

dr hab n.med. KRYSZYNA

PAWLAS prof. nadzw.

A.M. Wrocław

¹⁾ Akademia Medyczna im. Piastów

Śląskich we Wrocławiu

50-365 Wrocław

ul. Pasteura 1

²⁾ Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia

Środowiskowego

41-200 Sosnowiec

ul. Kościelna 13

Wpływ infradźwięków i hałasu o niskich częstotliwościach na człowieka – przegląd piśmiennictwa

Słowa kluczowe: infradźwięki, hałas niskoczęstotliwościowy, percepcja suchowa, skutki zdrowotne, uciążliwość, kryteria oceny.

Key words: infrasound, low-frequency noise, hearing perception, health effects, annoyance, criteria for the assessment.

WPROWADZENIE

Infradźwięki są naturalnym zjawiskiem w świecie, a hałas infradźwiękowy powszechnie występuje w pobliżu dróg komunikacyjnych i w środowisku miejskim. W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie infradźwiękami, zarówno ze względu na rozwój technologii wytwarzających infradźwięki i rosnący odsetek populacji ekspozycji na ten hałas, jak i licznych niejasności z nim związanych. Z fizycznego punktu widzenia infradźwięki niczym nie różnią się od dźwięków słyszalnych czy ultradźwięków. Są zmianami ciśnienia rozchodzącymi się w postaci fal akustycznych w środowisku materialnym: ciałach stałych, cieczach i gazach. W niniejszym artykule będą rozważane tylko dźwięki rozchodzące się w powietrzu.

Podział fal dźwiękowych na infradźwięki, dźwięki słyszalne i ultradźwięki wynika z tradycji i ma swoje korzenie w historycznych już badaniach wrażliwości narządu słuchu w funkcji częstotliwości, gdy skalę dźwiękową, z uwagi na ówczesne możliwości aparatury generującej sygnały akustyczne, podzielono na dźwięki słyszalne od 20 do 20 000 Hz i dźwięki niewywołujące u człowieka wrażenia słuchowego. Zaliczenie dźwięków o częstotliwościach < 20 Hz do dźwięków niesłyszalnych było podyktowane także i tym, że badane osoby określały słyszenie dźwięków z tego zakresu, nie jako słyszenie tonów w „normalnym” sensie, lecz raczej jako odczucie „ucisku” w uszach czy dudnienie, buczenie, a ponadto sygnały o niskich częstotliwościach najpierw były odbierane przez receptory drgań (Moore 1999). Ponadto, zarówno w przypadku dźwięków < 20 Hz, jak i dźwięków > 20 000 Hz problemem były, ograniczone wówczas, technicznie możliwości wytworzenia dźwięków o pożądanym parametrach. Dźwięki o często-

tliwości poniżej 20 Hz nazywa się infradźwiękami (w niektórych pracach za górną granicę infradźwięków przyjęto częstotliwość 16 Hz), a dźwięki o częstotliwościach powyżej 20 000 Hz nazwano ultradźwiękami (w niektórych pracach za dolną granicę ultradźwięków przyjęto częstotliwość 16 000 Hz).

Istnieje wiele źródeł emitujących dźwięki o częstotliwościach poza zakresem $20 \div 20\,000$ Hz zarówno naturalnych, jak i antropogenicznych.

INFRADŹWIĘKI I HAŁAS INFRADŹWIĘKOWY

Definicja infradźwięków i hałasu infradźwiękowego

Nie wypracowano wciąż jednoznacznej definicji hałasu infradźwiękowego (hałasu o niskiej częstotliwości). Zgodnie z normą PN-N-01338:1986 oraz publikacją „Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne” (1998) hałasem infradźwiękowym określa się hałas, w którego widmie występują składowe o częstotliwościach infradźwiękowych od 2 do 16 Hz i o niskich częstotliwościach słyszalnych do 50 Hz, natomiast na stronie internetowej CIOP-PIB [<http://www.ciop.pl/6541.html>] (dane z dnia 20.08.2008) oraz wyd. VI „Czynników szkodliwych w środowisku pracy – wartości dopuszczalne” (2007) hałas infradźwiękowy, jest określany jako hałas, w którego widmie występują składowe o częstotliwościach infradźwiękowych od 2 do 20 Hz i o niskich częstotliwościach słyszalnych. W przygotowanym projekcie nowelizacji normy PN-N-01338 podana definicja określa hałas infradźwiękowy jako hałas, którego widmo obejmuje zakres częstotliwości od 1 do 20 Hz.

Obecnie w piśmiennictwie coraz powszechniej używa się pojęcia hałas niskoczęstotliwościowy, które obejmuje zakres częstotliwości od około 10 do 250 Hz.

Według norm ISO 7196:1995 i ISO 9612:1997 infradźwiękami nazywamy dźwięki lub hałas, którego widmo częstotliwościowe jest zawarte w zakresie od 1 do 20 Hz, natomiast w piśmiennictwie coraz powszechniej jest używane pojęcie „hałas niskoczęstotliwościowy”, czyli hałas obejmujący zakres częstotliwości od około 10 do 200 lub 250 Hz (a niekiedy do 500 Hz (*Alves-Pereira* 1999)).

Źródła infradźwięków

Źródłami infradźwięków są liczne zjawiska naturalne, ale wraz z rozwojem techniki pojawiło się także wiele źródeł antropogenicznych. Infradźwięki są wszechobecne i występują z różnym natężeniem zarówno w środowisku pracy i w środowisku komunalnym, jak i w naturze z dala od siedlisk ludzkich. Infradźwięki i dźwięki o niskich częstotliwościach są wytwarzane przez np.: grzmoty, lawiny, tornada, zorzę polarną, wulkany, trzęsienia ziemi, wodospady, wiatry i wzburzone morze. Są też generowane celem komunikowania się na odległość wielu kilometrów przez niektóre gatunki zwierząt, np.: słonie, żyrafy, okapi wieloryby i aligatory. Powstają także podczas zderzeń dużych meteoroidów z Ziemią. Według *Stepanowa* (2001) poziom stałego średniego naturalnego tła infradźwięków w paśmie $0,02 \div 1$ Hz wynosi $35 \div 40$ dB. Podczas sztormów i tsunami mierzony poziom infradźwięków sięga $140 \div 145$ dB Lin (*Stepanow* 2001).

Najsłynniejszym zjawiskiem infradźwiękowym był wybuch wulkanu Krakatoa w 1883 r., a wytworzona wówczas fala dźwiękowa o częstotliwości 0,1 Hz po okrążeniu Ziemi straciła zaledwie 0,5% energii (Berglund i in. 1996). Zakres częstotliwości infradźwięków wytwarzanych przez naturę praktycznie mieści się w przedziale 0,01 ÷ 20 Hz (Bedard, George 2000).

Najważniejszymi źródłami infradźwięków pochodzenia antropogenicznego są: lotnictwo, ciężki transport drogowy, silniki rakietowe, sprężarki tłokowe, młoty kuźnicze, wentylatory przemysłowe, sprężarki i elektrownie wiatrowe. Infradźwięki towarzyszą również wybuchom i eksplozjom. Ostatnio coraz większym utrapieniem mieszkańców są samochody wyposażone w głośne systemy stereo odtwarzające muzykę z ekstremalnie dużą zawartością basów (tzw. *boom cars*). W przypadku tych ostatnich źródeł poziomy hałasu wewnątrz samochodu znacznie przekraczają 100 dB, a według doniesień sięgają nawet poziomów rzędu 170 dB (ASA/NOISE-CON 2000). Poważnym źródłem infradźwięków mogą być także zrzuty mediów energetycznych w zakładach przemysłowych oraz elektrownie ciepłe i wodne. Coraz częściej spotykanym źródłem infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego są elektrownie wiatrowe. Także w Polsce każdego roku przybywa wiele takich elektrowni. Poziom hałasu wytworzonego przez te elektrownie zależy w dużej mierze od przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Poziom hałasu dla elektrowni wiatrowych waha się w granicach 100 ÷ 107 dB A przy turbinie. Rośnie wraz ze wzrostem prędkości wiatru i maleje wraz ze wzrostem odległości od turbiny. Na przykład przy prędkości wiatru 8 m/s, poziom hałasu w odległości 350 ÷ 500 m od turbiny i na wysokości około 2 m nad ziemią wynosi około 40 ÷ 50 dB A (około 70 dB G).

