tęczówka, a warstwy światłoczułej kliszy – siatkówka.

Światło wpadające do oka biegnie przez rogówkę, komorę przednią oka, soczewkę i ciało szkliste, by zakończyć swą podróż na siatkówce wywołując wrażenie wzrokowe przekazywane do mózgu za pośrednictwem nerwów łączących się w nerw wzrokowy. Rogówka, wraz z cieczą wodnistą, soczewką i ciałem szklistym, stanowią układ skupiający promienie świetlne tak, by na siatkówce pojawiał się ostry obraz obserwowanego przedmiotu i dawał jak najostrzejsze wrażenie wzrokowe. Dlatego też soczewka ma możliwość zmiany swojego kształtu, a co za tym idzie mocy optycznej. Pozwala to na ogniskowanie na siatkówce przedmiotów znajdujących się w różnych odległościach od oka. Zdolność tę nazywamy akomodacją. Ostre widzenie uzyskiwane jest wtedy, gdy ognisko obrazowe pokrywa się z siatkówką. W przypadku, gdy oko nie jest w stanie zogniskować światła dokładnie na siatkówce mówimy o wadach wzroku. Moc optyczna oka nieakomodującego wynosi około +60 dioptrii, przy czym około 2/3 tej mocy przypada na rogówkę.

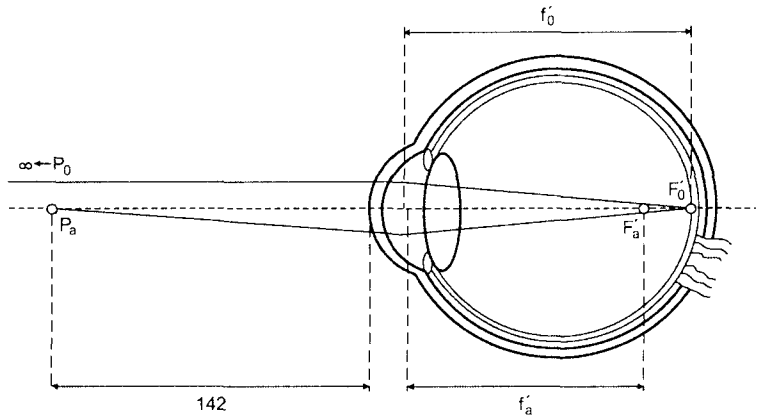
Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Obraz przedmiotu powstający na siatkówce jest rzeczywisty, pomniejszony i odwrócony[2] (rys. 5.5), co wynika z fizycznej budowy oka (soczewka odwraca obraz). W pierwszych dniach życia mózg człowieka uczy się prawidłowo widzieć obraz obracając go, by w późniejszym życiu robić to już automatycznie. Oznacza to, że niemowlę widzi świat „do góry nogami" i dopiero po pewnym czasie zaczyna widzieć normalnie.



Rys. 5.5. Schemat powstawania obrazu odwróconego na siatkówce oka

Układ optyczny oka z pewnym przybliżeniem można uważać za centryczny. Środki krzywizn rogówki i soczewki leżą na prostej zwanej osią optyczną oka. Występuje jednak rozbieżność osi optycznej i osi widzenia, która jest wynikiem przesunięcia dołka środkowego poza oś optyczną oka. W efekcie występuje obrót osi widzenia względem osi optycznej średnio o 5 stopni.



Rys. 5.6. Charakterystyczne parametry układu optycznego oka

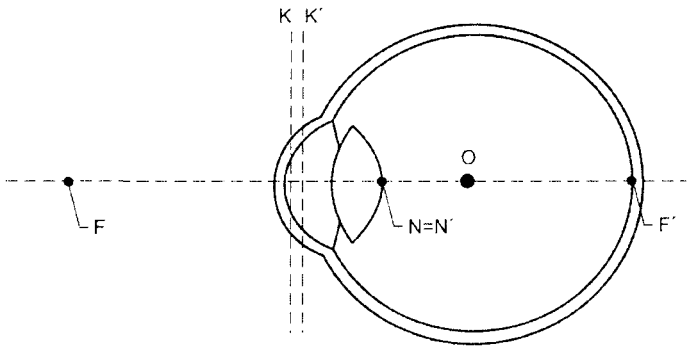
[2]Przez wiele wieków sądzono, że obraz tworzony na siatkówce oka nie jest odwrócony. Nawet wielki Leonardo da Vinci uległ temu fałszywemu poglądowi wykonując ciekawy rysunek, na którym promienie świetlne przecinają się dwa razy: po raz pierwszy w środku źrenicy i po raz drugi w środku soczewki oka, dając w efekcie obraz prosty.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Na rysunku 5.6 przedstawiono charakterystyczne parametry oka jako układu optycznego. Nad osią symetrii oka znajdują się parametry dotyczące oka nieakomodującego (oznaczone indeksem o), natomiast pod osią – akomodującego (oznaczenie indeksem a). Powierzchnie soczewki zaznaczone są liniami przerywanymi.

5.1.3. Oko standardowe

W okulistyce i optyce okularowej konieczna jest znajomość parametrów optycznych zarówno poszczególnych części oka, jak też oka jako całości. Ustalenie wartości tych parametrów jest zadaniem trudnym, gdyż oko jest złożonym układem optycznym o regulowanej aperturze i zmiennej mocy optycznej. Wiele czynników ma wpływ na jego właściwości odwzorowujące. Poszczególne elementy, zwłaszcza rogówka i soczewka, ściśle biorąc, nie są jednorodne pod względem optycznym, a ich powierzchnie mają skomplikowany kształt. W dodatku oczy poszczególnych ludzi różnią się od siebie. Mimo to układ optyczny oka znany jest dość dobrze. Powszechnie operuje się modelem tzw. *oka standardowego*, którego parametry podał już w XIX w. Helmholtz. Obecnie pod pojęciem oka standardowego rozumie się zwykle model oka zaproponowany przez *Gullstranda*. Taki model, z pewnymi modyfikacjami przedstawiony jest na rysunku 5.7. W większości zastosowań korzystniej wydaje się operować tym uproszczonym modelem, niż dążyć do skrajnej dokładności, która wydaje się zresztą pozorna, wobec różnic między oczami poszczególnych ludzi.



Rys. 5.7. Układ optyczny oka standardowego (wg Gullstranda)

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Parametry charakterystyczne tzw. oka standardowego (teoretycznego) wg Gullstranda przedstawia tabela 5.1. Są to uśrednione parametry uzyskane doświadczalnie na podstawie badań większej liczby osób.

Tab. 5.1. Niektóre parametry optyczne standardowego oka według Gullstranda

	W spoczynku	Przy maksymalnej akomodacji
Długość gałki ocznej	24,39 mm	
Położenie środka obrotu*)	13,5 mm	
Ogniskowa przedmiotowa	–17,05 mm	–14,17 mm
Ogniskowa obrazowa	22,78 mm	18,93 mm
Położenie płaszczyzny głównej przedmiotowej*)	1,36 mm	1,77 mm
Położenie płaszczyzny głównej obrazowej*)	1,60 mm	2,09 mm
Położenie punktu węzłowego przedmiotowego*)	7,08 mm	6,53 mm
Położenie punktu węzłowego obrazowego*)	7,33 mm	6,85 mm
Położenie źrenicy wejściowej*)	3,04 mm	
Powiększenie źrenicy wejściowej**)	1,15×	
Położenie źrenicy wyjściowej*)	3,72 mm	
Powiększenie źrenicy wyjściowej**)	1,05×	
Położenie źrenicy wyjściowej*)	3,72 mm	
Zdolność zbierająca przedmiotowa	58,64 dptr	70,57 dptr

*) odległość od wierzchołka rogówki

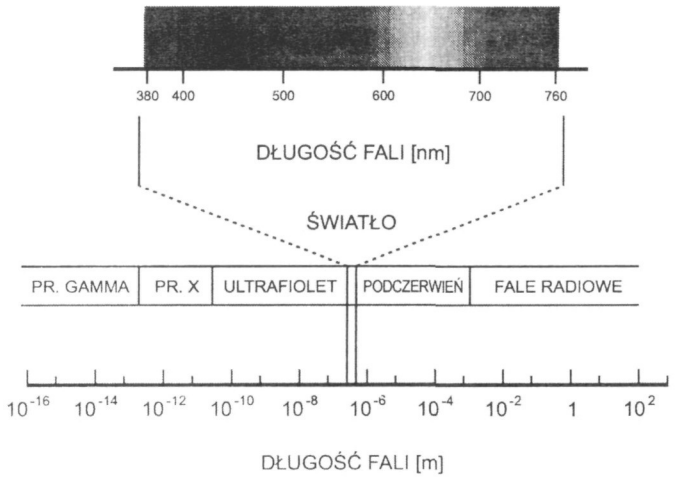
**) względem rzeczywistej źrenicy oka

5.1.4. Widzenie kolorów

Z szerokiego pasma fal elektromagnetycznych oko ludzkie reaguje na bardzo niewielki wycinek długości fal. Związane jest to z własnościami fizyko-chemicznymi rogówki, czopków i pręcików. Odbieramy zatem tylko światło, które mieści się w zakresie tzw. *okna optycznego*. Okno optyczne to przedział długości fali elektromagnetycznej (światła) od ok. 380 nm, co odpowiada światłu o barwie fioletowej, do ok. 760 nm, co odpowiada światłu o barwie czerwonej (niektórzy autorzy podają nieco inne wartości graniczne okna optycznego, np. od 400 do 700 nm, co wynika to z dość szerokiego zakresu długości fal dla czerwieni i fioletu). Powyżej długości 760 nm znajduje się niewidoczna dla człowieka podczerwień, a poniżej 380 nm, również niewidoczny, ultrafiolet. Do fal elektromagnetycznych zaliczamy także niewidoczne dla człowieka promienie gamma, promienie X i inne – całość przedstawia rys. 5.8.

Promieniowanie o długości fali spoza okna optycznego nie jest rejestrowane przez oko. Promieniowanie widzialne, które wniknie do oka, wywołuje w czop-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



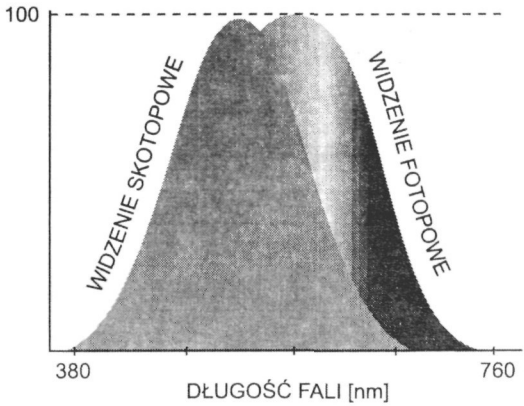
Rys. 5.8. „Okno optyczne" na tle innych długości fali elektromagnetycznej

kach i pręcikach reakcje elektrochemiczne o różnym natężeniu, stając się źródłem bodźców.

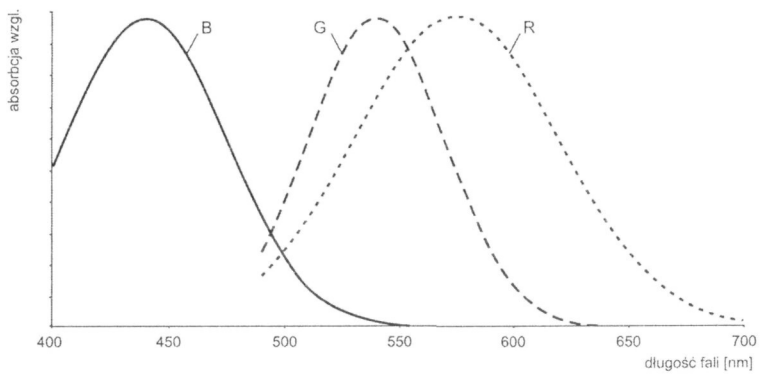
Ze względu na różną budowę czopków i pręcików występują różne właściwości widzenia ciemnego (przy małym oświetleniu, np. w nocy) i jasnego (przy dużym oświetleniu, np. w dzień). Przyjmuje się maksimum czułości czopków na 550 nm, a pręcików na 510 nm. Rysunek 5.9 przedstawia wykres krzywej czułości widmowej oka ludzkiego dla widzenia jasnego (przy świetle dziennym – tzw. *widzenie fotopowe*) i ciemnego (nocą – tzw. *widzenie skotopowe*). Łatwo zauważyć najwyższą czułość oka w punktach 510 nm i 550 nm, malejącą wraz z oddalaniem się od tych maksimów, aż do osiągnięcia wartości zero na krańcach okna optycznego – jest to jednoznaczne ze ślepotą oka na światło o danej długości fali.

W fotoreceptorach siatkówki znajdują się różne barwniki (pigmenty), które pod wpływem światła ulegają rozpadowi. W pręcikach barwnikiem takim jest *rodopsyna* (*czerwień wzrokowa*, *purpura wzrokowa*), w czopkach zaś – *jodopsyna*. Oba barwniki wzrokowe mają podobną budowę. W ich skład wchodzą dwa elementy: *retinen*, będący aldehydem witaminy *A* oraz specjalne odmiany białka zwanego *opsyną*. W pręcikach opsyna występuje tylko w jednej postaci, tzw. *skotopsyny*, natomiast w czopkach – w trzech formach noszących wspólną nazwę *fotopsyny*: *R*, *G* i *B* (od pierwszych liter angielskich nazw kolorów: *red, green* i *blue*), w zależności od barwy, na którą przypada maksimum ich absorpcji.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 5.9. Zależność czułości oka ludzkiego od długości fal elektromagnetycznych dla widzenia jasnego (fotopowego) i dla widzenia ciemnego (skotopowego)



Rys. 5.10. Wrażliwość widmowa trzech rodzajów czopków

W czopkach z fotopsyną *R* najsilniejszy sygnał na wyjściu będzie wywoływała jednostkowa porcja światła czerwonego (~ 560 nm), analogicznie w czopkach *G* – światła zielonego (~ 530 nm), zaś w czopkach *B* – niebieskiego (~ 420 nm) (rys. 5.10). Podczas obserwacji barwnego punktu jego obraz tworzy się na siatkówce dzięki pobudzeniu odpowiednich czopków w odpowiednim stopniu. Mózg odbiera z tego punktu trzy informacje od czopków z fotopsyną *R*, *G* i *B* i na ich podstawie tworzy subiektywne wrażenie koloru obserwowanego punktu.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

5.1.5. Widzenie stereoskopowe

Każde z obojga oczu obejmuje pewien zakres przestrzeni zwany *polem widzenia*, którego obraz pada na siatkówkę. Widzenie przestrzenne, czyli stereoskopowe, możliwe jest dzięki temu, że pola widzenia obojga oczu zachodzą na siebie. Jedno oko nakierowane jest na obserwowany przedmiot pod innym kątem niż drugie, a to z kolei powoduje nieco odmienne odzwierciedlenie obu bodźców wzrokowych na siatkówce. Gdy patrzymy na przedmiot ustawiony bardzo daleko od nas, osie widzenia obojga oczu ustawione są prawie równolegle. Jeżeli przedmiot ten będziemy zbliżali w naszym kierunku, to mięśnie gałek ocznych będą zmieniać ich położenie tak, by osie widzenia podążały za tym przedmiotem, a tym samym przecięły się. Zjawisko to nosi nazwę konwergencji. Im bliżej oczu znajdzie się przedmiot, tym większy będzie kąt, pod jakim przetną się osie patrzenia. Analizując ten kąt mózg człowieka wnioskuje o odległości obserwowanego przedmiotu od oczu. Gdyby zatem człowiek wyposażony był w tylko jedno oko, bardzo trudno byłoby mu określać odległość obserwowanego przedmiotu od siebie. Przedstawiona strategia szacowania odległości na podstawie różnicy między bodźcami odbieranymi lewym i prawym okiem jest skuteczna mniej więcej do 60 m. Ocena odległości powyżej tej granicy odbywa się w wyniku bardziej skomplikowanych procesów porównań i analiz dokonujących się w odpowiednich obszarach kory mózgowej.

