

4

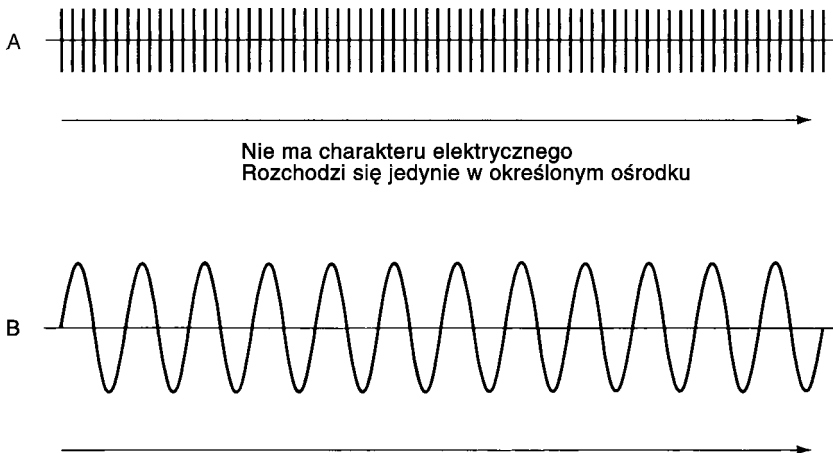
Ultradźwięki

Metoda tradycyjna

W odróżnieniu od fal elektromagnetycznych ultradźwięki, które nie mają charakteru elektromagnetycznego, charakteryzują się podłużnym kształtem fali. Przypominają one nieco akordeon (rozciąganie i ściśnięcie, nie muzykę! – przyp. tłum.). Fale dźwiękowe to zagęszczanie i załamywanie się drgającego ośrodka (ryc. 4–1). Fale elektromagnetyczne można przesyłać w próżni, np. przez przestrzeń międzyplanetarną, natomiast fale dźwiękowe rozchodzą się w określonym, sprężystym ośrodku. Dźwięk jako fala spełnia prawa fizyki dotyczące odbijania, pochłaniania, załama-

nia i rozpraszania fal (patrz ryc. 3–14 i 3–15). Niekiedy podłużna fala dźwiękowa staje się falą poprzeczną, co wiąże się z niepożądanym zjawiskiem akumulacji ciepła. Ten problem omówiono w dalszej części rozdziału (patrz „Efekt ścinania”).

Ultradźwięki stosuje się w medycynie w leczeniu skurczów mięśni i ścięgien. Wykorzystuje się je również do zwalczania bólu i w innych stanach chorobowych, gdyż dzięki falom dźwiękowym do organizmu można wprowadzić przez skórę, w procesie zwanym ultrafonoforezą, cząsteczki różnych związków chemicznych. Ponieważ woda jest doskonałym ośrodkiem rozchodzenia się fal, stosowanie ul-



Ryc. 4–1. Podłużna fala ultradźwiękowa (A) i poprzeczna fala promieniowania elektromagnetycznego (B).

tradzwięków w kąpeli wodnej pozwala nadzwiękawić okolice trudno dostępne podczas zabiegu wykonywanego tradycyjną techniką (np. palce rąk i nóg, wystające fragmenty kostne stawu łokciowego, skokowego i nadgarstka). Ultrafonoforezę, jak również metodykę nadzwiękawiania w kąpeli wodnej omówiono w dalszej części rozdziału.

Podstawy fizyczne

W USA do celów medycznych stosuje się ultradźwięki o częstotliwości ok. 1 MHz. Drgania o takiej częstotliwości uzyskuje się przez przekształcenie prądu sieciowego (prąd zmienny 60 Hz/110 V) w prąd o napięciu 500 V za pomocą elementów elektronicznych w urządzeniu do terapii ultradźwiękami. Uzyskany w ten sposób prąd o wyższym napięciu działa następnie na oscylatory, czyli wibratory zwiększające częstotliwość do wymaganej wartości 1 MHz.

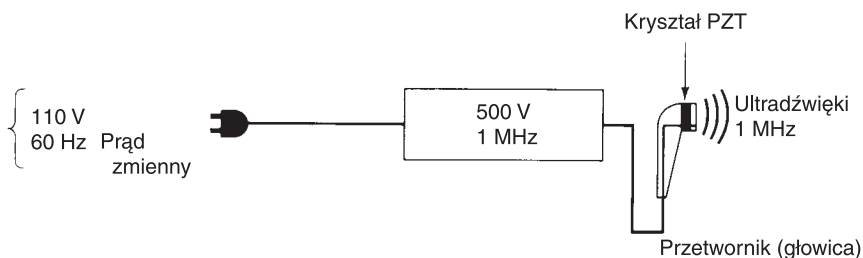
Piezoelektryczność

Wytworzony prąd wysokiej częstotliwości pobudza z kolei kryształ o właściwościach piezoelektrycznych. Piezoelektryczność to zjawisko naturalne obserwowane w kryształach występujących w przyrodzie, np. germanu i kwarcu, lub sztucznie wytworzonych, np. tytanianu ołowiowo-cyrko-