Obszerny wykaz przemysłowych źródeł hałasu niskoczęstotliwościowego wraz z poziomami hałasu przez nie wytwarzanymi został wykonany przez zespół Kaczmar-skiej i Augustyńskiej (1999; Kaczmarska i in. 2000). Wybór niektórych źródeł z tych prac przedstawiono w tabeli 1. Najsilniejszymi źródłami infradźwięków pochodzenia antropogenicznego są wybuchy atomowe i termojądrowe. Infradźwięki są także wytwarzane przez sprzęt domowy, jak np. klimatyzatory czy lodówki. Infradźwięki i dźwięki o niskiej częstotliwości są niezwykle istotne w muzyce do podkreślenia czy wytworzenia odpowiedniego nastroju, w szczególności są wykorzystywane w ścieżkach dźwiękowych horrorów i filmach science fiction [<http://www.reallyscary.com/interviewdelto-ro.asp>] wersja z 20.08.2008 (Tang, Wong 2004). Największe organy w świecie znajdujące się w Atlantic City mają piszczałkę o długości prawie 20 m generującą dźwięk o częstotliwości 8 Hz, który jest raczej wyczuwany niż słyszany. W celu uzupełnienia należałoby wspomnieć także o broni akustycznej, czyli broni niepowodującej śmierci (*non-lethal weapons*). Poziomy dźwięku przez nią wytwarzane sięgają 125 ÷ 150 dB o czasie trwania od 1 ÷ 2 s. Broń ta jest przeznaczona głównie do rozpędzania tłumów, bez powodowania szkód fizycznych w zdrowiu uczestników. Jednakże z uwagi na specyficzne zastosowanie tego typu źródeł, jak i ich specyficzne parametry (ekstremalne natężenia, krótki czas działania) w dalszej części opracowania problem ten nie będzie prezentowany, zwłaszcza, że wokół tego zagadnienia narosło wiele mitów, a zainteresowani mogą poznać to zagadnienie na przykład z obszernego opracowania Altmanna (1999) przynajmniej w części udostępnionej do publicznej wiadomości.

Tabela 1.

Poziomy ciśnienia wybranych źródeł naturalnych (Leventhall 2007; Noble, Tenney 2008) **i antropogenicznych** (Kaczmarska, Augustyńska 1999; Kaczmarska i in. 2006)

Źródła naturalne i z aktywności dnia codziennego ludzi ^{a)}	Poziom ciśnienia akustycznego (dB) i dominujący zakres częstotliwości (Hz)	Źródła antropogeniczne ^{b)}	Poziom ciśnienia akustycznego (dB) i dominujący zakres częstotliwości (Hz)
Erupcja wulkanu z odległości 1000 km	117 dB dla częstotliwość < 0,01	start rakiety w miejscu startu; z odległości 40 km	188 dB 77 ÷ 95 dB 1 ÷ 20 Hz
Tornado z odległości 30 ÷ 800 km	67 ÷ 84 dB 0,02 ÷ 10 Hz	kabina kierowcy ciężarówki lub autobusu	97 ÷ 115 dB (G)
Lawina śnieżna z odległości 100 km	60 ÷ 68 dB 0,05 ÷ 2 Hz	turbiny wiatrowe	95 ÷ 110 dB w zależności od prędkości wiatru, 1 ÷ 5 Hz
Wiatr z prędkością ^{c)} 100 km/h; z prędkością 25 km/h	< 1Hz 135 dB 110 dB	wystrzały ^{c)}	120 ÷ 160 dB 1 ÷ 20 Hz
Wodospady	95 ÷ 100 dB	odrzutowe silniki lotnicze w pomieszczeniu silników	85 ÷ 120 dB 4 ÷ 31,5 Hz
Uderzenie pioruna	ok. 100 dB	młoty kuźnicze	91 ÷ 105 dB poniżej 5 Hz
Dziecko na huśtawce	90 ÷ 100 dB 1 ÷ 10 Hz 110 dB 0,5 Hz	na stanowiskach pracy w elektrowniach wentylatory, dmuchawy i ssawy	90 ÷ 105 dB 2 ÷ 8 Hz 90 ÷ 108 dB 5 ÷ 63 Hz
Czyszczenie ucha ^{c)}	185 dB 3 ÷ 5 Hz	helikoptery ^{c)}	115 dB 1 ÷ 20 Hz

a) Leventhall (2007).

b) Kaczmarska, Augustyńska (1999); Kaczmarska i in. (2006).

c) Noble, Tenney [<http://www.tornadochaser.net/research/infasonicdetector.pdf>].

Cechą charakterystyczną antropogenicznych źródeł hałasu infradźwiękowego/niskoczęstotliwościowego jest współwystępowanie w widmie także składowych o częstotliwościach od średnich do średniowysokich, jak to ma miejsce, np. w przypadku hałasów wytwarzanych przez różnorodne środki transportu, wentylatory przemysłowe czy też sprężarki i turbiny, a nawet wspomniany wcześniej sprzęt domowy. Za źródła hałasu niskoczęstotliwościowego uważa się na ogół te, które wytwarzają hałas w widmie, którego dźwięki o niskich częstotliwościach mają większe natężenie niż składowe średnio- i wysokoczęstotliwościowe (Tempest, Bryan 1972; Berglund i in. 1996; Pawlaczyk-Luszczynska i in. 2001).

W rzeczywistości nie występuje ekspozycja jedynie na infradźwięki (< 20 Hz), a ekspozycji na infradźwięk często towarzyszą dźwięki z zakresu słyszalnego. Nawet w

warunkach laboratoryjnych jest niezwykle trudno uzyskać czyste źródło infradźwiękowe bez współwystępowania częstotliwości harmonicznych z zakresu słyszalnego (Takahashi i in. 1997).

Właściwości infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego

Fale infradźwiękowe rozchodzą się głównie w postaci fal kulistych i tłumienie następuje głównie w wyniku propagacji takiej fali, tj. 6 dB wraz z podwojeniem odległości. Wraz ze wzrostem częstotliwości dźwięki są coraz silniej pochłaniane przez powietrze. Dlatego też pochłanianie infradźwięków przez powietrze jest słabe i wynosi dla dźwięku o częstotliwości 10 Hz – 0,1 dB/km, podczas gdy dla dźwięków z zakresu słyszalnego, np. dla 1 kHz pochłanianie wynosi 10 dB/km, a dla 4 kHz już 70 dB /km, natomiast dla ultradźwięku o częstotliwości 30 000 Hz aż 7 dB/10 m.

Fale infradźwiękowe charakteryzują się dużą długością, są słabo pochłaniane przez ośrodek, rozprzestrzeniają się więc na duże odległości od źródła, nawet do tysięcy kilometrów (zwłaszcza te poniżej 1 Hz). W tabeli 2. pokazano długość fal w powietrzu dla kilku wybranych częstotliwości.

Tabela 2.

Długość fal infradźwiękowych w powietrzu dla wybranych częstotliwości

Częstotliwość, Hz	Długość fali, m
1000	0,34
20	17
10	34
1	340
0,1	3400

Właściwości fal infradźwiękowych zostały wykorzystane do monitorowania przede wszystkim wybuchów jądrowych, ale także często obecność infradźwięków może być pierwszą informacją o zaistnieniu takich zjawisk, jak: trzęsienia ziemi, wybuchy wulkanów czy uderzenia meteoroidów, jeżeli zdarzają się one na terenach odludnych.

Ze względu na duże długości fal infradźwiękowych, ekrany akustyczne i inne tradycyjne przeszkody są mało skuteczne w tłumieniu tych fal, a lokalizacja źródła infradźwięków jest trudna ze względu na słabe tłumienie, długą długość fali i takie zjawiska towarzyszące rozchodzeniu się tej fali, jak możliwości wytwarzania w pewnych warunkach fali stojącej czy wywoływanie rezonansu. Zjawisko rezonansu występujące w: wielkorozmiarowych przestrzeniach zamkniętych, pomieszczeniach, elementach konstrukcyjnych lub całych obiektach, powoduje, że infradźwięki są powodem znacznej uciążliwości na stanowiskach pracy, a zwłaszcza w: budynkach mieszkalnych zlokalizowanych w sąsiedztwie zakładów przemysłowych ze źródłami hałasu niskoczęstotliwościowego, dróg z ciężkim taborem samochodowym czy farm wiatrowych. Zjawisko to jest notowane nawet w budynkach odległych o kilkaset i więcej metrów od takich obiektów (Berglung i in. 1996).

PERCEPCJA INFRADŹWIĘKÓW

Hałas infradźwiękowy wywołuje zarówno słuchowe, jak i pozasłuchowe wrażenia. Próg słyszenia dźwięków nie kończy się ostro na częstotliwości 20 (16) Hz i wbrew powszechnemu mniemaniu o ich niesłyszalności, dźwięki te są odbierane w organizmie specyficzną drogą słuchową (przez narząd słuchu), a poza nią przez receptory czucia wibracji.