5.1.6. Wady wzroku

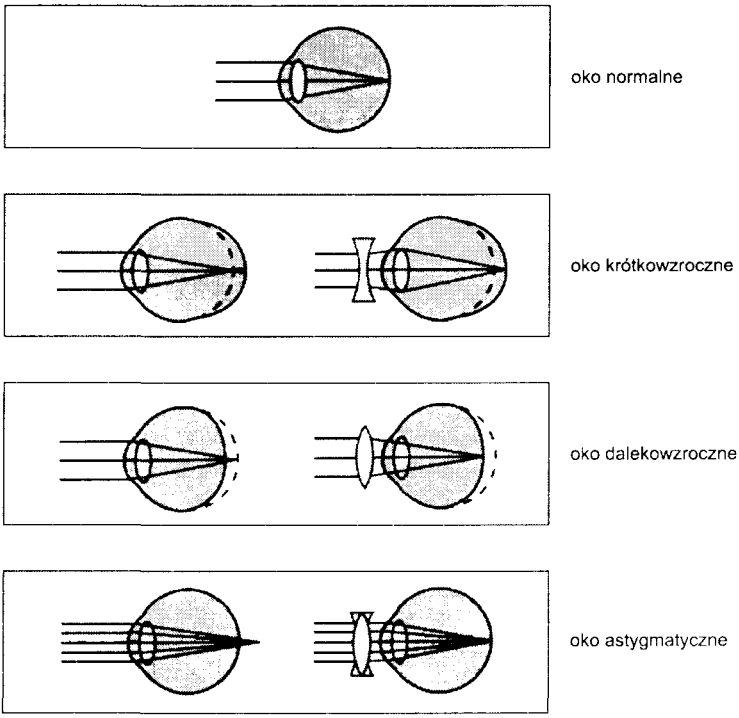
Oko miarowe skupia równoległą wiązkę promieni na warstwie fotoreceptorowej siatkówki bez akomodacji. Inaczej mówiąc ognisko obrazowe układu optycznego oka nieakomodującego leży na siatkówce. Drobne niezgodności wymiarów geometrycznych, długości oka i jego układu optycznego powodują niemiarowość. Wydłużenie gałki ocznej o 1 mm powoduje krótkowzroczność −2.5 dptr. Oko o 1 mm za krótkie będzie +2.5 dptr nadwzroczne. Typowe wady refrakcji oka przedstawione są na rys. 5.11.

5.1.6.1. Krótkowzroczność

Jeśli oko jest za długie lub rogówka albo soczewka zbyt wypukłe, albo współczynniki załamania za duże, to moc łamiąca oka jest zbyt duża. Wtedy obraz powstaje przed siatkówką. Jest to krótkowzroczność. Medyczna nazwa to *myopia* – jest to zbitka greckich słów oznaczających mrużenie oczu; przymknięcie oka powoduje nieznaczne przesunięcie się obrazu w kierunku siatkówki. Żeby dobrze

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

zobaczyć przedmiot krótkowidz przysuwa przedmiot bliżej oczu. Pełną korekcję krótkowzroczności daje soczewka ujemna (rozpraszająca). Szkło korekcyjne ujemne oddalane od oka powinno być coraz silniejsze; soczewka kontaktowa będzie więc słabsza od okularowej.



Rys. 5.11. Wady wzroku i ich eliminacja za pomocą szkieł korekcyjnych

5.1.6.2. Nadwzroczność

Jeśli oko jest za krótkie, lub rogówka albo soczewka zbyt płaskie, albo współczynniki załamania za małe, to moc łamiąca oka jest zbyt mała. Wtedy obraz powstaje za siatkówką. Jest to nadwzroczność. Medyczna nazwa to *hyperopia*. Żeby dobrze zobaczyć przedmiot dalekowidz odsuwa przedmiot od oczu. Nadwzroczność wzrasta z wiekiem w wyniku zmniejszenia sprawności mięśnia rzęskowego i elastyczności soczewki. Korekcję nadwzroczności zapewniają soczewki skupiające.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

5.1.6.3. Astygmatyzm (niezborność rogówkowa)

Jest wadą polegającą na zniekształceniu widzenia wskutek niesymetryczności rogówki oka. Jeżeli promień krzywizny rogówki oka w płaszczyźnie pionowej jest inny niż w płaszczyźnie poziomej, to promienie świetlne padające na różne części rogówki załamywane są w różnym stopniu. Powoduje to, że widziany obraz jest nieostry. Aby skorygować taką wadę stosuje się okulary z soczewkami cylindrycznymi. Oko ludzkie posiada zwykle tzw. niezborność fizjologiczną o wartości do 0.5D, która nie wymaga korekcji.

5.1.6.4. Daltonizm

Polega na złym rozpoznawaniu barw. Nazwa wady pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka i chemika J. Daltona, który jako pierwszy opisał ślepotę na barwy zieloną i czerwoną. Może być to wada wrodzona lub nabyta. Daltonizm wrodzony jest wadą dziedziczną, na którą cierpi w różnym stopniu 8% mężczyzn i 0.5%kobiet. Do diagnostyki daltonizmu służą tablice pseudoizochromatyczne.

5.2. Narząd słuchu i równowagi

Słuch jest zmysłem (receptorem) sygnałów akustycznych, za pomocą którego doznajemy wrażeń dźwiękowych. Przetwarza on fale akustyczne na impulsy bioelektryczne, z których mózg otrzymuje informacje potrzebne do wytworzenia wrażenia dźwiękowego.

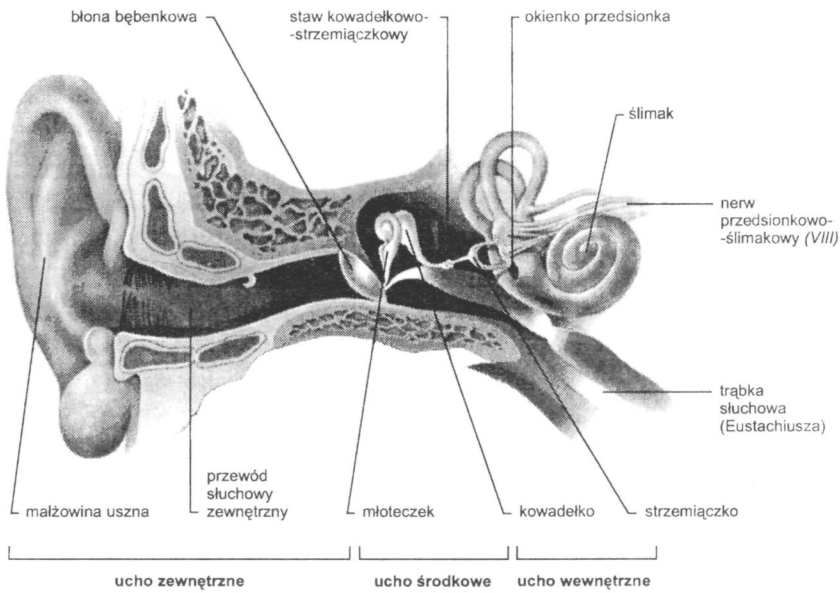
Zmysł słuchu daje możliwość analizowania dźwięków, lokalizowania ich źródeł w przestrzeni, wyodrębniania pożądanych dźwięków a eliminowaniu ze świadomości innych. Ten ostatni czynnik (natury psychologicznej) stanowi o różnicach między odbiornikami akustycznymi: subiektywnym (uchem) i obiektywnym (mikrofonem), który klasyfikuje odbierane dźwięki tylko pod względem ich właściwości fizycznych (natężenie).

Większość ludzi posiada słuch relatywny, który umożliwia odróżnienie wysokości współbrzmiących i następujących po sobie dźwięków. Pozwala to rozróżniać i zapamiętywać melodie. Istnieje również słuch bezwzględny (absolutny), pozwalający na rozpoznawanie bezwzględnej wysokości dźwięków pojedynczych i składników współbrzmień. Jest on jednak zdolnością rzadką i nie wpływa na zdolności muzyczne.

Ze zmysłem słuchu związany jest ściśle zmysł równowagi. Dostarcza on informacji o kierunku działania siły ciężkości, o przyspieszeniach kątowych i linio-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

wych oraz o ruchach wykonywanych przez głowę w przestrzeni. Jego receptory (należące do proprioreceptorów) zlokalizowane są w błędniku ucha (tzw. narząd przedsionkowy), który składa się z trzech kanałów półkolistych i przedsionka.



Rys. 5.12. Budowa ucha

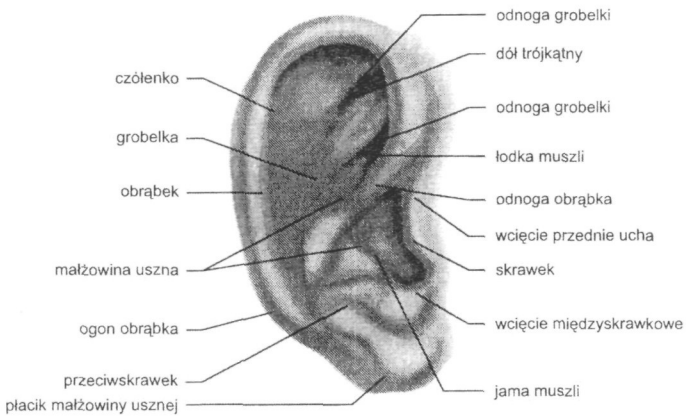
Z uwagi na ścisłą zależność w zakresie budowy między narządami słuchu i równowagi (choć czynnościowo są one niezależne) traktuje się je jako jeden zespół określany mianem narządu słuchu i równowagi lub narządu przedsionkowo-ślimakowego. Składa się on z (rys. 5.12):

- ucha zewnętrznego, gdzie znajduje się małżowina uszna i prowadzący głębiej przewód słuchowy zewnętrzny, zamknięty błoną bębenkową;
- ucha środkowego, w skład którego wchodzą: jama bębenkowa, trąbka słuchowa, jama sutkowata i komórki sutkowate. W jamie bębenkowej znajdują się kosteczki słuchowe – młoteczek zrośnięty z błoną bębenkową, kowadełko i strzemiączko, połączone ze sobą stawem. Kosteczki łączą błonę bębenkową z uchem wewnętrznym;
- ucha wewnętrznego, położonego w kości skalistej, zbudowanego z błędnika kostnego (przedsionek, wychodzące z niego kanały półkoliste i ślimak kostny), w którym tkwi błędnik błoniasty.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

5.2.1. Ucho zewnętrzne

Ucho zewnętrzne (rys. 5.13) położone jest na bocznej powierzchni głowy. Rozpoczyna się małżowiną uszną, która jest fałdem skóry wzmocnionym zrębem chrzęstnym. Małżowina przechodzi w przewód słuchowy zewnętrzny wysłany skórą, którego część boczna ma szkielet chrzęstny, część przyśrodkowa zaś utworzona jest przez kość skroniową.



Rys. 5.13. Ucho zewnętrzne

Zadaniem ucha zewnętrznego jest zbieranie fal dźwiękowych z powietrza i kierowanie ich do wnętrza narządu słuchu. Znajdujące się pośrodku małżowiny usznej zagłębienie (tak zwana muszla) oraz profil przewodu słuchowego umożliwiają wzmocnienie lub rezonans dźwięków zawartych w określonym paśmie częstotliwości. Ma to istotne znaczenie, gdyż większość dźwięków, które odgrywają rolę w mowie, leży w tym samym paśmie. Kiedy wpadają do małżowiny usznej, a potem wędrują przez przewód słuchowy, ich natężenie rośnie prawie dwukrotnie.

Ucho zewnętrzne spełnia też ważną rolę w lokalizowaniu źródła dźwięku. Rozpoznanie czy dźwięki powstają z prawej czy z lewej strony, jest możliwe dzięki temu, że do obojga uszu docierają one w różnym czasie i z niejednakowym natężeniem. Kształt małżowiny decyduje również o tym, że potrafimy lokalizować dźwięki powstające za nami. Jej krawędź jest tak uformowana, że powoduje ich zanikanie w paśmie od 3000 do 6000 Hz. Zmieniają wtedy swój charakter, a mózg interpretuje je jako wytwarzane z tyłu. Dźwięki dochodzące znad głowy ulegają podobnej zmianie, tylko w innym zakresie częstotliwości.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

5.2.2. Ucho środkowe

Ucho środkowe oddzielone jest od ucha zewnętrznego *błoną bębenkową*. Rozpoczyna się ono najobszerniejszą częścią – *jamą bębenkową*, zawierającą łańcuch trzech kosteczek słuchowych. Jama ta przyśrodkowo granicząc z uchem wewnętrznym, a bocznie z błoną bębenkową, ku tyłowi łączy się z układem komórek sutkowych kości skroniowej, ku przodowi zaś zwęża się przechodząc w trąbkę słuchową, która uchodzi do gardła. Wszystkie te części ucha środkowego wraz z przyśrodkowa powierzchnią błony bębenkowej są wysłane błoną śluzową.

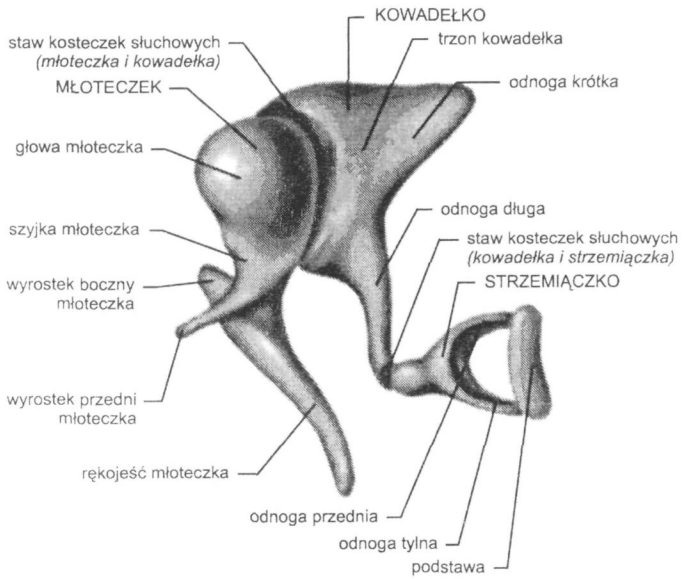
Jama bębenkowa położona jest w kości skroniowej między przewodem słuchowym zewnętrznym a błędnikiem. Z trzech kosteczek (rys. 5.14), które zawiera, maczugowaty *młoteczek* swoją cienką i wydłużoną rękojeścią opiera się o błonę bębenkową, a zgrubiałą, zaokrągloną głową łączy się stawowo z trzonem *kowadełka*, drugiej kosteczki mającej kształt zęba trzonowego o dwóch nierównych korzeniach. Dłuższy z tych wyrostków łączy się stawowo ze *strzemiączkiem*, trzecią kosteczką słuchową. Kształt strzemiączka odpowiada nazwie tej kosteczki. Swą rozszerzona podstawą zamyka ono *okienko przedsionka*, zwane również *okienkiem owalnym*, wiodąc do ucha wewnętrznego. Kosteczki słuchowe tworzą zatem łańcuch złożony z trzech ruchomo ze sobą połączonych ogniw między błoną bębenkową a uchem wewnętrznym. Kosteczki te usztywniają dwa mięśnie: mięsień strzemiączkowy przyczepiający się do strzemiączka oraz mięsień napinacz błony bębenkowej dochodzący do młoteczka.

Ruchy kosteczek słuchowych odbywają się głównie dzięki drganiom błony bębenkowej. Wspomniane mięśnie ucha środkowego usztywniają je, zapobiegając zbyt obszernym ruchom. *Trąbka słuchowa* (*trąbka Eustachiusza*) jest to cewka o długości 3–4 cm. Rozpoczyna się w jamie bębenkowej i kierując się do przodu i w stronę przyśrodkowa uchodzi do gardła. Na początku ma ona ściany kostne utworzone przez część skalistą kości skroniowej. Dalej jednak opuszcza kość, a biegnąc wzdłuż tylnego brzegu skrzydła większego kości klinowej na zewnętrznej powierzchni podstawy czaszki przyjmuje charakter chrząstki zagiętej u góry w rynienkę, którą zamyka błona włóknista.

Ucho środkowe przetwarza drgania akustyczne na mechaniczne i przekazuje je do ucha wewnętrznego.

Wbrew przekonaniu, że głośne dźwięki powodują silne drgania błony bębenkowej, jej wychylenia pod wpływem fali akustycznej są bardzo nieznaczne. Nie zdołałyby wywołać żadnej reakcji w wypełnionym płynem uchu wewnętrznym. Trudność ta zostaje pokonana dzięki genialnej konstrukcji narządu słuchu.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 5.14. Kosteczki słuchowe

Trzy kosteczki w uchu środkowym tworzą bardzo czuły, a zarazem sprawny mechanizm, złożony z dźwigni i łączników. Wzmacnia on przyłożoną siłę o mniej więcej 30%. Prócz tego powierzchnia błony bębenkowej jest około 20 razy większa od powierzchni podstawy strzemiączka, toteż gdy siła działająca na błonę bębenkową zostaje przeniesiona na okienko owalne, skupia się na dużo mniejszym obszarze. Obydwa wspomniane czynniki powodują, że nacisk wywołany drganiami błony bębenkowej przybiera na okienku owalnym wartości od 25 do 30 razy większe, co wystarcza, by wprawić w ruch płyn wewnątrz ślimaka.