nowego (PZT). W takich kryształach energia mechaniczna zostaje przekształcona w elektryczną i odwrotnie – elektryczna w mechaniczną (ryc. 4–2). Jeżeli kryształ piezoelektryczny, naturalny lub sztucznie wytworzony, zostanie poddany ścisnaniu lub odkształcony środkami mechanicznymi, pojawi się w nim mały ładunek elektryczny; i odwrotnie, wynikiem przyłożenia do kryształu prądu (ładunku) elektrycznego jest powstanie drgań i mechaniczna deformacja struktury cząsteczkowej kryształu. (Kryształy różnią się od innych substancji, tzw. amorficznych, specyficznym uporządkowaniem struktury cząsteczkowej i precyzyjnym układem atomów wchodzących w ich skład. Zmiany działających w atomach sił, wywołane odkształceniem, powodują wyładowania elektryczne związane z zachowaniem naturalnej równowagi sił wewnątrzcząsteczkowych). Właściwości piezoelektryczne wykazuje również tkanka kostna, co wykorzystuje się w leczeniu niezrośniętych złamań za pomocą urządzeń elektronicznych (patrz rozdz. 6).

Przekształcenie energii elektrycznej w dźwięk

Prąd zmienny wielkiej częstotliwości (1 MHz) zostaje przyłożony do kryształu PZT w przetworniku piezoelektrycznym (głowicy ultradźwiękowej). W rezultacie energia elektryczna przekazana kryształo-



Ryc. 4–2. Schemat obrazujący sposób przekształcenia prądu sieciowego w prąd o wielkiej częstotliwości i wysokim napięciu, używany do wytwarzania ultradźwięków do celów leczniczych.

wi zostaje zamieniona na drgania, czyli zniekształcającą oscylację struktury cząsteczkowej kryształu o tej samej częstotliwości – 1 MHz. Kryształ, przymocowany klejem do metalowej lub plastikowej powierzchni przetwornika, wywołuje z kolei drgania obudowy (częstotliwość pozostaje nie zmieniona – 1 MHz). W ten właśnie sposób energia elektryczna przyłożonego prądu zostaje przekształcona w drgającą falę akustyczną – ultradźwiękową – nazywaną tak, ponieważ drgania te znajdują się poza zakresem słyszalnych fal dźwiękowych, który mieści się w granicach około 25–15 000 cykli na sekundę.

Przenoszenie energii fali

Substancje stykające się z głowicą ultradźwiękową, np. woda, oleje i żele sprzęgające, przekazują energię fali na przylegające do nich powierzchnie, np. skórę ludzką. Energia jest przekazywana od jednej tkanki do drugiej, jeżeli istnieje między nimi ośrodek przewodzący. Powietrze jest bardzo złym przewodnikiem dźwięku, w związku z czym podczas zabiegów nadźwiękawiania zastępuje się je innym ośrodkiem.

Przenikanie i pochłanianie fal dźwiękowych

Ultradźwięki przenikają w głąb ciała na głębokość 4–6 cm. Zjawiska pochłaniania, załamania, odbijania i rozpraszania fal występują jednak niezależnie od tego, czy fala ma kształt podłużny, czy poprzeczny. Tkanki o dużej zawartości wody, jak np. krew i tkanka mięśniowa, pochłaniają fale dźwiękowe w większym stopniu niż tkanki mniej nawodnione. Tkanka nerwowa, mimo pozornie nieznaczej zawartości wody, jest doskonałym przewodnikiem fal ultradźwiękowych. W podrozdziale „Metodyka zabiegów” opisuje się m.in. technikę na-

dźwiękawiania korzeni nerwów w leczeniu chorób nerwów obwodowych.

Działanie biologiczne

Ultradźwięki wywołują w organizmie cztery rodzaje zmian.

Reakcje chemiczne

Tak jak laborant wstrząsa probówką, aby przyspieszyć reakcje chemiczne, drgania ultradźwiękowe pobudzają reakcje chemiczne w tkankach, ułatwiając krążenie niezbędnych pierwiastków i rodników.

Odczyn biologiczny

Ultradźwięki zwiększają przenikalność błon komórkowych, co ułatwia dowóz płynów i składników odżywczych do tkanek. Zjawisko to jest wykorzystywane podczas zabiegu ultrafonoforezy, kiedy to cząsteczki związków chemicznych o działaniu leczniczym są dosłownie przepychane przez skórę za pomocą fal dźwiękowych.