Percepcja słuchowa

Próby ustalenia progów percepcji słuchowej infradźwięków i dźwięków o niskich częstotliwościach podjęto już w latach 30. ubiegłego wieku (*Moller, Pedersen 2004*). Wokół percepcji infradźwięków istnieje wciąż wiele kontrowersji. Początkowo wielu badaczy negowało odbiór sygnałów infradźwiękowych przez receptor słuchu, ponieważ badani niejednoznacznie określali odbierane sygnały jako sygnały tonowe, a raczej wrażenie dudnienia, pulsowania i tym podobne odczucia. Jedne z pierwszych badań wyznaczających progi słyszenia w zakresie częstotliwości poniżej 20 Hz były prowadzone w latach 50., a badania percepcji wykonane przez *Landströma* na podstawie zapisu eeg. dostarczyły dowodów na swoistość percepcji infradźwięków (*Landström i in. 1982*). Na podstawie zapisu eeg. udało mu się określić progi percepcji dźwięków o niskich częstotliwościach tylko u osób słyszących, podczas gdy u osób niesłyszających nie udało się wyznaczyć takich progów. Słyszalność infradźwięków zależy od poziomu ciśnienia akustycznego i charakteryzuje się dużą zmiennością osobniczą, szczególnie dla najniższych częstotliwości. Przyczyn tego można upatrywać w tym, że badania progów słyszenia były prowadzone na małych grupach słuchaczy, najczęściej 10- ÷ 50-osobowych, a skrajnie nawet na jednej czy dwóch osobach i różnymi metodami: zarówno przez słuchawki (*Corso 1958*), w wolnym polu (*Yeowart, Evens 1974; Watanabe, Moller 1990*), jak i w specjalnych kabinach (*pressure chamber*), (*Watanabe, Moller 1990*). Ponadto, w zakresie częstotliwości powyżej 20 Hz wyniki tych badań różniły się znacznie od krzywych wg normy ISO 226 (1987). Największy rozrzut wyników dotyczył pasma najniższych częstotliwości (poniżej 10 Hz). Jeżeli podczas badania słuchu stopniowo zmniejsza się częstotliwość sygnałów testowych poniżej 20 Hz, to odczucie tonalności sygnałów zanika, a pojawia się odczucie ucisku w uszach. Sygnały w zakresie częstotliwości 5 ÷ 15 Hz badani określali jako trzaski (*popping*), a poniżej 5 Hz jako sapanie i świstanie (*chugging i whooshing*), (*Yeowart i in. 1967, cyt. za Moller, Pedersen 2004*). *Johnson* (1980) tłumaczy takie wrażenia zjawiskiem nieliniowości w uchu środkowym, w wyniku czego są generowane zniekształcenia w zakresie słyszalnym. Wyniki badań przebiegu progu słyszenia w paśmie niskich częstotliwości uzyskane przez różnych autorów zostały zaprezentowane w pracy *Mollera i Pedersena* (2004). Podzielili je oni według czasu powstawania na trzy okresy: lata 1933-1967 to okres I, w którym badania prowadzono z udziałem małej liczby osób w badanych grupach, z zastosowaniem różnych metod badań charakteryzujących się bardzo dużymi rozbieżnościami w wynikach, okres II to lata 1971-1983 i okres III lata 1989-2001. Wartości tych progów przedstawiono w tabeli 3.

Dotychczas progi słyszenia w paśmie poniżej 20 Hz nie zostały wprowadzone do żadnej z norm ISO, włączając w to normę ISO 226 w wersji z 2003 r.

Tabela 3.

Średnie wartości progów słyszenia w paśmie 1 ÷ 20 Hz (na podstawie *Mollera i Pedersena 2004; Watanabe i Mollera 1990*)

Badane progi	Częstotliwość, Hz							
	1	2	4	8	10	12,5	16	20
Wartości średnie progów słyszenia z wyników prezentowanych przez <i>Mollera i Pedersena (2004)</i> , w dB	122	115	108	98	92	89	82	74
Progi słyszenia wg <i>Watanabe i Moller (1990)</i> , w dB			108	100	97	92	88	79

Van der Berg (2005) opracował wartości percentylowe progów słyszenia w zakresie 4 ÷ 100 Hz dla populacji (tab. 4). Za wartość proggu słyszenia przyjął wartość medialną, czyli tę, z jaką 50% populacji odbiera dźwięki.

Tabela 4.

Wartości percentylowe progów słyszenia w zakresie 4 ÷ 100 Hz dla populacji (na podstawie *van der Berga 2005*)

Częstotliwość, Hz	Próg percepcji (w dB w stosunku do 20 µP) dla odsetka populacji		
	90%	50%	10%
4	107	119	135
10	92	103	119
20	74	85	101
50	39	50	66
100	22	34	50

Nie zauważył *van der Berg* różnic w położeniu proggu słyszenia między kobietami a mężczyznami. Wrażliwość na infradźwięki zmniejsza się dopiero po 50 roku życia – osoby starsze w wieku 50 ÷ 60 lat mają słuch mniej czuły o około 6 ÷ 7 dB (*van der Berg, Passchier-Veermer 1999*).

Próg słyszenia dla infradźwięków zmienia się od około 50 dB dla częstotliwości 50 Hz przez 80 dB dla 25 Hz, około 90 dB dla 12 ÷ 16 Hz, około 100 dB dla 6 ÷ 8 Hz i do około 110 dB dla 4 Hz.

Ból w uszach pod wpływem ekspozycji na wysokie poziomy hałasu pojawia się, gdy przemieszczenia struktur ucha środkowego przekraczają „normalne” fizjologiczne granice. Ból ten jest ostrzeżeniem przed bezpośrednim zagrożeniem uszkodzenia narządu słuchu. Próg bólu dla infradźwięków zmienia się od 135 dB dla 50 Hz, przez 145 dB dla 20 Hz, 155 dB dla 5 Hz i do 165 dB dla 2 Hz. Ciśnienie statyczne wywołuje ból na poziomie 175 ÷ 180 dB, a rozerwanie błony bębenkowej na poziomie około 185 ÷ 190 dB (*von Gierke, Nixon 1976; Yeowart i in. 1967*). Odstęp między proggiem słyszenia a proggiem bólu w paśmie infradźwiękowym znacznie się zawęża do 30 ÷ 40 dB dla najniższych częstotliwości, podczas gdy w paśmie 1000 ÷ 5000 Hz odstęp ten wynosi 120 ÷ 140 dB (*Berglund, Lindvall 1999*).

Dokonując przeglądu wyników badań progów słyszenia w paśmie poniżej 20 Hz, *Moller* (2004) konkluduje, że na podstawie dotychczasowych wyników badań należy uznać, że narząd słuchu jest podstawowym zmysłem dla takich sygnałów, nie stwierdzono bowiem różnic w położeniu tych progów między kobietami a mężczyznami. Ubytki związane z wiekiem pojawiają się po 50 roku życia, a odchylenia standardowe wyników wynoszą około 6 dB (*Watanabe, Moller* 1990), chociaż w populacji pewien odsetek osób charakteryzuje się większą wrażliwością na ten zakres częstotliwości.

Obiecujące wyniki zaprezentowali *Hensel* i in. (2007). Porównywali oni zmiany u 12 zdrowych osób (z dobrym słuchem, bez obciążenia w wywiadzie otologicznym) w wynikach produktów zniekształceń otoemisji akustycznej (DPOAEs), gdy stosowano sygnały modulowane infradźwiękiem o częstotliwości 6 Hz i o poziomie 130 dB w porównaniu do wyników z zastosowaniem sygnału niemodulowanego. Wyniki ich pracy jednoznacznie wskazują, że infradźwięki docierają do ucha wewnętrznego i wpływają na zachowanie się ślimaka. Walorem tych badań jest fakt, że wyniki uzyskano metodą obiektywną. Biorąc jednakże pod uwagę liczebność grupy oraz fakt zastosowania tylko jednej częstotliwości z zakresu infradźwiękowego, należy traktować te wyniki jako wstęp do dalszych badań infradźwięków z zastosowaniem otoemisji akustycznej.

Podsumowując, należy stwierdzić, że na podstawie wyników badań pokazano, że słyszalność infradźwięków aż do częstotliwości 1 Hz jest udowodniona, natomiast wyniki indywidualne są mocno zróżnicowane. Próg słyszenia osób o szczególnej wrażliwości leży około 10 dB poniżej średniej progę słyszenia.

Pozasłuchowa percepcja infradźwięków

Infradźwięki wywołują, oprócz percepcji słuchowej – reakcję prioprioreceptów mięśni czy mechanoreceptorów. Na podstawie wyników badań na myszach wykazano (*Bunsel, Lehmann* 1978), że ekspozycja na infradźwięki powoduje podobny wpływ na wykonywanie zadań przez głuche myszy, jak i myszy słyszące, podczas gdy ekspozycja na dźwięki z zakresu słyszalnego (500 ÷ 10000 Hz) wywołuje zmiany tylko w przypadku myszy słyszących. Próg odbioru infradźwięków w paśmie 6 ÷ 50 Hz leżał na poziomie 160 ÷ 115 dB, podczas gdy dla zakresu słyszalnego – na poziomie 60 ÷ 80 dB. *Landström* stwierdził, że progi te leżą dla 4 Hz na poziomie 124 dB (107 dB dla drogi słuchowej) i 116 dB dla 16 Hz (82 dB dla drogi słuchowej), (*Landström* i in. 1983). Badania *Yamady* na osobach niesłyszących wykazały, że progi percepcji mechanoreceptorów znajdują się o 40 ÷ 50 dB wyżej niż progi słyszenia i są takie same dla osób słyszących (*Yamada* i in. 1983).