Warunkiem prawidłowego funkcjonowania błony bębenkowej jest zachowanie po obu jej stronach jednakowego ciśnienia. Umożliwia to wymieniony wcześniej niewielki wentyl zwany trąbką słuchową (trąbką Eustachiusza), który łączy jamę bębenkową z jamą gardła. Otwiera się on, gdy coś przełykamy i przywraca prawidłowe ciśnienie w uchu środkowym.

5.2.3. Ucho wewnętrzne

Ucho wewnętrzne (rys. 5.15), zwane również *błędnikiem*, podobnie jak jama bębenkowa leży w części skalistej kości skroniowej. Położone jest między jamą bębenkową od strony bocznej a dnem przewodu słuchowego wewnętrznego

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

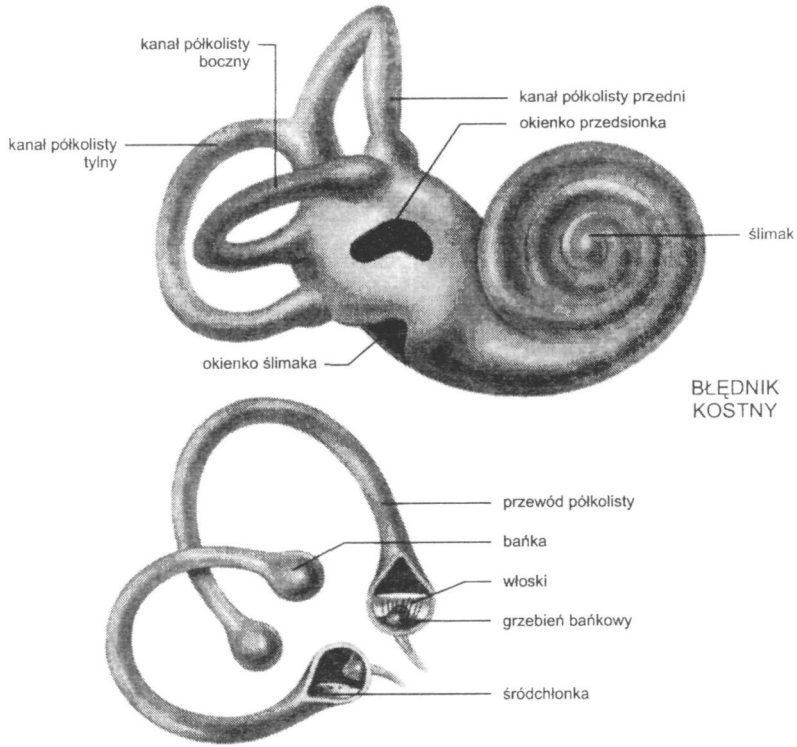
od strony przyśrodkowej. Błędnik składa się z błoniastych (łącznotkankowych) pęcherzyków i przewodów, które mieszczą się w odpowiednich, obejmujących je przestrzeniach wewnątrz kości skroniowej. Stosownie do tego wyróżnia się błędnik błoniasty i błędnik kostny.

5.2.3.1. Błędnik błoniasty

Wysłany jest na ogół nabłonkiem płaskim. W niektórych jednak miejscach znajduje się nabłonek zmysłowy o specjalnej budowie, od którego biegną włókna części ślimakowej i przedsionkowej nerwu ósmego. Błędnik błoniasty jest wypełniony cieczą wodnistą, *śródchłonką* (*endolimfą*). Składa się on z woreczka i łagiewki oraz czterech przewodów: trzech przewodów półkolistych i czwartego przewodu ślimakowego. Wszystkie one wychodzą z woreczka lub łagiewki. Oba te pęcherzyki, przedni – woreczek i tylny – łagiewka, połączone są ze sobą wąskim przewodem łagiewkowo-woreczkowym i przewodem śródchłonki, który przez kanalik kostny, wodociąg przedsionka uchodzi do jamy czaszki i pod oponą twardą rozszerza się w worek śródchłonki. Z łagiewki wychodzą i powracają do niej trzy przewody półkoliste: przedni, tylny i boczny, ustawione w trzech płaszczyznach prostopadłych do siebie. Każdy z nich rozszerza się na jednym końcu w bańkę błoniastą. Ponieważ istnieją trzy przewody półkoliste, należałoby się spodziewać sześciu ujść do przedsionka. Jest ich jednak tylko pięć, bowiem zbliżone do siebie końce przewodu przedniego i tylnego ustawione pionowo, przed ujściem do łagiewki łączą się w odnogę wspólną i tylko odnośny koniec przewodu bocznego, ustawionego poziomo, uchodzi do niej oddzielnie jako odnoga pojedyncza.

Krótki przewód łączący prowadzi z woreczka do śrubowo skręconego przewodu ślimakowego, który wykonuje 2.25–2.75 skrętów i kończy się ślepo. W bańkach każdego przewodu półkolistego a także w woreczku i łagiewce nabłonek zmysłowy zajmuje łącznie pięć organicznych miejsc zwanych grzebieniami bańkowymi oraz plamkami statycznymi woreczka i łagiewki. Z nich wychodzą włókna części przedsionkowej nerwu przedsionkowo-ślimakowego. Także przewód ślimakowy na jednej z trzech swoich ścian ma wydłużone pasmo nabłonka zmysłowego, tzw. *narząd spiralny*, zwany także *narządem Cortiego* (nazwany tak od Alfonsa Cortiego, który odkrył go w roku 1851), zaopatrywany przez włókna części ślimakowej nerwu przedsionkowo-ślimakowego.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 5.15. Ucho wewnętrzne (błędnik)

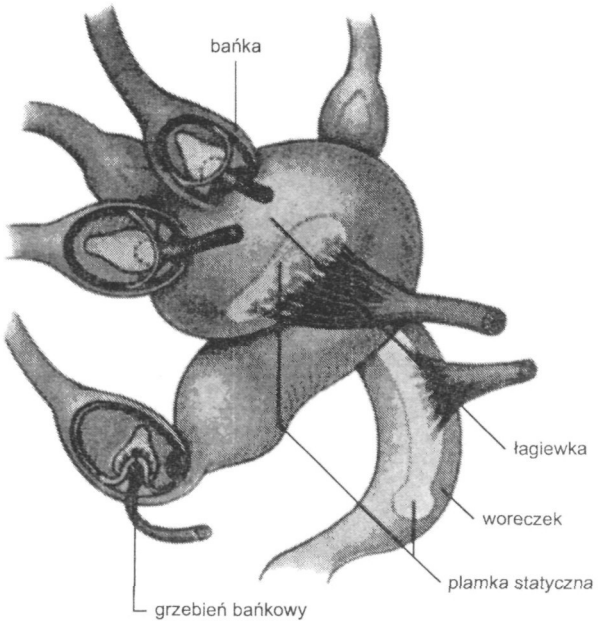
5.2.3.2. Błędnik kostny

Obejmuje błędnik błoniasty odtwarzając na ogół jego kształt, jest więc od niego znacznie pojemniejszy. W niektórych tylko miejscach przylega do jego ścian i tam się z nim zrasta. Poza tymi miejscami wszędzie między błędnikiem kostnym a błoniastym znajduje się przestrzeń przychłonkowa wypełniona płynem wodnistym, *przychłonką*, czyli cieczą błędnikową zewnętrzną (*perylimfą*).

Przestrzeń ta wysłana śródbłonkiem łączy się z jamą bębenkową dwoma otworkami: *okienkiem przedsionka*, o który opiera się podstawa strzemiączka i *okienkiem ślimaka* zamkniętym błoną bębenkową wtórną. Błędnik kostny składa się z części środkowej, przedsionka oraz z dwóch części obwodowych, przedniej i tylnej. Część przednią stanowi ślimak, tylną – trzy kanały półkoliste.

Kanały półkoliste kostne obejmują przewody półkoliste błoniaste. Podobnie do nich odróżniamy kanał półkolisty przedni, tylny i boczny oraz odpowied-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

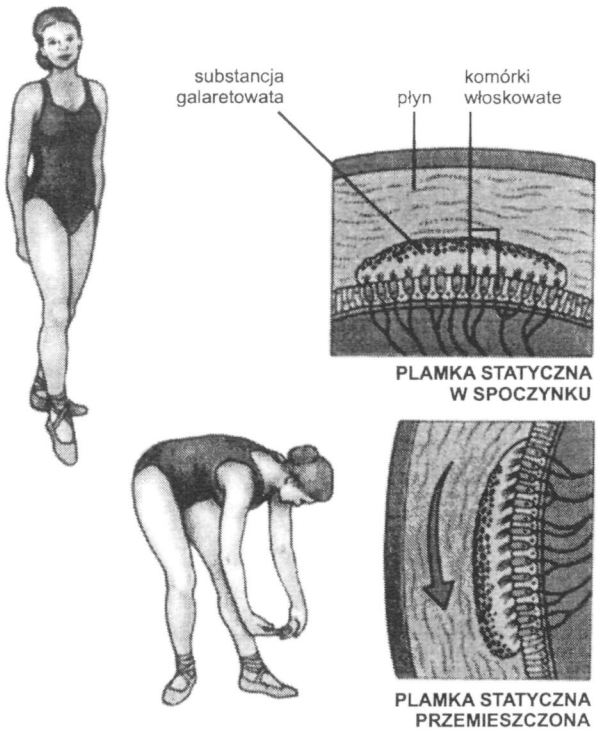


Rys. 5.16. Narząd równowagi [25]

nie bańki kostne. Niektórzy autorzy do ucha wewnętrznego zaliczają również przewód słuchowy wewnętrzny, przez który kierują się nerwy i naczynia do ucha wewnętrznego. W ścianie przyśrodkowej przedsionka, opierającej się o dno przewodu słuchowego wewnętrznego, leżą grupy otworków, tzw. plamki sitkowate. Przez te otworki przechodzą włókna nerwowe tworząc nerw przedsionkowo-ślimakowy.

Ślimak, z kształtu podobny jest do muszli ślimaka winniczka, zawiera błoniasty przewód ślimakowy. Ma on stożkowaty trzon kostny – wrzecionko biegnące w osi ślimaka. Podstawa ślimaka opiera się o dno przewodu słuchowego wewnętrznego, a wierzchołek zwrócony jest do jamy bębenkowej. Wrzecionko przebijają liczne kanaliki dla nerwów i naczyń. Dookoła wrzecionka owija się wychodzący z przedsionka kanał spiralny ślimaka, a w nim blaszka spiralna kostna. Uzupełnieniem blaszki spiralnej kostnej jest ściana bębenkowa przewodu ślimakowego, zwana także błoną podstawną lub ścianą boczną kanału spiralnego. Na niej spoczywa narząd spiralny. Do blaszki spiralnej kostnej oraz do zewnętrznej ściany kanału spiralnego ślimaka jest przymocowany przewód ślimakowy błędnika błoniastego. Ponieważ przewód ten jest znacznie mniejszy od

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



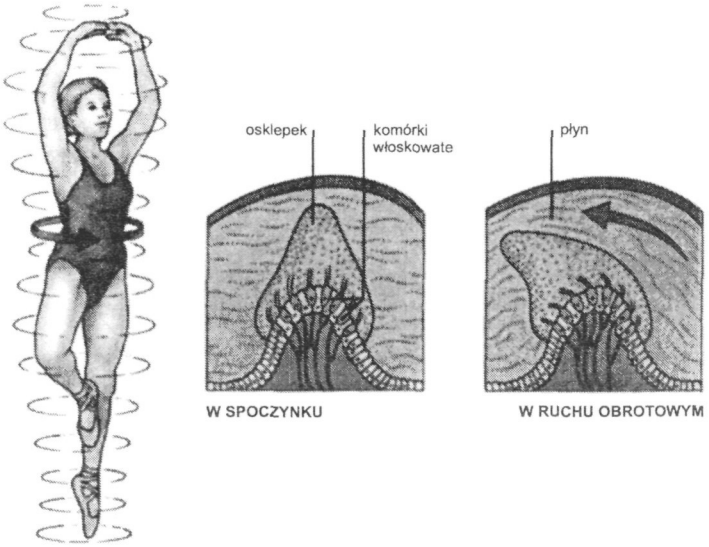
Rys. 5.17. Plamka statyczna [25]

kanału spiralnego ślimaka, między przewodem błoniastym a ścianą kanału spiralnego ślimaka znajdują się dwie przestrzenie przychłonkowe, wijące się spiralnie jak schody. Jedna z nich nazywa się *schodami przedsionka*, ponieważ wychodzi z przedsionka, druga *schodami bębenka*, gdyż przez okienko ślimaka sąsiaduje z jamą bębenkową. Przewód ślimakowy bywa określany nazwą *schodów środkowych*.

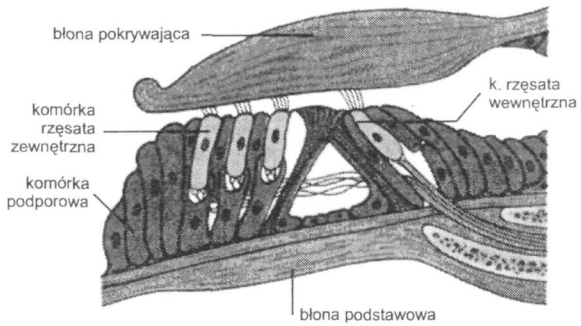
5.2.4. Mechanizm działania narządu słuchu (ucha wewnętrznego)

Ruch strzemiączka wywołuje w przychłonce falę ciśnienia, której amplituda zależy od intensywności, a miejsce jej występowania zależy od częstotliwości odbieranych dźwięków. Fale ciśnienia przychłonki, tzw. fale biegnące, przenosząc się od okienka przedsionka do szpary osklepka zwiększają swoją amplitudę aż

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 5.18. Grzebień bańkowy [25]



Rys. 5.19. Narząd spiralny (Cortiego) [25]

do miejsca, w którym zachodzi zmiana ich fazy. W miarę obniżania się częstotliwości dźwięków miejsce zmiany fazy oddala się od okienka przedsionka. W miejscu zmiany fazy fala ciśnienia przychłonki przenosi się na śródchłonkę wypełniającą przewód ślimakowy i blaszka podstawna podlega największemu odkształceniu. Komórki zmysłowe włoskowate narządu spiralnego są rozmieszczone na blaszce podstawnej w dwóch rzędach. W rzędzie po stronie wewnętrznej tunelu (Cortiego) jest 3500, a po stronie zewnętrznej 12 000 komórek zmysło-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

wych włoskowatych. Komórki te są jakby rozpięte pomiędzy blaszką podstawną a błoną pokrywającą, do której są przylepione ich włoski. Na swoim przebiegu pomiędzy ciałem komórki zmysłowej włoskowatej a błoną pokrywającą włoski przechodzą przez błonę siatkową.

Na skutek ruchu blaszki podstawnej, w miejscu zmiany fazy fali biegnącej komórki zmysłowe włoskowate zostają pobudzone w wyniku napinania się włosków pomiędzy błoną siatkową a błoną pokrywającą.

Ucho środkowe w czasie działania silnych dźwięków, posiada zabezpieczenie narządu spiralnego przed uszkodzeniem. Zabezpieczenie to oparte jest na dwóch małych mięśniach (naprężacz błony bębenkowej i mięsień strzemiączkowy). Mięśnie te pod wpływem skurczu wpływają na przenoszenie drgań błony bębenkowej przez kosteczki słuchowe. Dźwięk zawarty w falach akustycznych jest zmieniany bezpośrednio na wahania potencjału elektrycznego w okolicach ślimaka. Zjawisko to oparte jest na gromadzeniu ładunku dodatniego w śródchłonce (~ 80 mV). Po przetworzeniu fal akustycznych na impulsy nerwowe następuje ich przewodzenie przez włókna nerwowe. Każdą komórkę włoskowatą oplata siatka włókien nerwowych będących wypustkami komórek dwubiegunowych zwoju spiralnego ślimaka. Za pośrednictwem komórek nerwowych tego zwoju i ich wypustek tworzących nerw ślimakowy, stanowiący część słuchową nerwu VIII, impulsy nerwowe są przewodzone od mostu do jąder ślimakowych brzusznego i grzbietowego, gdzie znajduje się II neuron czuciowy. W nerwie ślimakowym biegnie ok. 28 000 włókien nerwowych, które przewodzą impulsy nerwowe od poszczególnych komórek zmysłowych włoskowatych. Tym samym poszczególne włókna przewodzą impulsy nerwowe wywołane tonami o określonej wysokości. W miarę wzrastania intensywności odbieranego dźwięku wzrasta częstotliwość impulsów nerwowych przewodzonych przez poszczególne włókna nerwu ślimakowego. Neuron czuciowy III znajduje się również w moście w jądrze brzusznym i grzbietowym ciała czworobocznego lub powyżej mostu na wzgórku dolnym blaszki pokrywy. Neurony jądra grzbietowego ślimaka wysyłają wypustki przechodzące na druga stronę mostu, wypustki neuronów jądra brzusznego ślimaka biegną zaś po tej samej i po przeciwnej stronie pnia mózgu.