Działania mechaniczne

Kawitacja

Drgania wielkiej częstotliwości, jakimi są ultradźwięki, odkształcają strukturę cząsteczkową substancji, w których siły wiążące cząsteczki są słabe. Zjawisko to wykorzystuje się do rozmiękczenia tkanek w celu likwidowania skurczów, zwiększenia ruchomości ograniczonej przez przylegające do siebie tkanki, rozbijania złożeń wapnia, pobudzania procesu zamykania się ran, bliznowacenia itp. Jeżeli zabieg wykonuje się przez maksymalnie długi czas lub wykorzystując maksymalną moc urządzenia, odkształcenia mogą doprowadzić do

zapadania się cząsteczek do wewnątrz i zniszczenia substancji. Zjawisko to nosi nazwę *kawitacji*. Jeżeli ultradźwięki stosuje się do celów medycznych, nie przekraczając zalecanych wartości mocy i innych parametrów, zjawisko kawitacji nie powinno występować. Okazuje się ono jednak pożądane w przypadku odkładania się niepotrzebnej tkanki łącznej w przebiegu podanych wyżej schorzeń. Siły międzycząsteczkowe w tkance łącznej są bowiem słabe i energia ultradźwięków wystarcza do ich przezwyciężenia.

Rozciągliwość ścięgien

Dzięki działaniu sklerolitycznemu ultradźwięków (rozmiękczeniu tkanek) nadźwiękawianie wpływa dodatnio na rozciągliwość ścięgien, co ma podstawowe znaczenie dla osób, u których w rezultacie stanu zapalnego, nadmiernego wysiłku lub choroby doszło do skrócenia ścięgien. Ultrasonoterapia staje się w przypadku stanów skurczowych znakomitą metodą terapeutyczną.

Demonstrowanie skutków mechanicznych

Mechaniczne skutki działania ultradźwięków bez efektu cieplnego (przegrzewania tkanek) można zademonstrować w 2 prostych doświadczeniach.

Doświadczenie 1

Wnętrze dłoni należy ułożyć na kształt kubeczka, tak aby do środka można było wlać niewielką ilość lekkiego oleju mineralnego. Na głowicy przetwornika rozprowadzić żel sprężający, po czym nadźwiękawiać grzbiet odwróconej dłoni. Po chwili można zauważyć falowanie powierzchni oleju. Fale ultradźwiękowe przenikają przez dłoń i oddziałują na olej bez wyczuwalnego wzrostu temperatury skóry czy powstania zmian w obrębie dłoni.

Doświadczenie 2

Na płytę głowicy pracującego przetwornika nalać kilka kropel wody. Po pewnym czasie woda zacznie kipieć, mimo braku odczuwalnego wzrostu temperatury. Wzrostu temperatury nie obserwuje się także



Ryc. 4-3. Kropla wody umieszczona na głowicy przetwornika zaczyna kipieć mimo braku dostrzegalnych zmian temperatury. Dowód mechanicznego działania ultradźwięków, niezależnego od efektu cieplnego.

wtedy, gdy ultradźwięki stosowane są w kąpeli wodnej. Na powierzchni wody widzi się jednak delikatne fale, co jest dowodem mechanicznego skutku działania energii ultradźwięków (ryc. 4–3).

Działanie ciepłe

Korzyści z przegrzewania

Dla licznych naukowców i klinicystów przegrzewanie jest najważniejszym z 4 rodzajów biologicznego działania ultradźwięków wykorzystywanych w medycynie. Efekt cieplny często nazywa się ciepłem ultradźwiękowym lub diatermią ultradźwiękową, przy czym ten drugi termin jest zdecydowanie nieodpowiedni. Zjawisko wytwarzania ciepła pod wpływem szybkich drgań cząsteczek jest uznawane przez wszystkich wykształconych specjalistów w dziedzinie nauk fizycznych. Ci z nas, którzy poprawę uzyskiwaną dzięki nadźwiękawianiu przypisują przede wszystkim przemianom mechanicznym, są zdania, że duża selektywność pochłaniania ultradźwięków przez tkanki ogranicza możliwość zastosowania tych fal w praktyce terapeutycznej do przegrzewania (pod wpływem masażu skóra niewątpliwie rozgrzewa się, lecz mimo to masażu raczej nie uważa się za odmianę leczenia ciepłem).