SKUTKI EKSPOZYCJI NA INFRADŹWIĘKI I HAŁAS NISKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWY

Jest rzeczą zrozumiałą, że z uwagi na rosnącą liczbę antropogenicznych źródeł infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego, zwłaszcza w środowisku zurbanizowanym, wpływ tego zakresu częstotliwości na zdrowie ludzi wywołuje coraz większe zainteresowanie. Większość badań poświęconych skutkom ekspozycji na infradźwięki pochodzi z lat 70. i 80. XX wieku. Były one związane przede wszystkim z badaniami kosmicznymi i były ukierunkowane głównie na narażenia krótkotrwałe, ale o dużych natężeniach.

niach. Wykonywano je zarówno w warunkach laboratoryjnych, gdzie wszystkie parametry ekspozycji były kontrolowane i można było eksponować badanych nawet na pojedyncze częstotliwości, jak i w warunkach rzeczywistych ekspozycji, gdzie źródła generują hałas z komponentami infradźwiękowymi i niskoczęstotliwościowymi. Niektóre z badań laboratoryjnych, te z ekspozycjami na ekstremalne natężenia, obecnie nie zostałyby zaakceptowane przez komisje etyczne. Wyniki tych badań są do tej pory często niedostępne w innej formie niż w postaci materiałów konferencyjnych, a raporty z badań są w większości wciąż utajnione. Są to głównie materiały rosyjskie i amerykańskie. Z przeglądu dostępnych streszczeń wynika, że badania były prowadzone na niewielkich, często tylko kilkusobowych grupach i na ogół z ekspozycją krótkotrwałą, nawet tylko kilkudziesięciosekundową (*Mohr i in.* 1965), ale za to o dużym natężeniu, nawet, jak w przypadku badań *Sherera*, dochodzącym do 170 dB (cyt. za *Stepanow* 2001). Dobór stosowanych parametrów był podyktowany przede wszystkim spodziewanymi ekspozycjami podczas startów pojazdów kosmicznych i oceną wpływu takich ekspozycji na zdrowie (układ krążenia, słuch i narząd równowagi) czy możliwości wykonywania zadań podczas lotów oraz stan emocjonalno-psychiczny osób narażanych. Dwie grupy badaczy, jedna kierowana przez *Piemonowa* i druga kierowana przez *Stana* podczas International Colloquium w Paryżu w 1973 r. przedstawiły wyniki swoich badań. Z badań tych wynikało, że ekspozycja na infradźwięki o poziomie powyżej 180 dB grozi śmiercią, a ekspozycja 2-minutowa na infradźwięki o poziomach z zakresu 150 ÷ 172 dB jest tolerowana przez zdrowe osoby, natomiast wielogodzinna ekspozycja na poziomy 120 ÷ 140 dB wywołuje zmęczenie i może wywoływać zaburzenia zdrowotne. Informacje o eksperymentach jednak były bardzo skąpe (*Stepanow* 2001). Większość publikacji przedstawiających wyniki badań wpływu infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na człowieka była wykonywana w warunkach laboratoryjnych i dotyczyła ich wpływu na narząd słuchu i równowagi, znużenie oraz możliwość wykonywania zadań. Do tej pory niewiele jest publikacji poświęconych skutkom zdrowotnym zawodowej długotrwałej ekspozycji na hałas o niskich częstotliwościach. Badania te były przeprowadzane głównie wśród kierowców i pracowników lotnictwa oraz populacji generalnej ekspozowanej na hałas komunikacyjny z komponentami niskoczęstotliwościowymi. Obecnie wobec dość powszechnego zjawiska budowania elektrowni wiatrowych oraz narastania ruchu lotniczego i ciężkiego transportu samochodowego zwiększa się odsetek osób ekspozowanych na hałas o niskich częstotliwościach w środowisku bytowania, co wyindukowało powrót do badań nad skutkami ekspozycji na taki rodzaj hałasu.

Wpływ infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na narząd słuchu

Zmiany stanu narządu słuchu wywołane ekspozycją na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy mogą mieć charakter trwały lub czasowy. Z przyczyn oczywistych badania nad trwałymi ubytkami słuchu u ludzi dotyczą tylko osób zawodowo ekspozowanych na infradźwięki, a w rzeczywistych warunkach ekspozycja taka zawsze zawiera komponenty słyszalne. W piśmiennictwie można spotkać informacje o dwóch pracach, które pokazywały trwałe skutki ekspozycji na hałas z komponentą infradźwiękową u ludzi. Pierwsza to praca *Tonndorfa* z 1950 r. (cyt. za *Johnson* 1982), w której autor opisywał uszkodzenia błony bębenkowej u marynarzy niemieckich okrętów podwodnych, wskutek ekspozycji na hałas o częstotliwościach 10 ÷ 20 Hz. Autor nie przedstawił jednak poziomów ekspozycji, a *Johnson* ocenia, że prawdopodobnie przekraczała ona 120 dB i

była długotrwała. Druga praca, to badania epidemiologiczne wykonane przez zespół *Doroshenko* (cyt. za *Schust* 2004). Porównywano w niej ubytki słuchu operatorów kompresorów zawodowo ekspozowanych na hałas o poziomach $84 \div 97$ dB A z komponentą infradźwięków o poziomach $91 \div 109$ dB z grupą pracowników ekspozowanych jedynie na hałas słyszalny o poziomach $93 \div 106$ dB A. W grupie operatorów kompresorów ubytki słuchu były większe, a różnice w porównaniu z grupą osób ekspozowanych na hałas bez komponenty infradźwiękowej zwiększały się wraz ze wzrostem czasu ekspozycji. Ze względu jednak na brak dostępu do pełnego tekstu tej publikacji, trudno ocenić ją pod względem poprawności warsztatu badawczego, w szczególności ze względu na brak oceny istotności różnic między grupą operatorów kompresorów a grupą robotników ekspozowanych na hałas bez komponenty infradźwiękowej. Dla kompletności informacji należy wspomnieć o pracy *von Gierke* i *Nixon* (cyt. za *Altmann* 2001), którzy ustalili, iż ciśnienie statyczne rzędu $42 \div 55$ kPa ($186 \div 189$ dB) dźwięków z zakresu słyszalnego (około 160 dB) powoduje przerwanie błony bębenkowej u ludzi, a skrajnie wysokie poziomy infradźwięków mogą zbliżyć się do tych wartości.

W pozostałych pracach dostępnych w piśmiennictwie zaprezentowano jedynie zmiany czasowe progu słyszenia po ekspozycji ludzi na infradźwięki. Według *Johnsona* (1980; 1997) ekspozycja na infradźwięki o poziomie poniżej 140 dB i czasie trwania krótszym niż 30 min nie powoduje czasowo przesunięcia progu słyszenia (TTS). *Mohr* i in. (1965) nie stwierdzili występowania TTS po 1 godzinie od zaprzestania ekspozycji na infradźwięki z zakresu $10 \div 20$ Hz, o poziomach $150 \div 154$ dB i czasie trwania 2 min. W obu pracach jednakże liczba badanych osób była mała – 5 osób w pracy *Mohra* (1985) i 16 osób w pracy *Johnsona* (1980). W pracach innych autorów omawianych w publikacjach *Berglund* i in. (1996) i *Johnsona* (1982) przesunięcie progu słyszenia, na ogół rzędu kilkunastu decybeli (od 0 do 25 dB), szybko zanikało w czasie do 30 min po zaprzestaniu ekspozycji (tab. 5.).

Tabela 5.

Zestawienie wyników badań czasowego przesunięcia progu słyszenia (TTS) po ekspozycji na infradźwięki (na podstawie *Berglund* i in. 1996; *Johnson* 1982)

Ekspozycja	Czasowe zmiany progu słyszenia (TTS)	Czas powrotu	Piśmiennictwo
Maszynownia okrętu podwodnego ze składowymi $10 \div 20$ Hz, poziom nie podany	podwyższenie progu słyszenia mierzonego za pomocą czasu, w jakim kamerton zaczął być słyszany	kilka godzin po zaprzestaniu ekspozycji	<i>Tonndorf</i> 1950 (cyt. za <i>Johnson</i> 1982)
Ekspozycja 2-minutowa na dźwięki z zakresu $10 \div 20$ Hz o poziomach $150 \div 154$ dB;	brak TTS po 1 h		<i>Mohr</i> i in. 1965
Ekspozycja 3-minutowa, $7 \div 12$ Hz, $119 \div 144$ dB	TTS w paśmie $3 \div 6$ kHz $10 \div 22$ dB u 11 osób z 19 ekspozowanych	powrót do 30 min	<i>Jerger</i> i in. 1966 (cyt. za <i>Johnson</i> 1982)

cd. tab. 5.

Ekspozycja	Czasowe zmiany progu słyszenia (TTS)	Czas powrotu	Piśmiennictwo
26 s, 1 ÷ 10 Hz, 171 dB, 1 osoba	TTS = 0	do 30 min	<i>Johnson 1973</i>
7 Hz, 168 dB, 1 osoba	TTS = 0		(cyt. za
5 min, 7 Hz, 155 dB, 2 osoby	TTS = 0		<i>Johnson 1980)</i>
30 min, 4; 7 i 12 Hz, 140 dB, 1 osoba	TTS w paśmie 2 ÷ 6 kHz rzędu 14 ÷ 17 dB	do 30 min	
5 min, 4; 7 i 12 Hz, 140 dB 8 osób	TTS = 8 dB u 1 osoby	do 30 min	
5 min, 0,6; 1,6 i 2,9 Hz, 135 dB, 12 osób	TTS = 0		
5 min, 0,6; 1,6 i 2,9 Hz, 126 dB, 11 osób	TTS = 0		
5; 10; 15; 20; 25 i 30 min, 14 Hz, 140 dB, 3 osoby	TTS = 20 ÷ 25 dB u 1 osoby		<i>Nixon 1973</i> (cyt. za <i>Berglund 1996)</i>
15 min, 7 Hz, 142 dB, 16 osób	TTS = 0		<i>Johnson 1980</i>
8 i 24 h, 63; 125 i 250 Hz, 84 i 90 dB	TTS 7 ÷ 15 dB dla 24-godzinnej ekspozycji o poziomie 84 dB TTS 13 ÷ 18 dB dla 8-godzinnej ekspozycji o poziomie 90 dB	powrót do 48 h	<i>Mills i in. 1983</i> (cyt. za <i>Berglund 1996)</i>

Nawet w przypadku marynarzy z niemieckich okrętów podwodnych badanych przez *Tonndorfa* (cyt. za *Johnson 1980*) po długotrwałej ekspozycji, TTS zanikał najpóźniej po kilku godzinach od zaprzestania ekspozycji. Przesunięcie progu słuchu pojawiało się w paśmie powyżej 1000 Hz. Według *Johnsona* (1980), jeśli ekspozycja na infradźwięki nie przekracza poziomu 150 dB, a czas trwania jest krótszy niż 30 min lub gdy poziom hałasu nie przekracza 118 dB, a czas ekspozycji 24 h w badaniach (w przypadku marynarzy *Tonndorfa*), to ekspozycja taka nie niesie zagrożenia dla narządu słuchu. Według zwolenników teorii, że TTS może być predyktorem trwałych ubytków słuchu, trudno jednak wspomniane wyniki badań uznać za przydatne do oceny ryzyka trwałych ubytków słuchu wywołanych ekspozycją na hałas infradźwiękowy i niskoczęstotliwościowy, z uwagi na nieakceptowane obecnie takie zasady warsztatowe, jak np. zbyt małą (nawet z jedną osobą badaną) liczebność grup.