Wstęga boczna przewodzi impulsy słuchowe do III lub IV neuronu czuciowego we wzgórku dolnym blaszki pokrywy i do IV lub V neuronu czuciowego w ciele kolankowatym przy środkowym. Z tej okolicy impulsy słuchowe przez promienistość słuchową biegną od pola słuchowego w zakręcie skroniowym górnym w płacie skroniowym. Według klasyfikacji Brodmanna jest to pole 41 kory mózgu. Komórkom zmysłowym włoskowatym kolejnych odcinków narządu spiralnego odpowiadają skupienia neuronów czuciowych w polu słuchowym w korze

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

mózgu. Dzięki temu w polu słuchowym sąsiadują ze sobą skupienia neuronów odbierające dźwięki wyższe o kolejne oktawy.

Poza czuciową reprezentacją narządu słuchu w polu 41 występują w jego sąsiedztwie w korze mózgu drugo- i trzeciorzędowe reprezentacje słuchu. Ich znaczenie polega na różnicowaniu i porównywaniu wysokości i natężenia odbieranych dźwięków.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Rozdział 6

Wpływ drgań mechanicznych i hałasu na organizm ludzki

6.1. Wprowadzenie

Zagadnienia drgań i hałasu traktowane były do niedawna jako dwie oddzielne dziedziny wiedzy. Wynikało to z panującej tendencji do ścisłej specjalizacji poszczególnych dyscyplin naukowych. Teoria drgań mechanicznych rozwijała się głównie w ramach mechaniki ciała stałego i była przedmiotem zainteresowania przede wszystkim konstruktorów maszyn i urządzeń. Problemy związane z hałasem były natomiast domeną akustyki i stanowiły pole działania głównie architektów (akustyka budowli) i fizjologów (fizjologia słuchu). Podział ten był wyłącznie formalny i przeczył jednorodnej naturze fizycznej tych zjawisk.

Dynamiczny rozwój cywilizacyjny, którego efektem ubocznym było pojawienie się wielu zagrożeń dla środowiska naturalnego człowieka, spowodował dążenie do konsolidacji wysiłków specjalistów z różnych dziedzin w celu sprostania nowym wyzwaniom. Pojawiła się tendencja do tworzenia interdyscyplinarnych działów nauki. Jej efektem było m.in. powstanie wibroakustyki integrującej problematykę drgań i hałasu. W ten sposób historia nauki zatoczyła koło, powracając do koncepcji pierwszych twórców nauki o drganiach i dźwiękach, traktujących te zjawiska fizyczne jako nierozłączną całość (dowodem na to jest klasyczne dzieło lorda J. Rayleigha „Teoria dźwięku" z 1877 r.). Korzyści płynące z takiego „integralnego" podejścia, to lepsze zrozumienie współzależności między

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

tymi zjawiskami, ich dokładniejsza i bardziej jednoznaczna identyfikacja, a także większe możliwości redukcji niepożądanych skutków ich działania.

Ogólnie można powiedzieć, że nie byłoby hałasu bez drgań, a więc te ostatnie są pojęciem nadrzędnym, obejmującym również hałas. W różnych opracowaniach można znaleźć wiele definicji drgań. Jedna z bardziej ogólnych mówi, że drgania (oscylacje) są to procesy fizyczne opisywane funkcjami na przemian rosnącymi i malejącymi. Interesujące nas drgania mechaniczne (wibracje) definiuje się jako ruch ciała lub jego części określony zmienną w czasie wielkością, której wartość na przemian rośnie lub maleje względem wartości średniej w następujących po sobie kolejno przedziałach czasu. Z kolei drgania akustyczne, to drgania mechaniczne, polegające na ruchu cząstek środowiska sprężystego względem położenia równowagi, w przedziale częstotliwości od 16 Hz do 20 kHz (więcej informacji na temat drgań układów dyskretnych i ciągłych można znaleźć w monografiach [3, 4]).

Nadmierna precyzja w rozróżnianiu zjawisk drgań i hałasu wydaje się zbędna, gdyż w świetle wcześniej poczynionych uwag mają one wspólną naturę fizyczną i ich zakresy pojęciowe w wielu miejscach zachodzą na siebie. Dlatego na potrzeby tego skryptu wprowadzimy następujące upraszczające (zawężające) definicje:

- *hałas* – to wszelkie niepożądane, nieprzyjemne, dokuczliwe lub szkodliwe drgania mechaniczne ośrodka sprężystego, działające za pośrednictwem powietrza na organ słuchu i inne zmysły oraz elementy organizmu człowieka;

- *drgania* (*wibracje*) – drgania oddziałujące nie za pośrednictwem powietrza, lecz ciał stałych.

Należy podkreślić, że w praktyce nie cała energia drgającego ciała stałego przepływa do stykającego się z nim organizmu człowieka. Część tej energii przekazywana jest cząsteczkom otaczającego powietrza i za ich pośrednictwem dociera do narządu słuchu. Dowodzi to słuszności postawionej wcześniej tezy o konieczności łącznego traktowania zjawisk drgań i hałasu.

6.2. Wpływ drgań mechanicznych na organizm ludzki

W wielu urządzeniach technicznych występują drgania mechaniczne, które oddziałują bezpośrednio na ludzi i mogą wpływać na ich samopoczucie, zdrowie

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

i wydajność w pracy. Rodzaj niekorzystnych zmian w organizmie, będących następstwem ekspozycji na drgania oraz szybkość powstawania tych zmian zależą w istotny sposób od miejsca ich wnikania do organizmu. Według tego kryterium drgania mechaniczne można podzielić umownie na dwa rodzaje:

- *drgania ogólne*, przekazywane do organizmu człowieka przez jego nogi, miednicę, plecy lub boki;
- *drgania miejscowe*, działające na organizm człowieka przez kończyny górne.

Podział ten ma charakter umowny, bowiem odróżnienie wibracji miejscowej od ogólnej jest z teoretycznego punktu widzenia nieuzasadnione.

Pewną odmianą drgań są *wstrząsy* – krótkotrwałe drgania nieregularne o dużej amplitudzie. Organizm reaguje na wstrząsy czynnie poprzez swe mięśnie, podczas gdy w przypadku drgań właściwych reaguje biernie, gdyż układ nerwowy, narząd równowagi i mięśnie nie są w stanie reagować na każdy impuls oddzielnie.

6.2.1. Źródła drgań

Przykładowymi źródłami drgań o działaniu ogólnym są:

- podłogi, podesty, pomosty w halach produkcyjnych i innych pomieszczeniach, na których zlokalizowane są stanowiska pracy. Pierwotnymi źródłami drgań są w tym przypadku eksploatowane w pomieszczeniach lub poza nimi maszyny oraz urządzenia stacjonarne, przenośne lub przewoźne, które wprawiają w drgania podłoże, na którym stoi operator. Przyczyną drgań podłoża może też być ruch uliczny czy kolejowy;
- platformy drgające;
- siedziska i podłogi środków transportu (samochodów, ciągników, autobusów, tramwajów, trolejbusów oraz pojazdów kolejowych, statków, samolotów itp.);
- siedziska i podłogi maszyn budowlanych (np. do robót ziemnych, fundamentowania, zagęszczania gruntów).

Na drgania mechaniczne o ogólnym działaniu na organizm narażeni są przede wszystkim kierowcy, motorniczy, maszyniści, operatorzy maszyn budowlanych

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

i drogowych. W tych przypadkach drgania przenoszone są do organizmu z siedzisk pojazdów przez miednicę, plecy i boki. Należy jednak pamiętać, że zawodowa ekspozycja na drgania ogólne często dotyczy też pracowników obsługujących w pozycji stojącej maszyny i urządzenia stacjonarne eksploatowane w pomieszczeniach. Wówczas drgania przenikają do organizmu pracownika przez jego stopy z drgającego podłoża, na którym usytuowane jest stanowisko pracy, a skutki działania tych drgań są podobne do skutków drgań transmitowanych z siedzisk.

Przykłady źródeł drgań miejscowych, działających na organizm człowieka przez kończyny górne, to:

- ręczne narzędzia udarowe o napędzie pneumatycznym, hydraulicznym lub elektrycznym (młotki pneumatyczne, ubijaki mas formierskich i betonu, nitowniki, wiertarki udarowe, klucze udarowe itp.);
- ręczne narzędzia obrotowe o napędzie elektrycznym lub spalinowym (wiertarki, szlifierki, piły łańcuchowe itp.);
- dźwignie sterujące maszyn i pojazdów obsługiwane rękami;
- źródła technologiczne (np. obrabiane elementy trzymane w dłoniach lub prowadzone ręką w procesach szlifowania, gładzenia, polerowania itp.).

Na drgania mechaniczne działające na organizm człowieka przez kończyny górne narażeni są głównie operatorzy wszelkiego rodzaju ręcznych narzędzi wibracyjnych stosowanych powszechnie w przemyśle maszynowym, hutniczym, stoczniowym, przetwórczym, a także w leśnictwie, rolnictwie, kamieniarstwie, górnictwie i budownictwie. Obszar potencjalnego zagrożenia pracowników tym rodzajem drgań jest zatem bardzo rozległy.

6.2.2. Fizjologiczne aspekty oddziaływania drgań na organizm ludzki

Drgania mechaniczne i wstrząsy oddziałują na tkanki i układy organizmu w sposób bezpośredni powodując przemieszczenia narządów i w następstwie podrażnienie wyspecjalizowanych struktur odbiorczych – receptorów, znajdujących się w skórze, mięśniach, ścięgnach, więzadłach, okostnej oraz w niektórych narządach.

Reakcja ustroju na wibrację zależy od informacji dostarczonych na skutek pobudzenia odpowiednich receptorów. Ponieważ receptory te wrażliwe są

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

na energię mechaniczną, określono je mianem mechanoreceptorów. Następuje w nich przetwarzanie energii bodźca na tzw. potencjał receptorowy. Pojawienie się tego potencjału jest wyrazem procesu pobudzenia zależnego od działającej wibracji. Powstałe w ten sposób impulsy biegną nerwami czuciowymi do rdzenia kręgowego. Tutaj informacja o wibracji zostaje z jednej strony przekazana do kory mózgowej, z drugiej zaś do pnia mózgu – ściślej – do tworu anatomicznego zwanego tworem siatkowym. Pobudzenie wibracyjne może w tworze siatkowym utrzymywać się bardzo długo, ponieważ jego strukturę stanowi gęsta sieć połączeń neuronowych tworzących zamknięte układy. Przekazane impulsy nerwowe krążą po tych zakończeniach neuronowych nawet jeszcze wtedy, gdy bodziec wibracyjny przestał działać. Tym też tłumaczy się długie utrzymywanie się reakcji organizmu na drgania, znacznie przekraczające czas przekazywania w środowisku wibracyjnym.

Wibracje o niższych częstotliwościach (do 35 Hz) odbierane są przez narząd przedsionkowy zlokalizowany w uchu wewnętrznym.

Wyższe częstotliwości odbierane są za pośrednictwem mechanoreceptorów, spośród których na szczególną uwagę zasługują *ciałka Pacciniego*. Ciałka Pacciniego są wrażliwe na drgania w szerokim zakresie częstotliwości od 30 do 600 Hz, a w zakresie 60–90 Hz są nawet jedynymi receptorami wibracji. Ciałka te leżą przede wszystkim głęboko w skórze oraz w tkance podskórnej, w okolicy pni nerwowych, stawów oraz w krezce jelita.

Drugim typem mechanoreceptorów są *ciałka Meissnera (receptory styku)*, które odbierają bodźce wibracji o częstotliwości 5–60 Hz, a więc zarówno drgania działające na organizm z zewnątrz jak i generowane w organizmie (skurcze serca, ruchy perystaltyczne, itp.). Ciałka te umieszczone są powierzchownie w brodawce skórnej, blisko granicy naskórka i skóry właściwej. Występują licznie w skórze powierzchni rąk i stóp.

Trzecim typem powierzchniowo położonego mechanoreceptora wibracji są *płytki Merkela* odbierające bodźce o częstotliwości 5–15 Hz.

Poza wymienionymi strukturami bodźce wibracyjne odbierane są przez *ciałka Golgiego-Mazzoniego* ułożone w ścięgnach mięśni.

Receptory w ściankach naczyń krwionośnych i oskrzeli mają naturę chemoreceptorów i mechanoreceptorów.

Jak z powyższego wynika, reakcja organizmu na bodziec wibracyjny ma charakter odruchu i odbywa się za pośrednictwem układu nerwowego.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

6.2.3. Energetyczny mechanizm działania wibracji na organizm ludzki

Wieloletnie obserwacje fizjologicznej reakcji ustroju na drgania o różnych parametrach doprowadziły do sformułowania prawa o tzw. energetycznym działaniu wibracji. Wykazano ścisły związek między nasileniem zaburzeń fizjologicznych a intensywnością wibracji mierzoną jej wartością energetyczną.

Energia wibracyjna E, przekazywana podczas ekspozycji jest proporcjonalna do natężenia drgań I, powierzchni bezpośredniego kontaktu z ciałem drgającym S oraz czasu narażenia t. Wielkość E można zatem wyrazić wzorem

$$E = I \cdot S \cdot t \,, \tag{6.1}$$

gdzie: E – energia przekazywana podczas ekspozycji na drgania [Nm], I – natężenie drgań [$Nm^{-1}s^{-1}$], S – powierzchnia styku [m^2], t – czas narażenia [s].

Natężeniem drgań nazywa się strumień energii przypadający na jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Wyraża się ono wzorem

$$I = \upsilon^2 \cdot \left|\frac{Z}{S}\right| \,, \tag{6.2}$$

gdzie: υ – prędkość drgań, $\left|\frac{Z}{S}\right|$ – moduł impedancji mechanicznej na jednostkę powierzchni styku [Nsm^{-3}]. Impedancję mechaniczną Z definiuje się jako stosunek siły przekazywanej układowi do jego prędkości. W warunkach, gdy S, t i $\left|\frac{Z}{S}\right|$ są stałe, wielkość przekazywanej na ciało człowieka energii wibracyjnej jest proporcjonalna do kwadratu prędkości drgań. Powyższe stwierdzenie ma istotne znaczenie dla oceny wibracji występujących na stanowiskach pracy pod kątem ich wpływu na zdrowie pracownika.

Zakładając, że badane drgania mają przebieg sinusoidalny o określonej częstotliwości i amplitudzie, można (zgodnie z prawem Webera-Fechnera[1]) określić intensywność ich oddziaływania na człowieka przez porównanie energii tych drgań z energią drgań odniesienia, wprowadzając bezwymiarowy wskaźnik intensywności odczuwania drgań, określony wzorem:

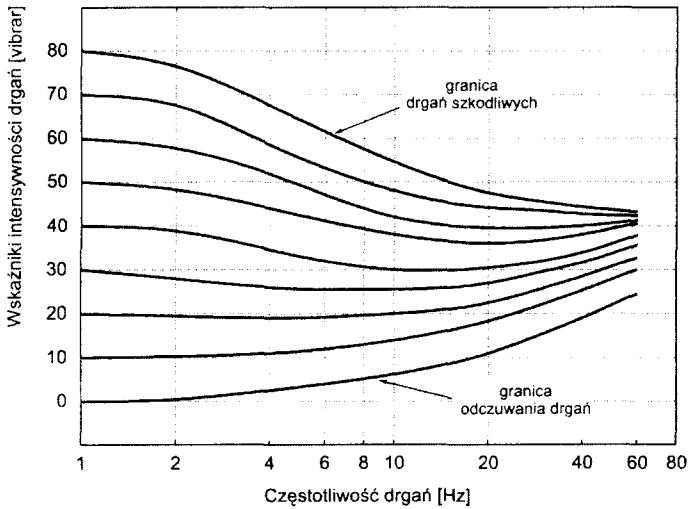
$$\xi = 10 \log \frac{E}{E_0} \,, \tag{6.3}$$

[1]Prawo Webera-Fechnera jest empirycznym prawem opisującym zależność pomiędzy subiektywnym wrażeniem fizjologicznym (np. głośność, jasność), a fizyczną wartością działającego bodźca. Zgodnie z nim wrażenie fizjologiczne jest proporcjonalne do logarytmu podniety. Prawo to sformułował ogólnie E.H. Weber (1795-1878), a opisał matematycznie G.T. Fechner (1801-1887).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

gdzie: ξ – intensywność odczuwania drgań o częstotliwości 1 Hz w vibrarach, E – energia danego drgania, E_0 – energia odniesienia odpowiadająca progowi odczuwalności drgań dla częstotliwości 1 Hz.