Należy pamiętać, że podczas zabiegu nadźwiękawiania ciepło wydziela się w obszarze ograniczonym do tkanek położonych dokładnie pod głowicą przetwornika. Ponieważ w najczęściej stosowanej metodzie podczas zabiegu głowicę przesuwają się z miejsca na miejsce, mało prawdopodobne wydaje się, by w ten sposób mogła powstać lecznicza ilość ciepła. Z możliwością powstania niepożądanego ciepła należy się jednak liczyć wówczas, gdy głowica pozostaje w bezruchu lub gdy moc urządzenia jest zbyt duża. Stosowanie ultradźwięków w postaci impulsów zmniejsza niebezpie-

czeństwo wydzielenia się nadmiernej ilości ciepła (patrz podrozdział „Nadźwiękawianie impulsowe”). Z praktyki klinicznej wynika, że sygnalizowane przez pacjenta odczuwanie ciepła przy powierzchni skóry należy traktować jako znak ostrzegawczy, świadczący o możliwości przedawkowania. „Gorąca” głowica nie tylko zmniejsza komfort zabiegu, lecz może zwiastować nadchodzące niebezpieczeństwo. Głowica może ulec przegrzaniu, gdy jest używana ciągle lub bardzo często, bez przerwy na „ostygnięcie”. Poza tym, pomimo stosowania substancji sprzęgającej, nadal występują tarcie, które również należy wziąć pod uwagę. Ogólnie zalecam, aby przed rozpoczęciem zabiegu operator sprawdził, czy głowica nie jest zbyt gorąca, przykładając ją do wnętrza własnej dłoni.

Wydzielanie się ciepła na granicy dwóch tkanek

Należy przede wszystkim pamiętać o tym, że podczas nadźwiękawiania ciepło powstaje głównie na styku dwóch różnych tkanek przedzielonych przestrzenią. Obszary graniczne, w których najczęściej dochodzi do powstawania ciepła, to strefy przyokostnowe występujące pomiędzy twardą powierzchnią kości i błyszczącą wewnętrzną powierzchnią okostnej, gdzie kość jest oddzielona od okostnej cienką warstwą powietrza, być może o grubości jedynie jednej cząsteczki. Gdy czoło fali dźwiękowej, przeniknąwszy przez tkankę, zbliży się do powierzchni granicznej, zmiana ośrodka (od wilgotnej tkanki przez okostną, powietrze do tkanki kostnej) powoduje załamanie fali dźwiękowej, a przejście fali przez kilka różnych rodzajów tkanek jedynie potęguje ten efekt. Gdy podłużna fala dźwiękowa dociera do granicy kość/okostna i ulega tam załamaniu, ką padania jest już wystarczająco duży, by fala została odbita od powierzchni kości ku

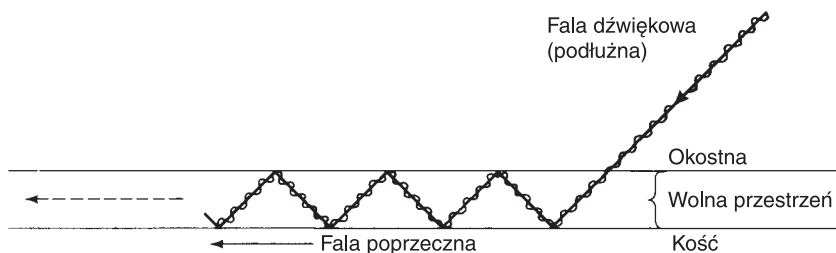
wewnętrznej stronie okostnej, a następnie z powrotem w kierunku kości i tak w nieskończoność.

Efekt ścinania

Efekt ścinania polega na zmianie kształtu fali z podłużnego na poprzeczny, podobnie jak wtedy, gdy miech akordeonu faluje szybko w górę i w dół. Fala poprzeczna o częstotliwości 1 MHz wytwarza duże ilości ciepła. W ograniczonej przestrzeni pomiędzy kością i okostną nie ma wystarczająco

dużo miejsca, by wytworzone ciepło mogło się rozproszyć. W rezultacie może dojść do oparzenia okostnej. Jest to niezwykle niebezpieczne powikłanie, ponieważ nie jest w stanie go rozpoznać ani pacjent, ani prowadzący lekarz, a objawy zwykle umykają uwadze aż do chwili, gdy rozwiną się objawy ogólnoustrojowe (np. ból i gorączka).

Zjawisko zmiany fali z podłużnej w poprzeczną nazywane jest efektem ścinania. Należy zapobiegać jego powstawaniu (ryc. 4-4). W podrozdziale dotyczącym metody-



Ryc. 4-4. Efekt ścinania, częsta przyczyna oparzeń okostnej. Odbijając się od powierzchni kości i wewnętrznej powierzchni okostnej, podłużna fala dźwiękowa zmienia kształt na poprzeczny.



Ryc. 4-5. Leczenie ultradźwiękami zrostowego zapalenia torebki stawu barkowego.