Niewątpliwie potrzebne byłoby przeprowadzenie wszechstronnych badań w tym zakresie na licznych populacjach i z wykorzystaniem dobrej praktyki epidemiologicznej.

Ze zrozumiałych względów badania laboratoryjne skutków ekspozycji na infradźwięki były i są prowadzone powszechnie na zwierzętach. Infradźwięki o bardzo dużym natężeniu mogą doprowadzić do poważnego uszkodzenia struktur ucha. *Johnson* (1980) badając szynszyle, stwierdził, że uszkodzenie błony bębenkowej zależy od czasu i częstotliwości, na jaką zwierzęta były ekspozycjonowane i następuje po ekspozycji na infradźwięki o poziomie 172 dB: po 60 min dla częstotliwości 1 Hz, 15 min dla częstotliwości 4 Hz i 7,5 min dla częstotliwości 8 Hz. Błona bębenkowa nie ulegała uszkodzeniu, gdy poziom infradźwięków wynosił 160 dB, ale w zakresie natężeń 150 ÷ 170 dB i 25-minutowej ekspozycji ciągłej i przerywanej na infradźwięki. *Lim i in.* (1982) oraz *Johnson* (1980), oprócz uszkodzenia błony bębenkowej, stwierdzili także: uszkodzenia

komórek rzęsatych, przerwanie błony Reissnera, wybroczyny w uchu środkowym, krew w przewodzie ślimaka, wodniaka śródchłonki oraz uszkodzenie ściany woreczka. Patologie woreczka i perforacje błony bębenkowej stwierdzano tylko u zwierząt poddanych ekspozycji ciągłej. Ekspozycja ciągła powodowała poważniejsze zmiany w porównaniu do zmian wywołanych ekspozycją przerywaną. Patologie nasilały się wraz ze wzrostem natężenia, na jakie zwierzęta były ekspozycjonowane, ale odsetek stwierdzanych zmian patologicznych malał wraz ze wzrostem częstotliwości. Podobny kierunek zmian uzyskał *Nekhoroshev* (1986) w badaniach na szczurach, gdy zwiększono czas ekspozycji (do 3 h w ciągu dnia), a ekspozycja z jednorazowej przeszła w ekspozycję wielokrotną (40 dni), wówczas *Nekhoroshev* stwierdził zmiany w hemodynamice labiryntu prowadzące do uszkodzenia słuchu szczurów już przy poziomach 110 dB dla 4 Hz i zmiany były większe w porównaniu do ekspozycji na hałas o częstotliwościach 31,5 Hz oraz 53 Hz. Psy i koty są mniej wrażliwe na infradźwięki (*Lim i in.* 1982). O ile wyniki badania na zwierzętach pozwoliły na wyznaczenie ekstremalnych parametrów infradźwięków prowadzących do uszkodzenia struktur ucha w wyniku ekspozycji ostrej, to brak jest badań, oprócz pracy *Bohna i Hardinga* z 2000 r., które pozwoliłyby ocenić ryzyko dla narządu słuchu po ekspozycji przewlekłej, takiej jaka jest typowa dla ekspozycji zawodowej i środowiskowej (cyt. za *Leventhall* 2003). Ze wspomnianej pracy wynika, że dochodzi do uszkodzeń słuchu szynszyli po od 2-dniowej do 432-dniowej ekspozycji na infradźwięki o częstotliwości 0,5 Hz i poziomie 95 dB, a uszkodzenia te zaczynają się u szczytu ślimaka w przeciwieństwie do uszkodzeń wywołanych ekspozycją na hałas o paśmie częstotliwości 4 kHz, które rozpoczynają się w zewnętrznym rzędzie komórek rzęsatych, przy czym ani komórki rzęsate wewnętrzne, ani komórki podporowe, ani włókna nerwowe nie doznają uszkodzeń. Jednak wraz z wydłużeniem czasu ekspozycji, uszkodzenie słuchu rozszerzało się i nie różniło od zmian wywołanych hałasem wysokoczęstotliwościowym.

Z przedstawionego przeglądu wynika, że badano głównie wpływ krótkotrwałe działających infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego o ekstremalnych poziomach, natomiast praktycznie brak jest prac badających wpływ długotrwałej ekspozycji na hałas infradźwiękowy i niskoczęstotliwościowy na narząd słuchu o poziomach typowych dla ekspozycji zawodowej czy środowiskowej. Przeprowadzone dotychczas prace pozwoliły na ustalenie progów pułapowych dla tego typu hałasu chroniących słuch przed ostrym urazem, natomiast nie odpowiedziały na pytanie, czy zmiany słuchu po długotrwałej ekspozycji na hałas o niższych poziomach przebiegają inaczej niż dla hałasu słyszalnego, a także, czy będą wymagały ustanowienia innych wartości NDN do ochrony słuchu dla tego zakresu niż te ustanowione dla hałasu słyszalnego. Na obecnym etapie badań wiadomo, że TTS nie jest precyzyjnym predyktorem trwałych ubytków słuchu, ale trwałe ubytki słuchu rozwijają się po takich ekspozycjach, po których powstają czasowe ubytki słuchu, a jak widać z powyższego przeglądu infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy indukują czasowe zmiany słuchu. Niewątpliwie wyjaśnienie wpływu na narząd słuchu długotrwałej ekspozycji na hałas infradźwiękowy i niskoczęstotliwościowy o poziomach typowych dla ekspozycji zawodowej czy środowiskowej będzie wymagało wszechstronnych badań na modelach zwierzęcych oraz wyjaśnienia, czy u osób, które podlegają długotrwałe ekspozycji na taki hałas, zmiany stanu słuchu przebiegają inaczej niż u osób ekspozycjonowanych na hałas bez komponenty infradźwiękowej.

Opublikowano jedną pracę o trwałych ubytkach słuchu u osób obsługujących kompresory, ekspozycjonowanych na hałas infradźwiękowy (o poziomach 91 ÷ 119 dB), ale współwystępujący z hałasem słyszalnym (o poziomach 84 ÷ 97 dB). U osób tych

stwierdzono rozleglejsze i większe ubytki słuchu w porównaniu do osób eksponowanych tylko na hałas słyszalny (*Doroshenko* i in. cyt. za *Schust* 2004), co wskazywałoby na synergistyczne działanie tych dwóch rodzajów hałasu. Brak jest natomiast prac o trwałych ubytkach słuchu wywołanych jedynie przez hałas infradźwiękowy o poziomach nieekstremalnych.

Wpływ infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na narząd równowagi

Pod wpływem ekspozycji na infradźwięki mogą pojawić się zaburzenia ze strony narządu równowagi objawiające się: zawrotami głowy (*vertigo*), oczopląsem (*nystagmus*), zaburzeniami stabilności położenia ciała oraz zmianami w uchu wewnętrznym. Badania narządu równowagi przeprowadzano za pomocą testu, tzw. *railway testu* (badany stał na wąskiej szynie), badań posturograficznych oraz rejestracji oczopląsu. *Evans* i *Tempest* (1972) stwierdzili u 25 osób eksponowanych na infradźwięki ($2 \div 20$ Hz) o poziomach $110 \div 145$ dB obiektywnie oczopląs pionowy, a badani subiektywnie określali swoje odczucia jako "pływanie ciała". Zjawisko to było najsilniejsze po ekspozycji na infradźwięki o częstotliwości 7 Hz i poziomach powyżej 120 dB. Ale podobne doświadczenia wykonane przez *Johnsona* w 1975r. (cyt. za *Johnson* 1997) i *Harrisa* i in. (1976) z zastosowaniem ekspozycji na infradźwięki $1 \div 12$ Hz o poziomach $142 \div 172$ dB nie wykazało takiego wpływu. Podobne wyniki pokazał także *Tanaka* oraz *Tagikawa* i in. (cyt. za *Infrasound...* 2001). Według *Starka* i in. (1994) osoby eksponowane na infradźwięki oraz hałas niskoczęstotliwościowy (o częstotliwościach: 2; 4; 8; 16; 25; 50 i 63 Hz) o poziomie 132 dB osiągały wręcz lepsze wyniki w teście posturograficznym zarówno w trakcie ekspozycji, jak i po jej zaprzestaniu, co wskazywałoby jednak na pobudzenie reakcji, choć autorzy nie próbowali tym wynikiem nadać znaczenia klinicznego. Jednakże przy poziomach $150 \div 155$ dB infradźwięki wywoływały nudności i zawroty głowy, skutki takie pojawiały się również podczas ekspozycji na hałas słyszalny o poziomach powyżej 120 dB dla pasma $200 \div 500$ Hz, 140 dB dla 1 kHz, $145 \div 160$ dB dla 2 kHz (*Ades HW Reports* 1953; 1957 cyt. za *Altmann* 2001). Badania na zwierzętach również nie dały jednoznacznych wyników. Podczas gdy obserwowano oczopląs u świnek morskich eksponowanych na hałas infradźwiękowy o poziomach 160 dB (ale nie przy poziomach 172 dB), to oczopląsu nie wyindukowano u małp ani przy poziomach 172 dB, ani 189 dB.