Zakres odczuwania amplitudy drgań został dla częstotliwości 1 Hz podzielony na 80 jednostek zwanych *vibrarami*. Dolną granicę tego zakresu stanowią drgania o amplitudzie 0.008 cm (0 vibrarów), górną zaś (granicę szkodliwości) drgania o amplitudzie 80 cm (80 vibrarów). W miarę jednak, jak częstotliwość wibracji oddala się od częstotliwości wzorcowej (1 Hz), intensywność danej wibracji wyrażona w vibrarach różni się od faktycznego wrażenia zmysłowego.

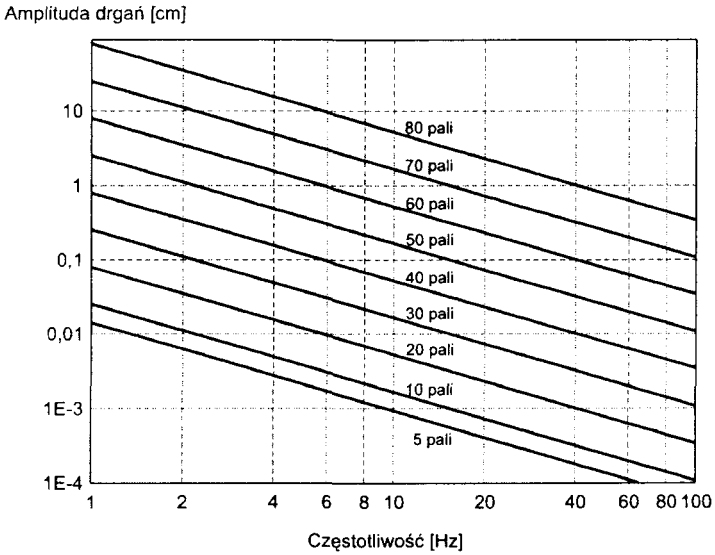


Rys. 6.1. Zmiany intensywności odczuwania drgań w zależności od częstotliwości

Dlatego też lepiej jest przedstawić odczuwalność wibracji w postaci rodziny krzywych jednakowego poziomu intensywności. Krzywe jednakowego poziomu intensywności odczuwania wibracji zostały opracowane przez J. Zellera i dotyczą zakresu częstotliwości od 0.2 do 100 Hz. Jednostką poziomu intensywności odczuwania wibracji jest *pal*.

Tak określone progi odczuwalności bodźca wibracyjnego dotyczą jedynie przebiegu harmonicznego, co jest znacznym uproszczeniem, bowiem w praktyce najczęściej mamy do czynienia z drganiami o przebiegu stochastycznym. W przypadku wibracji stochastycznych progi czucia są niższe, niż dla wibracji typu harmonicznego i różnica ta wynosi ok. 6 dB.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 6.2. Krzywe jednakowego poziomu intensywności odczuwania drgań

Obecnie dla wyrażenia intensywności odczuwania drgań proponuje się też inną zależność[2] określoną wzorem:

$$\xi = \left(\frac{E}{E_0}\right)^r , \tag{6.4}$$

gdzie: r – wykładnik odczuwania (dla zmysłu dotyku $r = 0.95$). Jeśli przyjąć, że $r \approx 1$, to uzyskuje się zależność liniową (a nie logarytmiczną, jak w prawie Webera-Fechnera).

6.2.4. Skutki oddziaływania drgań na organizm ludzki

Efektem ekspozycji człowieka na drgania mechaniczne mogą być zaburzenia czynności wielu narządów i ośrodków nerwowych przejawiające się m.in. w zmniejszeniu sprawności wykonywania określonych czynności. Zdolność do wykonywania jakiegoś zadania bardzo ogólnie można określić przebiegiem procesów pamięciowych, sprawnością ruchową, zdolnością widzenia, zdolnością swobodnego porozumiewania się itp.

[2]Zależność ta nosi nazwę *prawa potęgowego Stevensa* – od nazwiska amerykańskiego psychologa, S.S. Stevensa, który opracował technikę pomiaru wrażeń zmysłowych i opisał ją w 1957 r. jako pewną standardową procedurę.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Przy pewnym poziomie intensywności drgań u człowieka może pojawić się stan zmęczenia ogólnego, tj. poczucia zmniejszonej wydolności psychofizycznej. Ludzie dotknięci tym stanem są zahamowani, ograniczeni w działaniu, wykazują niechęć do pracy umysłowej i fizycznej. Uczucie zmęczenia ogólnego z fizjologicznego punktu widzenia spełnia zadania obronne: chroni przed przemęczeniem zmuszając do zmiany środowiska na takie, które zapewni konieczny wypoczynek. Dłuższe przebywanie w zasięgu drgań intensywnych powoduje zmiany czynności kory mózgowej, która jest podłożem procesów postrzegania, myślenia, zapamiętywania, odbierania wrażeń subiektywnych.

Stwierdzono również zmniejszenie zdolności widzenia. W odbieraniu bodźców świetlnych biorą udział dwa zespoły anatomiczne: oko oraz nerwy z korą mózgową. Wykazano, że drgania oprócz powodowania zmian czynności kory mózgowej mechanicznie oddziałują na gałki oczne, powodując przesuwanie się obserwowanego obrazu na siatkówce oka – powstaje wówczas wrażenie obrazu zamazanego.

Oprócz obniżenia zdolności widzenia zwężają się granice pola widzenia i szybkość postrzegania.

Narażenie narządu wzroku na drgania może być przyczyną obniżenia bezpieczeństwa ruchu drogowego na skutek trudności w odczytywaniu wskazań zegarów, opóźnienia postrzegania przeszkód, mylnego rozróżniania barw, itp.

Szczególnie niebezpieczne dla organizmu ludzkiego są drgania o częstotliwościach odpowiadających częstotliwościom drgań własnych poszczególnych narządów człowieka. W takich przypadkach nawet małe drgania przekazywane z otoczenia mogą wzbudzić duże drgania niektórych narządów (rezonans). W tabeli 6.1 przedstawiono częstotliwości własne drgań wybranych części organizmu ludzkiego.

Rezonans narządowy prowadzi do upośledzenia czynności wielu organów, co przejawia się ich mniejszą sprawnością lub wystąpieniem nieprawidłowych odruchów połączonych z bólem.

Istotnym objawem powstającym w następstwie rezonansu jest także upośledzenie mowy. Jest ono spowodowane rezonansowym drganiem szczęki, zmianami napięcia mięśnia krtani oraz drganiami słupa powietrza w jamie nosowo-gardłowej. Na to zjawisko ma wpływ także rezonans narządów klatki piersiowej. Drgania tych narządów (w zakresie 1–4 Hz) o dużej intensywności utrudniają także oddychanie oraz mogą spowodować ból w okolicy serca.

Wibracja niekorzystnie działa na wzrok, powoduje zwłaszcza pogorszenie jego ostrości. Można to stwierdzić przy dwóch zakresach częstotliwości: 20–40 Hz

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Tab. 6.1. Częstotliwości własne ciała człowieka i niektórych jego części

Ciało lub jego część	Częstotliwość własna [Hz]
Ciało człowieka stojącego	5 – 12
Ciało człowieka siedzącego	4 – 6
Barki i głowa człowieka stojącego	20 – 30
Tułów człowieka siedzącego na miękkim siedzeniu	2 – 3
Serce	5
Organy wewnętrzne	6 – 8
Szczęka	6 – 8
Żuchwa	100 – 200
Gałka oczna	60 – 90
System nerwowy	250
Błędnik	2,5
Nogi	5
Ręce	3
Głowa	4 i 25
Miednica	5
Żołądek	8
Krtań, tchawica	12 – 16
Pęcherz moczowy	10 – 18

oraz 60–90 Hz. Pogorszeniu ostrości towarzyszy również zwężenie pola widzenia i słabsze rozróżnianie barw.

Bardzo przykre następstwa wywołuje wibracja narządów jamy brzusznej, ponieważ ze względu na swobodne zawieszenie takich narządów jak żołądek, trzustka, śledziona czy wątroba, mogą one ulegać dużym pomieszczeniom.

Również podrażnienie narządu równowagi niesie za sobą nieprzyjemne skutki – są to objawy typowe dla choroby lokomocyjnej (kinetozy). Charakteryzują się one bólem i zawrotami głowy, szumem w uszach, dusznością oraz bólem żołądka i nudnościami.

Przedstawione wyżej dane świadczą o tym, że wibracja jako czynnik środowiskowy powoduje liczne przykre doznania, obniża wydajność pracy oraz może być przyczyną powstawania różnych schorzeń.

6.2.4.1. Choroba wibracyjna

Na skutek długotrwałego oddziaływania środowiska drgającego na organizm ludzki dochodzi do wystąpienia zespołu objawów chorobowych dotyczących zwłaszcza układu naczyniowego, kostnego i nerwowego, zwanych *chorobą wibracyjną* (*zespołem wibracyjnym*). Powstanie choroby wibracyjnej zależy nie tylko od wieloletniego narażania na chorobotwórcze działanie drgań wytwarza-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Tab. 6.2. Objawy choroby wibracyjnej obserwowane w różnych układach anatomicznych człowieka

Układ anatomiczny	Dolegliwości i objawy kliniczne
Układ nerwowy	reakcja zmęczeniowa ośrodkowego układu nerwowego, zespół ogólnego osłabienia, objawy asteniczne, zespół neurastenii, nerwica wegetatywna
Układ błędnikowy	zmiany zwyrodnieniowe w obrębie jąder przedsionkowych, zawroty i bóle głowy, zaburzenia równowagi, oczopląs, wrażenie przemieszczania się w przestrzeni, wrażenie ruchu przedmiotów, znaczna senność, niekiedy duszność i wymioty oraz bladość powłok skórnych, zmiany zwyrodnieniowe dźwiękoczułych komórek w uchu wewnętrznym – głuchota zawodowa
Układ naczyniowy	objawy zwiastunowe zaburzeń naczyniowych, przeczulica, mrowienie i drętwienie kończyn – rozwinięcie się niedoczulicy, napadowy skurcz naczyń, trwałe zwiększenia napięcia ściany naczyniowej – forma spastyczna, trwałe zniesienie napięcia ściany naczyniowej – forma atoniczna, zaburzenia odżywcze w tkankach i narządach anatomicznych
Układ kostno-stawowy	zmiany zwyrodnieniowe w stawach, upośledzenie ruchomości stawu, przebudowa struktury kości, ogniska zwyrodnieniowe w kościach, osłabienie wytrzymałości kości na urazy, upośledzenie procesów odrostowych, upośledzenie czynności mięśniowej, osłabienie odruchów ścięgnowych i okostnowych – procesy zwyrodnieniowe w stykach nerwowo-mięśniowych
Układ pokarmowy	bóle w okolicy nadżołądkowej, nudności, wymioty, odbijania, zgagi wzdęcia brzucha, uporczywe zaparcia, rozszerzenie i opuszczenie żołądka, zaburzenia czynności ruchowej i wydzielniczej przewodu pokarmowego, wystąpienie owrzodzeń żołądka lub dwunastnicy

nych przez urządzenia techniczne, lecz również od fizycznych parametrów tych drgań, ich energii, sposobu oddziaływania, specyfiki danego zawodu i wreszcie od wrażliwości osobniczej. W Polsce choroba wibracyjna została zaliczona do grupy chorób zawodowych w 1968 r. Wystąpienie pierwszych objawów choroby wibracyjnej ma miejsce na ogół po 3–4 latach pracy w środowisku wibracyjnym. Niekiedy jednak, przy dużej wrażliwości osobniczej, można się spotkać z upostaciowieniem się schorzenia już po kilku miesiącach pracy. Bez względu na to, czy wibracja oddziałuje na człowieka miejscowo czy ogólnie, schorzenie dotyczy całego ustroju.

Obraz kliniczny choroby wibracyjnej jest niezmiernie różnorodny. Stwierdzono, że częstotliwości do 35 Hz przy przewlekłym działaniu prowadzą do schorzeń układu ruchu (kości, mięśnie, stawy), narządu przedsionkowego oraz atonii naczyniowej (całkowite pozbawienie naczyń napięcia fizjologicznego), itp. Na-

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

tomiast częstotliwości powyżej 35 Hz powodują objęcie procesem chorobowym układu nerwowego z dominacją objawów naczyniowych o typie spastycznym. Zmiany zachodzące w obrębie różnych układów anatomicznych przedstawiono w tabeli 6.2.

6.3. Wpływ hałasu na organizm ludzki

6.3.1. Hałas słyszalny

Przed przystąpieniem do omawiania zjawiska hałasu i jego wpływu na organizm ludzki spróbujmy zdefiniować niektóre pojęcia i wielkości fizyczne z nim związane.

6.3.1.1. Dźwięk

Dźwiękiem nazywamy falę akustyczną rozchodzącą się w ośrodku sprężystym lub wrażenie słuchowe wywołane tą falą. Fizycznymi aspektami dźwięków są: widmo, natężenie, długość trwania dźwięku i zmiany w czasie. Ze względu na rodzaj widma dźwięki klasyfikuje się następująco:

- *ton* (*dźwięk prosty*) – drganie sinusoidalne o jednej częstotliwości;
- *wieloton harmoniczny* (*dźwięk złożony*) – drganie będące sumą drgań sinusoidalnych o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej;
- *wieloton nieharmoniczny* – drganie będące sumą nieuporządkowanych drgań;
- *szum* – dźwięk o ciągłym widmie.

Ucho ludzkie reaguje na względną zmianę poziomu dźwięku (wyrażaną na ogół w decybelach, dB). Najniższa wartość ciśnienia akustycznego (przy częstości 1000 Hz) wykrywanego przez ucho ludzkie wynosi średnio 20 μPa (próg słyszalności); 20 Pa – to próg bólu. Częstości fal dźwiękowych zawierają się w granicach 16–20 kHz. Fale sprężyste o częstościach wyższych nazywa się ultradźwiękami, a o częstościach niższych – infradźwiękami; fale o częstości 10^9 Hz i wyższej stanowią hiperdźwięki. Źródłem dźwięku są drgające ciała stałe (np. struny, membrany) oraz zawirowania powietrza.

Fizycznymi wielkościami określającymi dźwięk są: ciśnienie akustyczne, natężenie dźwięku, widmo dźwięku oraz częstość składowej podstawowej w tym

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

widmie lub częstość czystego tonu. Wielkościom tym odpowiadają cechy subiektywne: natężeniu – głośność dźwięku, częstości podstawowej – wysokość, a widmu – barwa dźwięku. Dźwięki długotrwałe dzielą się na tony (dźwięki harmoniczne, sinusoidalne, o jednej częstości) i złożone z tonów – wielotony i szumy; wśród dźwięków krótkotrwałych (impulsów) rozróżnia się stuki i trzaski. W przeciwieństwie do szumów, stuków i trzasków tony i wielotony są odczuwane jako dźwięki o określonej wysokości. Dźwięki spotykane w praktyce są zwykle przebiegami zmiennymi w czasie, złożonymi z tonów, wielotonów, szumów. Czas trwania dźwięku może wpływać na charakter odczucia dźwięku; np. długotrwałe, silne dźwięki powodują chwilowe podwyższenie progu słyszalności, a więc następne dźwięki wydają się cichsze. Każdy dźwięk złożony można rozłożyć na sumę dźwięków prostych; rozkład taki nazywa się *analizą dźwięku*. Analiza dźwięku ma wiele zastosowań praktycznych; jest wykorzystywana do badania właściwości hałasu, mowy, instrumentów muzycznych; w walce z hałasem umożliwia np. dobór odpowiednich materiałów dźwiękochłonnych. Procesem odwrotnym jest *synteza dźwięku* – sumowanie dźwięków harmonicznych o różnych częstotliwościach, amplitudach i fazach. Stosuje się ją do generowania sztucznej mowy i tworzenia muzyki.

6.3.1.2. Parametry dźwięku

Każdy pojedynczy ton charakteryzują następujące parametry:

- *natężenie* – zależy od amplitudy drgań i odpowiada za głośność;
- *częstotliwość* – odpowiada za wysokość tonu; częstotliwości słyszalne dla człowieka zawierają się między 16 a 20 000 Hz;
- *czas trwania.*

Każdy dźwięk złożony z tak opisanych tonów posiada cechę zwaną *barwą*. Jest ona charakterystyczna dla dźwięku o określonej zawartości *tonów składowych* (*alikwotów*). Podobnie jak w przypadku pojedynczego tonu, dźwięk charakteryzują:

- *wysokość* zależna od częstotliwości tonów podstawowych dźwięku;
- *natężenie* zależne od amplitud tonów składowych;
- *czas trwania.*

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

6.3.1.3. Hałas

Hałasem nazywamy wszelkie niepożądane, nieprzyjemne, dokuczliwe lub szkodliwe drgania mechaniczne ośrodka sprężystego, działające za pośrednictwem powietrza na organ słuchu i inne zmysły oraz elementy organizmu człowieka. W zależności od częstotliwości drgań wyróżnia się:

- hałas infradźwiękowy, niesłyszalny, lecz odczuwalny, o częstotliwości drgań niższej od 16 Hz;
- hałas słyszalny o częstotliwości w przedziale 16–20 000 Hz;
- hałas ultradźwiękowy, niesłyszalny, ponad 20 000 Hz.

Ze względu na naturę procesu powstawania rozróżnia się hałas wibracyjny lub turbulentny, ze względu na zmiany czasowe rozróżnia się hałas stacjonarny, niestacjonarny, impulsowy i udarowy.

Wzorcowo hałas ocenia się korzystając z tzw. *metody liczb N*. Polega ona na porównaniu widma akustycznego danego hałasu z krzywymi, w przybliżeniu opisującymi wrażliwość akustyczną ucha (głośność) wyrażoną w fonach.

W praktyce stosuje się prostsze pomiary poziomu ciśnienia akustycznego wyrażanego w dB (decybelach). Za szkodliwy uważa się hałas przekraczający 85 dB. Długotrwałe oddziaływanie hałasu o wyższym poziomie ciśnienia akustycznego prowadzi do trwałych ubytków słuchu. Oprócz hałasu szkodliwego definiuje się hałas uciążliwy, o niższym poziomie ciśnienia akustycznego.

Dopuszczalne poziomy hałasu w danych warunkach określane są przez odpowiednie normy, np. w centrum miast w dzień nie powinien on przekraczać 60 dB (w nocy 50 dB), natomiast na terenach chronionych (parkach, uzdrowiskach, itp.) odpowiednio 40 i 30 dB.

Ucho ludzkie charakteryzuje się różną wrażliwością na hałasy o różnym widmie akustyczym, podane normy dotyczą hałasu o wzorcowym widmie akustycznym.

Większość zjawisk akustycznych, które człowiek odbiera za pomocą ucha, jest przekazywana za pośrednictwem ośrodka gazowego, jakim jest powietrze. Jeśli nie rozchodzą się w nim fale akustyczne, to istnieje w tym ośrodku *ciśnienie statyczne* zwane często *ciśnieniem atmosferycznym*. Obszar przestrzeni, w którym rozchodzą się fale akustyczne nazywa się *polem akustycznym*. W każdym punkcie tego pola ciśnienie ośrodka zmienia się z czasem, oscylując wokół wartości średniej, jaką jest ciśnienie statyczne. Różnicę chwilowej wartości ciśnienia


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

spowodowanego drganiem cząstek powietrza i ciśnienia statycznego nazwano *ciśnieniem akustycznym*, którego wartość podaje się w paskalach (Pa). Dźwięki słyszalne dla człowieka odpowiadają ciśnieniu akustycznemu mieszczącemu się w przedziale od $2 \cdot 10^{-5}$ Pa do 2 Pa.

Względne ciśnienie fali akustycznej odniesione do ciśnienia odpowiadającego progowi słyszalności przy częstotliwości 1 kHz (tj. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) nosi nazwę *poziomu ciśnienia akustycznego* L_p. Poziom ciśnienia akustycznego mierzy się w decybelach i określa wzorem

$$L_p = 20 \ln \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}] , \tag{6.5}$$

gdzie p – skuteczna wartość ciśnienia akustycznego [Pa], p_0 – skuteczna wartość ciśnienia akustycznego odniesienia równa 0.00002 Pa.

6.3.1.4. Korygowany poziom ciśnienia akustycznego L_A

W celu zbliżenia wyników pomiarów do odczucia słuchowego doznawanego przez ucho ludzkie stosuje się w układzie pomiarowym filtr korekcyjny A. Pomiar jest prowadzony miernikiem poziomu dźwięku przy użyciu korektora A. Korygowany poziom ciśnienia akustycznego L_A mierzymy w dB(A).

6.3.1.5. Moc akustyczna

Mocą akustyczną nazwano ilość energii wysyłanej przez źródło dźwięku w jednostce czasu. Moc tę określa się w watach [W]. Wartości mocy akustycznej spotykanych zazwyczaj źródeł dźwięku bardzo różnią się między sobą. Na przykład cichy szept odpowiada mocy akustycznej 10^{-9} W, głos w czasie normalnej rozmowy – 10^{-3} W, natomiast startujący samolot odrzutowy emituje hałas o mocy równej 10^7 W. Posługiwanie się tak znacznie różniącymi się wartościami wyrażonymi w skali liniowej byłoby w praktyce bardzo niewygodne. Z tych względów w akustyce wprowadzono bezwymiarową skalę logarytmiczną określoną wzorem

$$L_N = 10 \log \frac{N}{N_0} = L_p + 10 \log S , \tag{6.6}$$

gdzie: L_N – *poziom mocy akustycznej* [dB], N – moc akustyczna źródła dźwięku [W], $N_0 = 10^{-12}$ W – moc odniesienia, L_p – poziom ciśnienia akustycznego, S – pole powierzchni, przez którą przechodzi fala akustyczna.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Wartość mocy akustycznej fali przechodzącej przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku rozchodzenia się fali nazywa się *natężeniem dźwięku* I. Oblicza się je za pomocą zależności

$$I = \frac{N}{S}, \tag{6.7}$$

gdzie N oznacza moc akustyczną fali przechodzącej przez powierzchnię o polu S [m^2].

Jednostką natężenia dźwięku w układzie SI jest 1 W/m^2 [1 Pa]. Podobnie jak dla mocy akustycznej również dla natężenia dźwięku wprowadzono bezwymiarową skalę logarytmiczną określoną wzorem

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}, \tag{6.8}$$

gdzie: L – *poziom natężenia dźwięku* [dB], $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 – natężenie odniesienia, $S_0 = 1$ m^2 – powierzchnia odniesienia.

Między natężeniem dźwięku I a ciśnieniem akustycznym p istnieje związek określony zależnością

$$I = \frac{p^2}{Z}, \tag{6.9}$$

gdzie: Z – impedancja akustyczna właściwa ośrodka [Ns/m^3].
(Dla fali sinusoidalnej natężenie dźwięku *I* wyraża się wzorem

$$I = \frac{p^2}{2\rho u}, \tag{6.10}$$

gdzie: p – amplituda ciśnienia akustycznego, ρ – gęstość ośrodka, u – prędkość rozchodzenia się fali akustycznej.)

Po wykorzystaniu ostatniego związku wzór określający poziom natężenia dźwięku przyjmuje postać

$$L = 10 \log \left(\frac{p}{p_0}\right)^2, \tag{6.11}$$

gdzie $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2 – ciśnienie odniesienia występujące przy natężeniu odniesienia I_0.

Stąd otrzymujemy

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}. \tag{6.12}$$

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Oznacza to, że poziom natężenia dźwięku można wyznaczyć za pomocą pomiaru ciśnienia akustycznego (jak widać poziom ciśnienia akustycznego L_p i poziom natężenia dźwięku L można wyrazić tym samym wzorem, stąd wielkości tych używa się często zamiennie). Pomiar taki wykonuje się przeważnie za pomocą specjalnych mikrofonów spełniających rolę czujników ciśnienia.

Poziom natężenia dźwięku podany w dB wyraża stosunek aktualnego natężenia do przyjętego natężenia odniesienia, a więc jest wielkością bezwymiarową. Przyjęta wartość odniesienia $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 odpowiada progowi słyszalności ucha ludzkiego dla dźwięku o częstotliwości 1000 Hz (0 dB). Oznacza to, że poziom natężenia dźwięku podany w decybelach może być uważany ze względów fizjologicznych za bezpośrednią miarę natężenia. Należy przy tym zdawać sobie sprawę z faktu, że dwukrotne zwiększenie natężenia I nie podwaja wartości poziomu natężenia L, lecz tylko zwiększa tę wartość o 3 dB. Zależności te ilustruje tabela 6.3.

Tab. 6.3. Stosunki natężeń dźwięku I/I_0 oraz odpowiadające im poziomy natężenia dźwięku L w dB

Stosunek natężeń dźwięku I/I_0	Poziom natężenia dźwięku L [dB]	Stosunek natężeń dźwięku I/I_0	Poziom natężenia dźwięku L [dB]
0,00001	–50	100 000,0	50
0,0001	–40	10 000,0	40
0,001	–30	1 000,0	30
0,10	–20	100,0	20
0,032	–15	31,6	15
0,10	–10	10,0	10
0,13	–9	7,9	9
0,16	–8	6,3	8
0,20	–7	5,0	7
0,25	–6	4,0	6
0,32	–5	3,2	5
0,40	–4	2,5	4
0,50	–3	2,0	3
0,63	–2	1,6	2
0,79	–1	1,3	1
1,00	0	1,0	0

6.3.1.6. Głośność

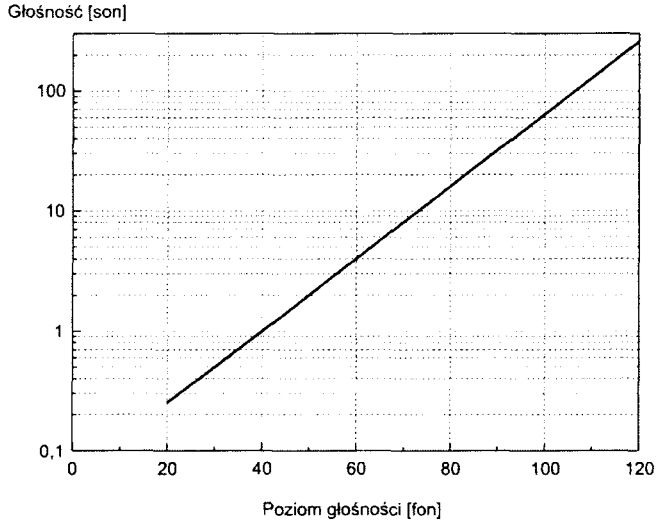
Głośność jest to wielkość charakteryzująca subiektywne odczuwanie natężenia dźwięku przez człowieka (stanowi podstawę dla zróżnicowań dynamiki, czyli

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

siły brzmienia w utworze muzycznym). Głośność zależy od natężenia i częstotliwości dźwięku. Przy stałym natężeniu jako najgłośniejsze odbierane są dźwięki o częstotliwości 3–4 kHz, zaś jako najmniej głośne dźwięki o częstotliwości poniżej 100 Hz oraz powyżej 10 000 Hz. Jednostką głośności jest *son*. 1 son jest to głośność tonu o częstotliwości 1000 Hz i poziomie głośności 40 fonów.

6.3.1.7. Poziom głośności

Poziom głośności jest to głośność względna, miara fizjologicznego odczuwania dźwięku. Dla dźwięku prostego o częstotliwości 1000 Hz poziom głośności jest liczbowo równy poziomowi ciśnienia akustycznego mierzonego w dB. Dla innych częstotliwości zależność tę przedstawia się w postaci krzywych równej głośności (izofonów). Jednostką poziomu głośności jest *fon*. 1 fon odpowiada poziomowi głośności dźwięku o częstotliwości równej 1 kHz i o poziomie ciśnienia akustycznego 1 dB.



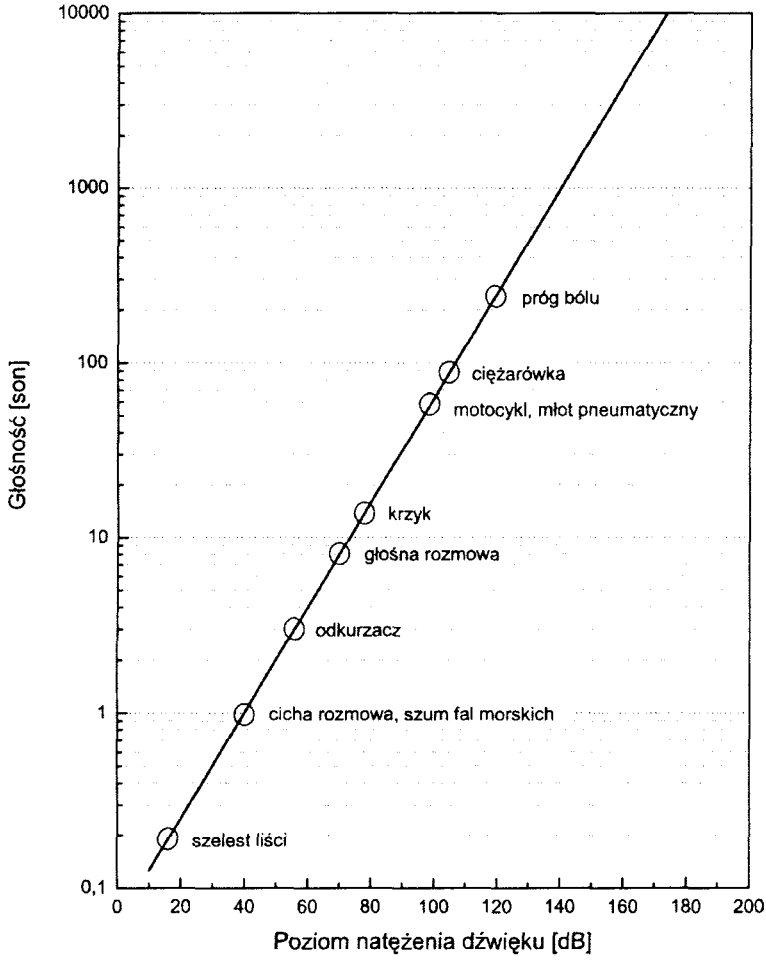
Rys. 6.3. Zależność między głośnością a poziomem głośności

Zależność między głośnością w sonach a poziomem głośności w fonach, zgodnie z międzynarodową normą ISO-R-131-1959, wyraża wzór

$$S = 2^{0.1(P-40)}, \tag{6.13}$$

gdzie: S – głośność w sonach, P – poziom głośności w fonach.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 6.4. Zależność głośności od poziomu natężenia dźwięku

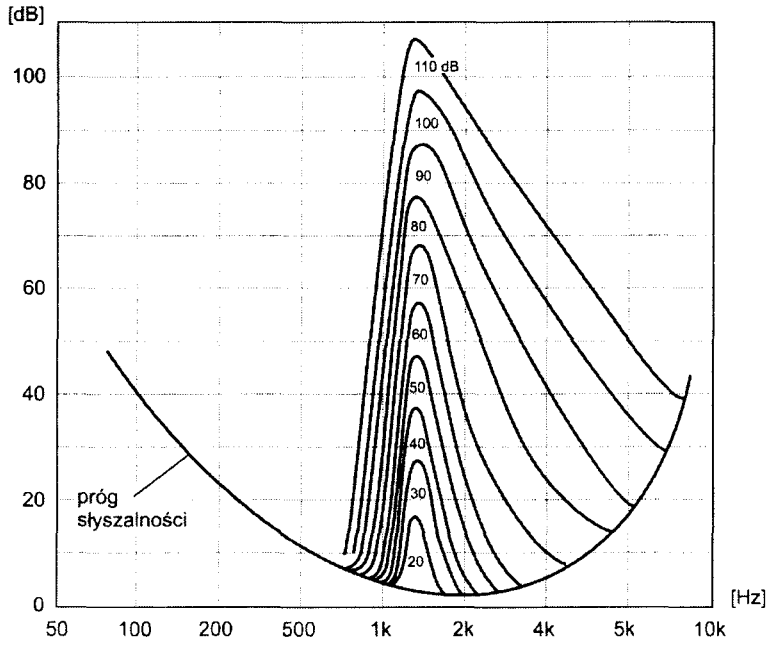
Zależność (6.13) jest słuszna dla zakresu poziomu głośności od 20 do 120 fonów. Jej reprezentację graficzną przedstawia rys. 6.3.

Analogiczny wykres przedstawiający głośność w funkcji poziomu natężenia dźwięku zawiera rys. 6.4. Zaznaczono na nim pewne obszary odpowiadające spotykanym w życiu codziennym zjawiskom dźwiękowym.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

6.3.1.8. Maskowanie

Głośność dźwięku zależy nie tylko od jego intensywności, ale również od innych towarzyszących mu dźwięków. Istotną rolę odgrywa tu zjawisko tzw. *maskowania*, zwane inaczej *zagłuszaniem*, które polega na tym, że z dwóch tonów o różnych częstotliwościach słyszymy tylko ten silniejszy, gdyż słabszy ton jest zagłuszany. Przy jednakowym natężeniu tony niskie mają większy wpływ maskujący niż tony wysokie. Zagłuszanie jest szczególnie duże, gdy oba tony mają zbliżoną częstotliwość.