Biorąc pod uwagę, że jedyne skutki, jakie udało się uzyskać w badaniach nad wpływem infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego uzyskano w przypadku wysokich poziomów natężeń, można przypuszczać, że w warunkach ekspozycji zawodowej o znacznie niższych poziomach natężeń, prawdopodobnie wrażliwość narządu równowagi na omawiany zakres częstotliwości nie będzie decydowała o wartościach NDN dla środowiska pracy, a tym bardziej środowiska komunalnego.

Pozasłuchowe skutki ekspozycji na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy

Rozszerzenie badań nad skutkami ekspozycji na infradźwięki poza wyznaczenie progu słyszenia zostały podjęte dzięki badaniom kosmicznym na początku lat 60. Otóż pojazdy kosmiczne wytwarzają bardzo wysokie poziomy hałasu (ponad 180 dB na platformie startowej) z maksimum energii w zakresie niskich częstotliwości, stwarzając nierozpo-

znane wówczas ryzyko dla zdrowia zarówno personelu naziemnego, jak i kosmonautów, mimo że już w 1953 r. *Bekesy* (cyt. za *Mohr* i in. 1965) zanotował, że ekspozycja na infradźwięki o wysokich poziomach powoduje zaburzenia równowagi. Z uwagi na to, że silniki rakietowe czy odrzutowe oprócz infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego wytwarzały także hałas w zakresie powyżej 100 Hz, badanie osób zawodowo eksponowanych przy lotach kosmicznych nie pozwalało na ocenę skutków wywołanych infradźwiękami. Rozpoczęcie badań nad skutkami ekspozycji na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy wymagało przede wszystkim skonstruowania odpowiednich narzędzi, jakim były: komora The Dynamic Pressure Chamber, AMRL High Intensity Sound System i stanowisko NASA/Low Frequency Noise Facility, o ekspozycji na hałas ograniczonej do pożądanego zakresu częstotliwości i pożądanym natężeń. Badania rozpoczęto w 1963 r. w Aerospace Research Laboratories. Podobne badania były prowadzone w Związku Radzieckim (*Mohr* i in. 1965; *Stepanow* 2001). Pierwsze badania przeprowadzono na 5 osobach (4 mężczyznach i 1 kobiecie w wieku 24 ÷ 46 lat). Obejmowały one obiektywne badanie ekg. i subiektywną ocenę tolerancji hałasu, ostrość widzenia, orientację przestrzenną, zręczność palców, zrozumiałość mowy oraz ocenę reakcji stresowej, np.: subiektywne pojawienie się bólu, wibracje ciała, zmiany w oddechu, zawroty głowy, nudności, niepokój i zmęczenie. Część badań była przeprowadzona bez ochronników słuchu, a część w podwójnych ochronnikach słuchu (wkładki + nauszники przeciwhałasowe). Mimo stosowania wysokich poziomów natężeń (131 ÷ 153 dB) dla częstotliwości z zakresu 3 ÷ 100 Hz i ekspozycji trwającej od 1 min do 1 h nie stwierdzono, w przypadku ekspozycji na bardzo niskie częstotliwości 3 ÷ 23 Hz, podniesienia progu słyszenia, nawet wówczas, gdy badani nie stosowali ochronników słuchu. Ekspozycja wywołała przede wszystkim zmiany pozasłuchowe. Przy bardzo niskich częstotliwościach badani zgłaszali: wibracje ścian klatki piersiowej, zaburzenie rytmu oddychania, odczucie zatykania ust, ból głowy, kaszel, zaburzenia widzenia oraz zmęczenie, nawet gdy eksponowano ich na hałas o najwyższych poziomach natężeń, ale jednak nieprzekraczając możliwości tolerancji hałasu (*Mohr* i in. 1965).

Wibracje ciała wywołane ekspozycją na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy

W przypadku wibracji wnikałej do organizmu, ciało zachowuje się jak układ połączonych ze sobą sprężysto-tłumiennie wielu mas o określonej częstotliwości rezonansowej dla danego narządu czy części ciała. Działanie rezonansowe polegające na wprawieniu struktur organizmu w drgania jest możliwe, ponieważ wiele z tych struktur ma charakterystyczne częstotliwości drgań własnych w zakresie małych częstotliwości, przy czym za strukturę mogącą podlegać wibracji przyjęto cząstki białka i innych związków organicznych.

W przypadku wibracji o częstotliwościach mniejszych niż 2 Hz ciało reaguje jak całość, natomiast w przypadku wyższych częstotliwości pojawiają się zjawiska rezonansowe. Częstotliwości rezonansowe poszczególnych części ciała wywoływane ekspozycją na wibracje dla większości narządów są mniejsze od 20 Hz, a jedynie dla głowy (30 Hz), gałki ocznej (60 ÷ 90 Hz) i dłoni (30 ÷ 50 Hz) przekraczają te wartości. Głos podlega modulacji przy częstotliwości 10 ÷ 20 Hz, a ostrość widzenia zamazuje się przy częstotliwości 15 ÷ 60 Hz. Oczekiwano więc, że infradźwięki i dźwięki o częstotliwości poniżej 100 Hz przy dostatecznie dużym natężeniu mogą powodować rezonans narządów. Wprawdzie z powodu niedopasowania impedancji praktycznie cała energia infra-

dźwięków jest odbijana, niemniej w tych częściach ciała, gdzie tkanka jest bardziej podatna, gdyż jest upowietrzona, jak np. w uchu czy płucach dochodzi do ściskania tkanek zawierających powietrze. W uchu czy w płucach powietrze może podlegać zmianom ciśnienia powodowanym przez infradźwięki, przy czym do ściskania ścian klatki piersiowej dochodzi z obu jej stron, gdyż zmiany ciśnienia powietrza dostają się jednocześnie do wnętrza płuc przez usta i drogi oddechowe, przeciwdziałając ciśnieniu od zewnętrznej strony ściany klatki piersiowej i usztywniając te ściany. Wiele osób spośród eksponowanych na infradźwięki o dużym natężeniu sygnalizuje odczucie wibracji struktur ciała. Zjawisko to pojawiło się w badaniach *Mohra* dla dźwięków o częstotliwościach $40 \div 60$ Hz i poziomach $140 \div 150$ dB (*Mohr* i in. 1965). Wibracje były odczuwane w klatce piersiowej i w obrębie brzucha. Badania *Johnsona* (1982), *Mohra* i in. (1965), *Evensa* i *Tempesta* (1972) oraz *Takahashi* i in. (1999) wykazały, że aby wywołać odczucie wibrowania ciała, natężenie infradźwięków musi przekraczać 130 dB i jest zależne od współczynnika masy ciała. W późniejszych badaniach *Takahashi* (2005; 2007) uzyskał takie zjawisko przy ekspozycji na infradźwięki w zakresie $20 \div 50$ Hz, nawet już przy poziomach 100 dB. W jego badaniach poziom wibracji rósł wraz z natężeniem infradźwięków, a wrażenie wibrowania było źródłem odczuwania przez osoby poddane eksperymentowi jako nieprzyjemne lub uciążliwe (*Takahashi* 2005; 2007). Z innych badań wynikało, że infradźwięki o niższym zakresie częstotliwości $4 \div 20$ Hz wywołują wibracje ciała przy poziomach: $125 \div 132$ dB, a dalszemu wzrostowi natężenia (do 150 dB) towarzyszą: bóle głowy, objawy zmęczenia, uczucie łaskotania i duszenia w gardle prowokujące kaszel oraz modulacje amplitudowe głosu. Poziomy *Johnson* określił jako dobrowolną granicę tolerancji wspomnianych skutków ekspozycji (*Johnson* 1980; *Tempest* 1976). W tabeli 6. przedstawiono podsumowanie wyników badań publikacji na podstawie pracy *Tempesta* (1976).

Tabela 6.

Skutki ekspozycji na infradźwięki o poziomach powyżej 130 dB (*Tempest* 1976)

Eksponowana część ciała	Częstotliwość, Hz	Skutek
Całe ciało	poniżej 2	ruch całego ciała
Wszystkie narządy	4	uczucie wibrowania wszystkich narządów jamy brzusznej, płuc i ścian klatki piersiowej
Całe ciało	5	główny rezonans, największy dyskomfort
Narządy	7	zniszczenie struktury narządów
Głowa	4	Rezonans
Głowa	$2 \div 20$	rezonans powodujący dyskomfort
Gardło	$10 \div 20$	głos może drżeć
Oczy	$15 \div 60$	zamazanie ostrości widzenia
Gałka oczna	$1 \div 100$, głównie powyżej 8 silnie $20 \div 70$	trudności w widzeniu
Płuca	$40 \div 60$	ciśnienie wewnętrzne przeciwdziała ruchowi klatki piersiowej i jamy brzusznej

Przy bardzo wysokich poziomach infradźwięków pojawiało się zjawisko modulacji mowy związanej z pulsacją przepływu powietrza w gardle wywołaną przez infradźwięki.

Fizjologiczne skutki ekspozycji na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy

Skutki fizjologiczne działania infradźwięków zależą od ich poziomu. Dominującym skutkiem wpływu infradźwięków na organizm w ekspozycji zawodowej i pozazawodowej jest ich działanie uciążliwe, występujące już przy niewielkich przekroczeniach progu słyszenia. Zmiany psychologiczne i fizjologiczne stwierdzano tylko u osób słyszących, co wskazywałoby, że zmiany fizjologiczne czy psychologiczne są ściśle związane z percepcją infradźwięków. Według *Landström* i *Byströma* (1984) ekspozycja na infradźwięki o częstotliwościach 6 i 16 Hz, o poziomach 10 dB powyżej progu słyszenia powodowała znużenie i zaburzenia w stanie czuwania, stwierdzane w zapisach eeg. (zmiany w zakresie fal alfa pojawienie się fal teta), przy braku takich reakcji u osób niesłyszących (*Landström* i in. 1983). Według autorów stwierdzane zmiany są skutkiem zakłócenia aktywności układu nerwowego, w szczególności tworzenia siatkowatego. Podobne wyniki uzyskali inni badacze (*Yamazaki, Tokita* 1984; *Okai* i in. 1983; *Damijan; Wiciak* 2005). Zmiany w zapisie eeg. są charakterystyczne dla stanów subiektywnie określonych stanami nadmiernego zmęczenia, depresji, stresu i senności. Według wyników *Szelenbergera* (1982) zmiany w zapisie eeg. zanikały po ustaniu ekspozycji. Wciąż jednak brak jest pogłębionych badań, które pozwoliłyby określić znaczenie kliniczne tych zmian.

Krzywe jednakowej względnej uciążliwości tonów z zakresu częstotliwości 4 ÷ 31,5 Hz charakteryzują się silnym zwężaniem zakresu dynamicznego w zakresie niskich częstotliwości – niewielki wzrost poziomu ciśnienia akustycznego powoduje znaczny wzrost uciążliwości. Przy poziomach wyższych od progów słyszenia wymienione wcześniej objawy nasilają się i mogą stać się nie do zniesienia w przypadku ekspozycji długotrwałej. *Qibai* i *Shi* (2004) uważają, że jest to skutkiem wprowadzenia w drgania narządów wewnętrznych i (lub) gałek ocznych. Objawy te ustępują, gdy źródło infradźwięków jest usunięte, lecz wrażenia nieprzyjemne mogą trwać jeszcze jakiś czas. (*Moller* 1987; *Landström* 1987; *Leventall* 2003) [http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/Chem_Background/ExSumPdf/Infrasound.pdf, 2001].

Obiektywnym potwierdzeniem uciążliwości infradźwięków są zmiany w ośrodkowym układzie nerwowym, charakterystyczne dla obniżenia stanu czuwania (co jest szczególnie niebezpieczne np. u operatorów maszyn i kierowców pojazdów). Na podstawie wyników badań wykazano, że omówione symptomy mają charakter przejściowy i ustępują po usunięciu źródła infradźwięków. Indywidualna wrażliwość na ekspozycję infradźwiękową jest bardzo zróżnicowana, wrażenia przeszkadzania lub dyskomfortu mogą pojawić się u osób szczególnie wrażliwych, nawet przy poziomach niższych od progów słyszenia (*Adams* i in. 2008). Niektórzy autorzy wykazali, że może pojawić się efekt maskowania polegający na tym, że symptomy wywołane infradźwiękami o niskim poziomie nie występują, kiedy osoba badana znajduje się w hałasie słyszalnym o wyższym poziomie (*Landström* 1987). Podobnie w przypadku działania hałasu w zakresie słyszalnym, pod wpływem ekspozycji na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy mogą pojawić się zaburzenia funkcji takich układów, jak układ: krążenia, oddechowy, pokarmowy i hormonalny. Mogą pojawić się zmiany ciśnienia tętniczego krwi oraz zaburzenia aktywności serca, czynności oddechowej i produkcji niektórych hormonów. W zakresie układu krążenia wyniki nie są jednoznaczne. Na podstawie wyników badań

20 wolontariuszy eksponowanych na infradźwięki o częstotliwościach: 6; 12 i 16 Hz oraz poziomach: 95; 110 i 125 dB wykazano wzrost ciśnienia skurczowego i zmniejszenie ciśnienia rozkurczowego przy braku zmian częstości tętna. Największy wzrost ciśnienia zaobserwowano dla ekspozycji o częstotliwości 16 Hz. Objawy działania infradźwięków występujące w postaci zmiany funkcjonowania wymienionych układów stwierdzono już wówczas, gdy poziom ciśnienia akustycznego wynosił 90 dB. Objawy nasilały się wraz ze wzrostem poziomu ciśnienia akustycznego i ustępowały po zaprzestaniu ekspozycji (*Danielsson, Landström* 1985). Natomiast w przypadku infradźwięków o częstotliwościach 2 i 14 Hz i poziomie 110 dB oraz o częstotliwości 4,1 Hz i poziomie 120 dB *Qibai* i *Shi* stwierdzili wzrost zarówno ciśnienia skurczowego, jak i rozkurczowego oraz wzrost tętna (*Qibai, Shi* 2004). Ale ani w badaniach *Mollera* (1987), ani w badaniach *Okamoto* i in. (1986) nie uzyskano zmian w układzie krążenia czy to w postaci zmian ciśnienia krwi, zmian w zapisie ekg., czy tętna po ekspozycji na infradźwięki o poziomach 20 dB powyżej progu słyszenia i częstotliwościach 10 i 15 Hz. *Yamada* i in. (1983) stwierdzili zmiany w układzie krążenia u osób (nad)wrażliwych na hałas niskoczęstotliwościowy, podczas gdy u pozostałych osób zmian nie stwierdzono. W badaniach *Landström* i *Byström* (1984) nie stwierdzono zmian w układzie krążenia po ekspozycji na infradźwięki o poziomach poniżej progu słyszenia. Należy dodać, że wyniki metaanalizy badań poświęconych wpływowi ekspozycji na hałas słyszalny, stan układu krążenia, ciśnienie krwi i zawały serca wskazały, że hałas jest czynnikiem ryzyka chorób układu sercowo-naczyniowego, tak że nie wydaje się, by zmiany w tym układzie były specyficzne częstotliwościowo (*van Kempen* i in. 2002 ; *Rosenlund* i in. 2001; *Davis* 2005).

Wpływ na układ wydzielniczy (wydzielanie katecholamin i kortyzolu) był stwierdzany po ekspozycji na hałas zarówno w porze dziennej, jak i w nocy podczas snu (*Babish* 2004; *Bigert* i in. 2005; *Maschke* i in. 2000) i był także stwierdzany po ekspozycji na infradźwięki, ale nie ma prac sugerujących, że zmiany te są zależne od częstotliwości (*Berglung* i in. 1996; *Persson Waye* i in. 2002; 2003 i 2004). Po ekspozycjach na oba typy hałasu stwierdzano również pogorszenie jakości snu, a także obniżenie sprawności wykonywania zadań, w szczególności u osób wrażliwych na hałas.

Ciekawe badania przeprowadzili *Mahendra* i in. (2008) nad zależnością reakcji fizycznych, fizjologicznych i psychologicznych od składowych częstotliwościowych hałasu i stwierdzili, że wybudzenia ze snu, bóle w karku, chroniczne zmęczenie czy odczucie ciśnienia w gałkach ocznych u robotników eksponowanych na hałas są związane z komponentami niskoczęstotliwościowymi i średniczęstotliwościowymi. Należy jednakże podkreślić, że badanie było wykonane jedynie na grupie 93-osobowej na podstawie kwestionariusza z pytaniami zarówno otwartymi, jak i z pytaniami z wyborem objawów z przygotowanej listy, a analiza statystyczna zależności ograniczała się jedynie do testu Chi-kwadrat, co znacznie osłabia wartość tego badania.

Wykazano, na podstawie wyników innych badań, że przy wysokim poziomie ciśnienia akustycznego, lecz nieprzekraczającym 160 dB, infradźwięki i dźwięki o małej częstotliwości w zakresie 1 ÷ 100 Hz i o poziomie ciśnienia akustycznego 142 ÷ 154 dB mogą wywołać (po bardzo krótkim oddziaływaniu) u zupełnie zdrowych osób: dezorientację, silne bóle i zawroty głowy, mdłości i wymioty, zaburzenia równowagi, zaburzenia pamięci i funkcji wzroku, dzwonienie i uczucie ucisku w uszach, stany lękowe oraz depresje. Zmiany te wykorzystuje się przy stosowaniu tzw. pocisków akustycznych (*Altmann* 2001).