Rys. 6.5. Podwyższenie dolnej granicy słyszalności na skutek zjawiska maskowania

W celu określenia efektu maskowania należy zmierzyć, o ile wyższą częstotliwość musi mieć testowany dźwięk, aby był słyszalny mimo występowania dźwięku maskującego. Pomiaru dokonuje się przedstawiając osobie badanej dwa tony: *testowy* i *maskujący*. Ton maskujący ma pewną stałą częstotliwość i natężenie, ton testowy ma stałą tylko częstotliwość, natomiast jego natężenie jest zmieniana tak długo, aż ton stanie się ledwie słyszalny. Procedurę tę powtarza się dla tonów testowych o różnej częstotliwości, w efekcie czego otrzymuje się tzw. *krzywą maskowania*. Krzywa ta mówi nam, jakie natężenie powinien mieć

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

ton testowy przy różnych częstotliwościach, aby można go było usłyszeć mimo występowania dźwięku maskującego.

Wynik opisanego wyżej badania przeprowadzonego dla tonu maskującego o częstotliwości 1200 Hz przedstawia rys. 6.5. Natężenie tonu maskującego zmieniało się od 20 do 110 dB, co 10 dB. W efekcie otrzymano 10 różnych krzywych maskowania.

Analizując otrzymane wykresy należy zwrócić uwagę na ich asymetrię. Dźwięk maskujący wywiera względnie słaby wpływ na tony o częstotliwości niższej od jego własnej (1200 Hz), natomiast znacznie utrudnia słyszenie tonów o wyższej częstotliwości.

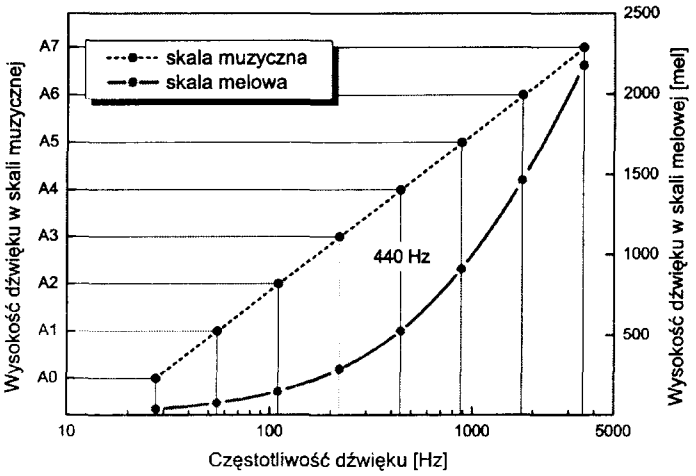
6.3.1.9. Wysokość dźwięku

Wysokość dźwięku wyraża subiektywną ocenę częstotliwości dźwięku. Określoną wysokość dźwięku można przypisać tonowi (lub dźwiękom zbliżonym do tonu).

Skala muzyczna wysokości dźwięku jest związana logarytmicznie z częstotliwością dźwięku. Każda następna oktawa standardowej skali muzycznej ma dokładnie dwukrotnie wyższą częstotliwość od poprzedniej. Nuta *A4* (*A* powyżej środkowego *C*), jaką przyjmuje orkiestra w celu nastrojenia swoich instrumentów muzycznych, ma częstotliwość 440 Hz. *A* wyższe o jedną i o dwie oktawy (*A5* i *A6*) mają częstotliwości odpowiednio 880 Hz i 1760 Hz. Podobnie *A* niższe o jedną oraz o dwie oktawy (*A3* i *A2*) charakteryzują się częstotliwościami równymi odpowiednio 220 Hz i 110 Hz. A zatem na równomiernie stonowanej skali muzycznej podwyższenie nuty o jedną oktawę powoduje podwojenie jej częstotliwości. Oprócz tego oktawa składa się z 12 dźwięków (licząc wszystkie tony i półtony). Aby dokonać podziału skali częstotliwości objętej oktawą na 12 równych interwałów, częstotliwość każdej kolejnej nuty powinna być $2^{1/12}$ razy wyższa od częstotliwości nuty, która ją poprzedza.

Do ok. 500 Hz wysokość odbieranych przez ucho dźwięków odpowiada skali muzycznej – jest ściśle proporcjonalna do logarytmu częstości tonu. Tony o jednakowym stosunku częstotliwości odbierane są jako mające takie same interwały muzyczne, stosunek częstotliwości dwóch sąsiednich tonów dwunastostopniowej skali muzycznej równy jest pierwiastkowi 12. stopnia z 2. Przy wyższych częstotliwościach pojawia się tendencja do zaniżania oceny wysokości dźwięku, podobnie jako niższe odbierane są dźwięki bardzo głośne. Aby zlikwidować tę niezgodność wprowadzono tzw. *skalę melową*. Skala melowa została dobrana eksperymentalnie. Częstotliwości 1000 Hz (przy poziomie natężenia dźwięku

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 6.6. Wysokości tonów o określonych częstotliwościach w skalach muzycznej i melowej

Tab. 6.4. Częstotliwości drgań akustycznych odpowiadające wybranym dźwiękom

Dźwięk	Częstotliwość [Hz]
Najniższa nuta na fortepianie (A_0)	27,5
Najniższa nuta śpiewaka (bas)	100
Najniższa nuta na klarnecie	104,8
Środkowe C na fortepianie (C_4)	261,6
Standardowa wysokość strojenia (A_4 powyżej środkowego C)	440
Najwyższa nuta śpiewaczki (sopran)	1000
Najwyższa nuta na fortepianie	4180
Tony harmoniczne instrumentów muzycznych	10 000
Granica słyszalności ludzi starszych	12 000
Granica słyszalności	16 000 – 20 000

60 dB) przyporządkowano 1000 jednostek zwanych *melami*. Charakterystyka poniżej tej częstotliwości jest w przybliżeniu liniowa, natomiast powyżej jest logarytmiczna. Zależność pomiędzy skalą w Hz a skalą w melach opisuje wzór

$$f_{mel} = 1000 \cdot \log_2\left(1 + \frac{f_{Hz}}{1000}\right) . \qquad (6.14)$$

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

6.3.1.10. Hałaśliwość

Hałaśliwość określa dokuczliwość hałasu i wyraża się w *noysach*, przy czym 1 noys jest to hałaśliwość wstęgi hałasu o częstotliwości w granicach 910–1090 Hz i poziomie ciśnienia akustycznego 40 dB.

Tab. 6.5. Zależność między zmiennymi psychologicznymi a zmiennymi fizycznymi w odniesieniu do dźwięków

Zmienne psychologiczne	Zmienne fizyczne	
	Pierwszego rzędu	Drugiego rzędu
Głośność	Natężenie dźwięku	Częstotliwość fal dźwiękowych
Wysokość	Częstotliwość fal dźwiękowych	Natężenie dźwięku
Barwa	Skład złożonej fali dźwiękowej	—
Donośność	Częstotliwość i natężenie	—
Konsonans (zgodność)	Struktura harmoniczna	Muzyczne współbrzmienie
Dysonans (szorstkość)	Struktura harmoniczna	Muzyczne współbrzmienie
Hałaśliwość	Natężenie dźwięku	Układ częstotliwości, parametry czasowe

Analizując zjawiska dźwiękowe należy pamiętać o rozróżnieniu między obiektywnymi wielkościami występującymi w środowisku fizycznym a powodowanymi przez nie subiektywnymi doznaniami psychicznymi występującymi w umyśle. Fizyczne aspekty dźwięku są stosunkowo łatwe do badania, określenia i mierzenia. Możemy dokładnie ustalić częstotliwość bądź natężenie dźwięku. Aspekty psychiczne nie dają się już tak łatwo określić. Dla dźwięku najbardziej oczywistymi wymiarami psychologicznymi są głośność i wysokość, ale występują tu również inne doznania związane z jakością dźwięku, jak jego barwa, dysonans, konsonans, harmoniczność. Połączenie aspektów fizycznych i psychicznych związanych z dźwiękiem i słyszeniem nie jest, jak by się mogło na pozór wydawać, rzeczą prostą i napotyka na pewne trudności. Po pierwsze, relacje między dającymi się obiektywnie mierzyć wielkościami fizycznymi a odpowiadającymi im subiektywnymi odczuciami psychicznymi nie są na ogół liniowe. Na przykład podwojenie natężenia dźwięku nie prowadzi do podwojenia wrażenia głośności. Po drugie, nie są to zależności proste, będące funkcją jednej tylko zmiennej. Zmiana częstotliwości wpływa jednocześnie na odbiór zarówno wysokości, jak i głośności. Po trzecie wreszcie, zależności między obiektywnymi aspektami fizycznymi a subiektywnymi aspektami psychicznymi nie są stałe – zależą od kontekstu. Na postrzeganie wysokości dźwięku mają wpływ nie tylko jego częstotliwość i natężenie, ale również właściwości innych dźwięków, które mogą występować w tym samym czasie.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Zależności między zmiennymi psychologicznymi a zmiennymi fizycznymi w odniesieniu do dźwięków przedstawia tabela 6.5.

6.3.1.11. Kryteria oceny hałasu słyszalnego

Wg krajowych i międzynarodowych standardów, hałas jest oceniany według następujących kryteriów:

- dokuczliwości;
- uciążliwości;
- rozumienia mowy;
- ochrony słuchu;
- szkodliwości.

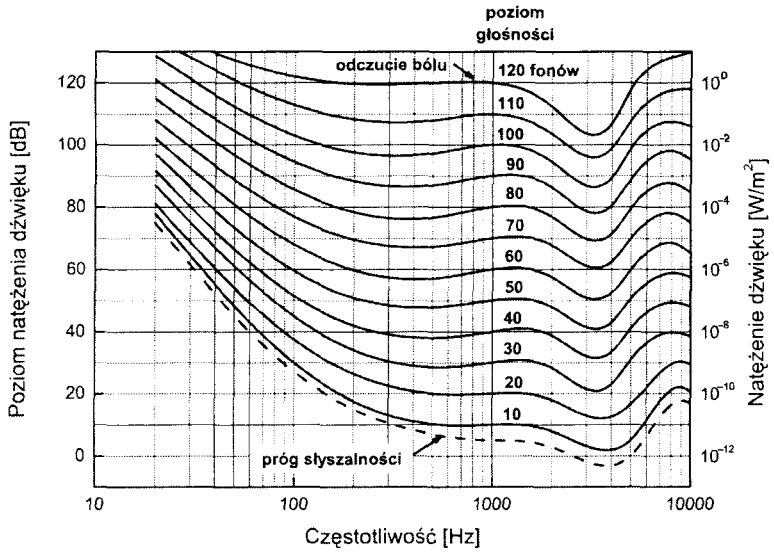
Z uwagi na to, że powyższe kryteria odwołują się do subiektywnych odczuć psychicznych, oparty na nich podział hałasu odnosi się do subiektywnego parametru, jakim jest poziom głośności wyrażany w fonach. Wyróżnia się następujące przedziały:

- do 50 fonów – dźwięki nieszkodliwe;
- 50–65 fonów – dźwięki denerwujące (towarzyszą im reakcje psychiczne);
- 65–80 fonów – dźwięki uciążliwe (zwłaszcza narażony jest układ wegetatywny);
- 80–100 fonów – dźwięki szkodliwe (oddziałują na narząd słuchu);
- 100–120 fonów – dźwięki bezwarunkowo szkodliwe;
- powyżej 120 fonów może nastąpić trwałe (mechaniczne) uszkodzenie narządu słuchu.

Przedstawione wyżej zakresy można łatwo umiejscowić na rys. 6.7 przedstawiającym krzywe równej głośności (izofony).

Obszar słyszalności ograniczony jest przez dwie krzywe izofoniczne: *próg słyszalności* i *próg bólu*.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 6.7. Warstwice równej głośności (izofony)

Próg słyszalności – jest to najmniejsza wartość ciśnienia akustycznego (natężenia dźwięku) tonu o określonej częstotliwości, wywołująca u danego człowieka wrażenie słuchowe. Wartość progu słyszalności wyraża się w decybelach (dB), przyjmując za wartość progową krzywą izofoniczną dla poziomu głośności 0 fonów, co odpowiada poziomowi ciśnienia akustycznego 0 dB określonego dla tonu o częstotliwości 1000 Hz względem ciśnienia akustycznego $2 \cdot 10^{-12}$ W/m^2. Próg słyszalności u różnych osób jest różny, a u tej samej osoby zależy od jej stanu fizycznego, psychicznego, pory dnia i innych czynników.

Próg bólu – jest to fizjologiczna wartość ciśnienia akustycznego, przy której ucho odczuwa wrażenie bólu. Wartość ta jest prawie niezależna od częstotliwości. Wyznacza ją górna krzywa izofoniczna na poziomie 130 dB dla dźwięków sinusoidalnych i 120 dB dla szumów. Reakcja bólu ucha na silne bodźce ciśnienia akustycznego jest wywołana jego działaniem na mięśnie bębenka i kosteczki ucha środkowego. Jest obroną organizmu przed ewentualnym uszkodzeniem struktur aparatu słuchowego.

Ogólnie działanie hałasu można rozpatrywać w aspekcie słuchowym i pozasłuchowym.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Jego działanie na narząd słuchu zależy od następujących czynników:

- parametrów fizycznych opisujących warunki akustyczne w jakich przebywa człowiek, tzn. poziomu ciśnienia akustycznego L, jego przebiegu czasowego, kierunkowości źródła G, częstotliwości f;
  - bodźce o poziomie L < 75-80 dB nie mają negatywnego wpływu na ten narząd nawet po długim okresie działania;
  - w miarę wzrostu poziomu emitowanego dźwięku wzrasta jego negatywne oddziaływanie: najpierw w postaci czasowego podwyższenia progu słyszenia (TTS), które później przeradza się w stałe podwyższenie tego progu (PTS);
  - dla wysokich poziomów natężenia dźwięku lub nagłych zmian może nastąpić uszkodzenie struktur anatomicznych ucha (perforacja błony);
  - najbardziej niebezpieczne są dźwięki o średniej i wysokiej częstotliwości, gdyż dla nich czułość ucha jest największa;
  - hałas impulsowy jest szczególnie szkodliwy, ze względu na dużą bezwładność mechanizmów ochronnych narządu, które w tak krótkim czasie nie mogą być uruchomione;
- czasu narażenia na hałas t_n;
  - ekspozycja ciągła na hałas jest bardziej szkodliwa niż przerywana, która umożliwia regenerację słuchu;
- czasu przerw t_p;
  - największa regeneracja słuchu występuje w pierwszych minutach przerwy, gdyż taka jest dynamika poprawy;
- wieku i płci narażonego;
  - wraz z upływem lat życia występuje tzw. fizjologiczny ubytek słuchu na skutek sztywnienia błon i połączeń kostnych;
  - wraz z upływem lat życia zmniejsza się górny zakres częstotliwości słyszalnych;
  - kobiety gorzej reagują na dźwięki niskie, a mężczyźni – na wysokie, jest to uwarunkowane fizjologicznie;


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- psychofizycznych odporności i wrażliwości człowieka;
- uwarunkowań genetycznych i stanu zdrowotnego.

Pozasłuchowe skutki działania hałasu obejmują:

- zaburzenia układu nerwowego;
- wpływ na układ krwionośny: zwężenie naczyń krwionośnych, zaburzenia pracy serca, wzrost ciśnienia tętniczego krwi, choroba wieńcowa;
- zaburzenia czynności wydzielniczych gruczołów: zaburzenia poziomu cukru, przyspieszenie przemiany materii;
- zaburzenia narządu równowagi;
- wpływ na układ trawienny (choroby wrzodowe);
- zmniejszenie i spowolnienie ruchu narządów zbudowanych z mięśni gładkich;
- spadek sprawności pamięci, spostrzegania, koncentracji uwagi, zdolności orientacji w przestrzeni oraz wzrost czasu reakcji;
- wystąpienie reakcji alarmowych takich jak: marszczenie, mrużenie powiek, drgania ciała, spadek ostrości wzroku;
- utrudnienie w porozumiewaniu się;
- zakłócenia w odbiorze informacji, które mogą być przyczyną błędów i stwarzać niebezpieczeństwo lub prowadzić do wypadków;
- wzrost podatności na zachorowania.

6.3.2. Infradźwięki

Infradźwięki są to fale akustyczne o częstotliwości mniejszej od 16 Hz, czyli niższej od dolnego progu słyszalności. Chociaż infradźwięki nie są słyszane przez człowieka, to przy odpowiednim poziomie ciśnienia akustycznego mogą oddziaływać na jego organizm powodując zaniepokojenie, nudności itp. Obecność infradźwięków w niektórych sytuacjach ma też wpływ na odtwarzanie sygnałów w

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

paśmie akustycznym. W szczególności dotyczy to mechanicznych systemów odtwarzania dźwięku, jak gramofony. Powstające w systemach infradźwięki mogą mieć wpływ na powstanie zniekształceń w paśmie słyszalnym.

W naturze towarzyszą eksplozjom, trzęsieniom ziemi, wyładowaniom atmosferycznym itp. Infradźwięki są słabo tłumione w skorupie ziemskiej i w wodzie, mogą się rozchodzić na znaczne odległości.

Przy okazji warto wspomnieć, iż określenie infradźwiękowy (ang. *infrasonic*) oraz poddźwiękowy (ang. *subsonic*) oznaczają co innego. Przymiotnik poddźwiękowy odnosi się do prędkości mniejszych od prędkości dźwięku.

Cechy infradźwięków:

- bardzo małe pochłanianie w ośrodku (o kilka rzędów wielkości mniejsze niż fal akustycznych);
- rozprzestrzenianie się na duże odległości (są to fale długie, np. fala o częstotliwości $f = 16$ Hz ma długość $l = 22$ m);
- klasyczne pochłanianie proporcjonalne do kwadratu częstotliwości;
- nieskuteczność przegród;
- wzmacnianie fal na skutek rezonansu pomieszczeń, elementów konstrukcyjnych lub całych obiektów;
- wzrost oddziaływania w oddalonych pomieszczeniach.

Źródła hałasu infradźwiękowego stanowią w przemyśle maszyny i urządzenia przepływowe, sprężarki, silniki wysokoprężne, młoty, wentylatory, dmuchawy wielkopiecowe, zrzuty mediów energetycznych, oscylujące masy wody w zaporach i kanałach doprowadzających, transport wodny, lądowy i powietrzny.

Ocenę hałasu infradźwiękowego przeprowadza się według obowiązującej normy. W chwili obecnej jest nią *Polska Norma PN-86/N-01338. Hałas infradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dotyczące wykonywania pomiarów*. Wg niej, dla drgań w zakresie 2–20 Hz wartości dopuszczalne poziomu ciśnienia akustycznego w zależności od pomieszczenia przedstawiają się następująco:

- hala fabryczna 110 dB;
- kabiny obsługi 90 dB;

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- pomieszczenia administracyjne 90 dB.

Określono w niej także kryteria higieniczne dla hałasu infradźwiękowego:

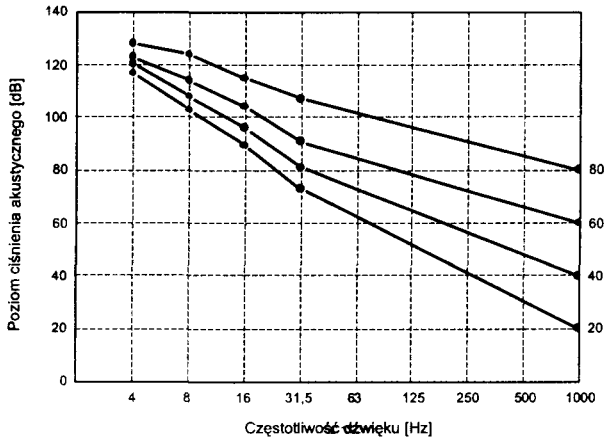
- maksymalny dopuszczalny poziom p $\leqslant$ wartości ustalonych dla t = 1 min;
- na wszystkich stanowiskach pracy dla $f_{śr}$ = 4 i 8 Hz p $\leqslant$ 110 dB, a dla f = 31,5 Hz p $\leqslant$ 105 dB przy 8 godz. ekspozycji;
- czas rejestracji poziomów ciśnienia nie powinien być krótszy niż 60 s;
- czas uśredniania sygnału w mierniku nie powinien być krótszy niż 10 s;
- czas rejestracji powinien uwzględniać zmiany poziomu ciśnienia.

W praktyce poziomy wartości dopuszczalnych są przekraczane:

- raczej rzadko przy maszynach;
- prawie zawsze w kabinach dźwiękoizolacyjnych (zwłaszcza dla f = 8 i 16 Hz).

Działanie infradźwięków na człowieka może być wielokierunkowe. Są one odbierane przez receptory czucia, przy czym progi percepcji tych drgań znajdują się o 20–30 dB niżej niż dla progu powietrznego. Odbierane są również przez narząd słuchu, zwłaszcza przez część przedsionkową ucha. Wartość progu słyszenia zależna jest od częstotliwości: dla f = 6–8 Hz wynosi 100 dB, dla f = 12–16 Hz – 90 dB. Podobnie wraz z częstotliwością zmienia się i próg bólu: dla f = 2 Hz wynosi 162 dB, a dla f = 20 Hz – 140 dB. Przy niewielkich przekroczeniach wartości progowych działanie staje się już uciążliwe. Poziomem krytycznym jest wartość 75 dB. Powyżej niej, względnie małe zmiany poziomu ciśnienia wywołują duże zmiany w odczuciu stopnia dokuczliwości. Pod wpływem infradźwięków może dojść do zmian w ośrodkowym układzie nerwowym: spadku stanu czuwania, senności, zakłóceń snu i odpoczynku, dyskomfortu, nadmiernego zmęczenia, zaburzeń równowagi, zaburzeń fizjologicznych i sprawności psychomotorycznej, stanów lękowych i wrażenia opresji. Daje się też zauważyć silne działanie na struktury i funkcje narządów wewnętrznych organizmu ze względu na występujące zjawiska rezonansowe. Istotną rolę odgrywa też poziom drgań, np. przy 100 dB występuje nieprzyjemne wibrowanie wnętrza ciała, zwłaszcza w okolicy klatki piersiowej i jamy brzusznej oraz „głuchy" ucisk w uszach. Wg Möllera, dokuczliwość hałasu infradźwiękowego w ocenie subiektywnej przebiega zgodnie z tzw. krzywymi jednakowej dokuczliwości (rys. 6.8).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej



Rys. 6.8. Krzywe jednakowej dokuczliwości hałasu infradźwiękowego

Krzywe te pozwalają porównać uciążliwość tonów infradźwiękowych z tonem o częstotliwości 1000 Hz...

Jak widać krzywe te w obszarze infradźwięków i niskich częstotliwości akustycznych leżą blisko siebie co oznacza, że względnie małe zmiany w poziomie ciśnienia akustycznego wywołują duże zmiany w odczuwaniu stopnia dokuczliwości. Z punktu widzenia ochrony człowieka jest to ważne, ponieważ niewielkie zmniejszenie poziomu ciśnienia akustycznego może być w niektórych przypadkach wystarczające do zmniejszenia dokuczliwości hałasu infradźwiękowego.

Sposoby ograniczenia zagrożeń spowodowanych hałasem infradźwiękowym:

- ściany zaporowe z piasku;
- aktywne pochłanianie hałasu infradźwiękowego;
- kompensacja dźwięku;
- stosowanie zasady superpozycji.

6.3.3. Ultradźwięki

Ultradźwięki są to fale akustyczne o częstotliwości wyższej niż 20 kHz (tj. przekraczającej górny próg słyszalności dla człowieka). W naturze ultradźwięki emitowane są przez niektóre ssaki (m.in. nietoperze i delfiny) i wykorzystywane przez nie do echolokacji.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Analogiczne zastosowanie znajdują ultradźwięki w technice. Ponadto, ze względu na silną zależność właściwości rozchodzenia się ultradźwięków w danym ośrodku od jego budowy, służą one do badania struktury różnych ciał, m.in. organizmów żywych (tzw. ultrasonografia). Zogniskowanych wiązek ultradźwięków używa się do odrywania ciał stałych z bardziej elastycznego podłoża (usuwanie kamienia nazębnego, rozbijanie kamieni nerkowych, oczyszczanie powierzchni metali przed lutowaniem itd.).

Energia drgań ultradźwięków może być też wykorzystana do rozpylania aerozoli i emulsji, a nawet do spawania.

Ultradźwięki dzieli się na:

- niskoczęstotliwościowe, które zawarte są w przedziale 16–100 kHz;
- wysokoczęstotliwościowe, 100–1010 kHz;
- hiperdźwięki, powyżej 1010 kHz.

Ultradźwięki można wytwarzać przemysłowo następującymi metodami:

- mechanicznymi (do 200 kHz);
- magnetycznymi, opartymi na zjawisku magnetostrykcji (zmiana kształtu i rozmiaru ferromagnetyka pod wpływem magnesowania);
- elektrycznymi, opartymi zwłaszcza na zjawisku elektostrykcji (do 1000 kHz, co odpowiada długości fali $\lambda = 1$ m).

W środowisku naturalnym nie występują ultradźwięki szkodliwe dla organizmu. Zresztą zasięg działania tych fal jest nieduży, ze względu na ich wysoką częstotliwość (małą długość fal). Ich cechy charakterystyczne to:

- podlegania prawom odbicia takim, jakie obowiązują w optyce;
- możliwość tworzenia wiązek ultradźwiękowych;
- rozchodzenie się po liniach prostych;
- minimalne ugięcia.

Ponadto są one pochłaniane przez powietrze. Tłumienie to wynosi ~ 4 dB/m. Dla 500 kHz wzrasta już do 40 dB/m. Za górną granicę kontrolowanego zakresu częstotliwości przyjmuje się 100 kHz. Powyżej niej rozpatrywanie zagrożeń jest nieuzasadnione, gdyż ich szkodliwe działanie występuje jedynie w pobliżu

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

samych źródeł. Za dolną granicę przyjmuje się 10 lub 20 kHz. Granicę bezpiecznej pracy określono na podstawie badań eksperymentalnych. Dopuszczalne wartości poziomu hałasu ultradźwiękowego, w zależności od jego częstotliwości, w odniesieniu do 8 godzinnej ekspozycji, podano w tabeli 6.6. Dla omawianego czynnika ma zastosowanie prawo dozowania, wg którego wielkość dawki jest proporcjonalna do czasu ekspozycji. Aktualne normy (PN-86/N-01321. *Hałas ultradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomu ciśnienia na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dot. pomiarów.*) określają również dawkę, która niezależnie od czasu, w żadnej sytuacji nie powinna być przekraczana. Jest nią wartość 130 dB. Stopień szkodliwości hałasu ultradźwiękowego zależy od:

- wielkości dawki i jej zakresu częstotliwości;
- czasu ekspozycji;
- rodzaju tkanki i wielkości powierzchni ciała.

Tab. 6.6. Dopuszczalne i maksymalne wartości poziomu hałasu ultradźwiękowego w zależności od częstotliwości w odniesieniu do 8 godz. ekspozycji wg PN-86/N-032

f [kHz]	10	12,5	16	20	25	31,5; 40; 50; 630; 80; 100
Poziom A L [dB]	80	80	80	90	105	110
Poziom max L [dB]	100	100	100	110	125	130

Działanie ultradźwięków na człowieka może mieć charakter ogólny i miejscowy. Drgania do ciała człowieka wnikają drogą kontaktową. Najsilniej działają na tkanki miękkie, takie jak: mózg, gruczoły wydzielania wewnętrznego, gałkę oczną oraz na układ kostny płodu. Ich działanie może mieć następujący charakter:

- mechaniczny, który polega na wytwarzaniu miejscowych rozrzedzeń i zagęszczeń generujących przemienne siły ściskające i rozciągające, powodujące zmiany w strukturze białka (rozrywanie i rozszczepianie);
- cieplny, który polega na zamianie energii drgań na energię cieplną, pochłanianą przez organizm;
- chemiczny, zwłaszcza dla $f > 100$ kHz, przy czym dla dawki od 1.5–3 W/cm^2 następuje wymieszanie protoplazmy i zmiana przepuszczalności błon komórkowych, natomiast powyżej 3 W/cm^2 mają miejsce zmiany morfologiczne (rozpad czerwonych ciałek krwi).

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Inny podział skutków oddziaływania ultradźwięków na człowieka obejmuje działanie na:

- *narząd słuchu*, zwłaszcza na narząd przedsionkowy w uchu wewnętrznym, w wyniku czego pojawiają się: bóle i zawroty głowy, zaburzenia równowagi, nudności, senność i nadmierne zmęczenie; mogą też pojawiać się ubytki słuchu dla częstotliwości subharmonicznych składowej podstawowej ultradźwięków;
- *całą powierzchnię ciała*, powodujące:
  - zaburzenia w pracy układu krwionośnego: pogorszenie ukrwienia serca i tkanek obwodowych, spadek ciśnienia tętniczego krwi, nadbarwliwość krwi, wyraźne zwolnienie akcji serca, nagłe blednięcie lub zaczerwienienie skóry szyi i twarzy;
  - zaburzenia układu nerwowego: wzmożona pobudliwość, rozdrażnienie, zmienność nastrojów, dysfunkcja gruczołów dokrewnych (zwłaszcza tarczycy i płciowych);
  - zaburzenia procesów metabolicznych i termoregulacyjnych (ocieplenie skóry);
  - zjawiska dodatkowe (jak np. niszczenie komórek).

Sposoby ograniczenia negatywnego wpływu hałasu ultradźwiękowego są następujące:

- organizacyjne, a w tym:
  - zmniejszenie czasu trwania procesu ultradźwiękowego;
  - zmniejszenie czasu przebywania przy źródle;
  - grupowanie urządzeń w celu zmniejszenia zasięgu pola;
  - wprowadzenie oznakowania zagrożonej przestrzeni;
  - praca brygadowa;
  - wprowadzenie przerw i pomieszczeń do odpoczynku;
- na drodze propagacji, a w tym:
  - wprowadzenie dużej liczby przegród (wielowarstwowość),
  - zapewnienie jak największej szczelności obudów;

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

- zastosowanie środków ochrony osobistej: wielowarstwowa odzież ochronna, hełmy, przyłbice na całą twarz ze szkła lub pleksiglasu;
- opieka i kontrola lekarska.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

Bibliografia

[1] Awrejcewicz, J., *Drgania deterministyczne układów dyskretnych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.

[2] Awrejcewicz, J., Krysko, W.A., *Drgania układów ciągłych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.

[3] Będziński, R., *Biomechanika inżynierska. Zagadnienia wybrane*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.

[4] Bledsoe, B. E., Martini, R., *Anatomy and Physiology for Emergency Care*, Prentice Hall, 2002.

[5] Bochenek, A., Reicher, M., *Anatomia człowieka.* Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa, 1990.

[6] Calais-Germain, B., Anderson, S., *Anatomy of movement*, Eastland Press, Seattle, 1993.

[7] Cempel, Cz., *Wibroakustyka stosowana*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1989.

[8] de Bernabé Ortega, E. G., *Atlas anatomii*, Wiedza i Życie, Warszawa, 1991.

[9] Engel, Z., *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993.

[10] Evans, F. G., *Mechanical Properties of Bone*, Springfield, 1973.

[11] Fix, J. D., *Neuroanatomia*, Urban & Partner, Wrocław, 2003.

[12] Fox, E. L., Bowers, R., and Foss, M., *The Physiological Basis for Exercice and Sport*, Brown and Benchmark 1993.

[13] Frankel, V. H., Nordin, M., *Basic Biomechanics of the Skeletal System*, Lea & Febiger, Philadelphia, 1980.

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej

[14] Fung, Y.-C., *Biomechanics. Mechanical Properties of Living Tissues*, Springer-Verlag, New York, 1981.

[15] Goliński, J., *Wibroizolacja maszyn i urządzeń*, PWN, Warszawa, 1979.

[16] Hill, A. V., The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle, *Proceedings of Royal Society* 126[B], 136-195, 1938.

[17] Huxley, A. F., Niedergerke, R., Structural changes in muscle during contraction. Interference microscopy of living muscle fibres. *Nature* 173, 971-973, 1954.

[18] Huxley, H. E., Hanson, J., Changes in the cross-striatons of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation. *Nature* 173, 973-976, 1954.

[19] Malinowski, A., Bożiłow, W., *Podstawy antropometrii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Łódź, 1997.

[20] Majchrzak, E., Dziewoński, M., *Numerical analysis of biological tissue freezing process*. Kluwer Academic Publishers, 2001, 189-200.

[21] Nigg, B. M., Herzog, W., (eds.), *Biomechanics of the Musculo-skeletal System*, John Wiley & Sons, Chichester, 1994.

[22] Pilawski, A., *Podstawy biofizyki*, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa, 1985.

[23] Siegel, I. M., *All about muscle, a user's guide*, Demos, New York, 2000.

[24] Skalak, R., Chien, S., *Handbook of Bioengineering*, New York, 1986.

[25] Smith, T., *Ciało człowieka*, ZETDEZET, Warszawa, 1995.

[26] Sylwanowicz, W., *Anatomia człowieka: podręcznik dla studentów medycyny*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa, 1977.

[27] Tadeusiewicz, R., *Problemy biocybernetyki*, Wydanictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1994.

[28] Wilkie, D. R., *Mięsień*, PZWL, Warszawa, 1974.

[29] Winters, J. M., Crago, P. E., *Biomechanics and neural control of posture and movement*, Springer, New York, 2000.

[30] Yamada, H., *Strenght of Biological Materials*, New York, 1973.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA POLITECHNIKI w ŁODZI 001

96948

Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej


Ze zbiorów Biblioteki Głównej Politechniki Łódzkiej