Zaburzenia układu oddechowego wywoływały bodźce o poziomach przekraczających 150 dB, chociaż w zależności od częstotliwości odczucie wibracji w klatce pier-

siowej powstawało już przy niższych poziomach. Najczęstszymi skutkami ekspozycji na infradźwięki są: zmęczenie, znużenie i senność. Skutki ekspozycji są bardzo zindywidualizowane. Stwierdzano je nawet przy poziomach około 55 dB.

Stwierdzone są także takie zmiany, jak np.: zmiana oporności skóry, wydłużenie czasu reakcji czy czasowe zmiany w zapisie eeg. w trakcie trwania ekspozycji (Szelenberger 1982, Damijan 2005), które prawdopodobnie są wynikiem znużenia i zmęczenia osób ekspozowanych. Ponadto wiadomo, że każdy bodziec słuchowy czy wzrokowy wywołuje odpowiedź w zapisie eeg., co jest wykorzystywane w badaniach ośrodkowego układu nerwowego przez klinicystów. Problemem jest znaczenie kliniczne zarejestrowanych zmian.

Niewątpliwie w najczęściej spotykanych ekspozycjach czy to zawodowych, czy w środowisku komunalnym największym problemem związanym z ekspozycją na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy jest ich uciążliwość i wpływ na sprawność (Mirowska 2002); Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2001; 2004; Bengtsson i in. 2004; Waye 2005; Holmberg i in. 1996).

Na podstawie wyników badań kierowców ekspozowanych na infradźwięki o częstotliwościach $2 \div 20$ Hz i poziomach 115 \div 120 dB stwierdzono wydłużenie czasu reakcji o 30 \div 40% w teście sprawności psychomotorycznej oraz uczucie senności (Borredon 1980). Podobne wyniki przy niższych poziomach przedstawił Sandberg (1983), ale towarzyszący infradźwiękom hałas słyszalny działał w tym zakresie antagonistycznie i nużące działanie infradźwięków było niwelowane.

Infradźwięki wpływają na zdolność koncentracji. Przy progu słyszenia eksperymenty wykonywane na osobach głuchych i słyszących pokazały zaburzenia koncentracji uwagi osób badanych, które były wywołane pobudzeniem ślimaka (Landström i in. 1983).

Uciążliwość hałasu niskoczęstotliwościowego jest szczególnie odczuwalna w środowisku komunalnym (Berglund i in. 1996), ale wiele stanowisk pracy wymaga wzmożonej koncentracji uwagi i szybkich reakcji, zatem informacje o negatywnym wpływie infradźwięków na te sprawności wzbudza zainteresowanie badaczy, aczkolwiek i w tym zakresie jest wiele zagadnień do wyjaśnienia. Wspomniane wcześniej wywoływanie uczucia senności i zmęczenia obniża wydajność pracy (Landström 1983; 1987; Borredon 1980). Na podstawie wyników badań wykazano także, że w warunkach ekspozycji na hałas niskoczęstotliwościowy, nawet o względnie niskich poziomach, rzędu 40 \div 50 dB (A), typowych dla biur i przemysłowych pomieszczeń sterowniczych, może dochodzić do zaburzeń procesów umysłowych, a szczególnie predysponowane do ich wystąpienia są osoby o większej wrażliwości na ten rodzaj hałasu (Persson i in. 1997; 2001; Bengtsson 2003; Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2005). Badania takich funkcji, jak: spostrzegawczość, czas reakcji i zdolność logicznego rozumowania, wykazywały w grupach ekspozowanych na hałas niskoczęstotliwościowy gorsze wyniki w porównaniu do osób ekspozowanych na inny rodzaj hałasu (Persson Waye i in. 1997; Bengtsson 2003), mimo że osoby poddane eksperymentowi nie oceniały ekspozycji jako bardziej stresującej ani też poziom kortyzolu w ślinie nie wykazywał zależności od ekspozycji. Hałas niskoczęstotliwościowy o umiarkowanych poziomach (50 dB A; 72,8 dB G) zwiększa liczbę błędów w wykonywanych zadaniach, może pogarszać także funkcje widzenia w szczególności u osób wrażliwych na hałas (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2005) w porównaniu do hałasu o wyższych częstotliwościach (50 dB A, 64,5 dB G). Na podstawie wyników badań wykazano także, że do oceny uciążliwości hałasu niskoczęstotliwościowego stosowanie charakterystyki częstotliwościowej A nie jest najwłaściwsze (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2003; Leventhall 2004; Kjellberg i in. 1997; Holmberg i in. 1996; Takahashi, Harada 2007).

Podsumowując, trzeba stwierdzić, że w pozasłuchowych skutkach ekspozycji na hałas niskoczęstotliwościowy istnieje zbyt wiele rozbieżności a badania wpływu infradźwięków na człowieka są nadal fragmentaryczne, zwłaszcza badania skutków długotrwałej ekspozycji w warunkach pozalaboratoryjnych. Należałoby określić, w jakim zakresie skutki te są zależne częstotliwościowo, gdyż w większości przypadków podobne skutki mogą także pojawić się po ekspozycji na hałas o wyższym zakresie częstotliwości. Praktycznie brak jest badań skutków zdrowotnych w populacji zawodowo ekspozowanej na hałas niskoczęstotliwościowy o umiarkowanych poziomach (niższych niż te, które były badane w celu wykorzystania w aeronautyce).

Do badania wpływu infradźwięków na organizm wykorzystywano także zwierzęta: myszy, szczury, świnki morskie, szynszyle, psy, małpy i inne ssaki. Najważniejsze wyniki dotyczyły zmian:

a) w układzie sercowo-naczyniowym:

u szczurów i świnek morskich ekspozowanych na infradźwięki o częstotliwościach $4 \div 16$ Hz i poziomach $90 \div 145$ dB 3 h dziennie przez 45 dni stwierdzano po pojedynczej ekspozycji zwężenie tętnic i naczyń wieńcowych, a po ekspozycji długotrwałej deformację jąder, uszkodzenia mitochondrialne i inne, chociaż zaobserwowano także procesy regeneracyjne zachodzące w okresie 40 dni po zaprzestaniu ekspozycji. Największe zmiany zaobserwowano po ekspozycji na infradźwięki o częstotliwościach 10 i 15 Hz oraz poziomach 135 i 145 dB (Alekseev i in. 1985). Podobnie w badaniach Gorgeladze i in. (1986) zmiany w komórkach serca, zaburzenia mikrokrążenia w komórkach endotelialnych i naczyniach wieńcowych zwiększały się wraz ze wzrostem ekspozycji na infradźwięki o częstotliwości 8 i 16 Hz oraz poziomie od 120 do 140 dB. Po zaprzestaniu ekspozycji obserwowano odwracalność tych zmian, chociaż po 40 dniach stan jeszcze nie powrócił do normy. Aktywność enzymów oksydoredukcyjnych najpierw wzrastała, a następnie znacznie się zmniejszała (Nekhorosheva i in. 1991, cyt. za Infrasound ... 2001). Zmiany uzyskano także po ekspozycji szczurów na hałas słyszalny (Lenzi i in. 2003 oraz Frenzilli i in. 2004), co wskazywałoby, że nie są one częstotliwościowo specyficzne,

b) w płucach:

Svidovyi i Glinchikov (1987, cyt. za Infrasound ... 2001) stwierdzili po ekspozycji na infradźwięki o częstotliwości 8 Hz i poziomie 120 dB podczas 3 h dziennie przez 40 dni pogrubienie pęcherzyków płucnych wraz z wypełnieniem erytrocytami gronek. Ekspozycja na hałas o częstotliwości 8 i 16 Hz o poziomach 140 dB prowadziła do częściowego zniszczenia gronek oraz przerywała ściany naczyń krwionośnych i indukowała hipertrofię komórek typu – II,

c) w wątrobie:

ekspozycja szczurów na infradźwięki o częstotliwościach od 2 do 16 Hz i poziomach $90 \div 140$ dB 3 h dziennie przez 40 dni powodowała nieodwracalne zmiany morfologiczne i histopatologiczne w hepatocytach, podczas gdy po pojedynczej ekspozycji nie stwierdzano żadnych zmian (Alekseev i in. 1987; Nekhoroshev, Glinchikov 1992, cyt. za Infrasound ... 2001),

d) w mózgu:

Nekhoroshev i Glinchikov (1992, cyt. za Infrasound... 2001) stwierdzili zmiany typu mikrourazów w mózgu szczurów i świnek morskich ekspozowanych na infradźwięki o częstotliwości 8 Hz oraz poziomie 120 i 140 dB przez 40 dni, co było wynikiem prawdopodobnie działania mechanicznego, a nie akustycznego infradźwięków. Natomiast Nishimura (Nishimura i in. 1987) stwierdził reakcję

osi przysadka mózgowa – kora nadnerczy przez wzrost stężenia kortykosteronu jako odpowiedź na stres wywołany ekspozycją.

Największe zmiany po ekspozycji na infradźwięki stwierdzano w badaniach prowadzonych na zwierzętach, ale do wyników tych badań należy podchodzić z dużą ostrożnością, gdyż nie wydaje się by zwierzęta niezależnie od gatunku były wystarczająco dobrym materiałem na model reakcji pozasłuchowych człowieka. Stres powodowany ekspozycją na silne bodźce akustyczne wywołuje u zwierząt przede wszystkim strach o rozmiarach paniki, co potwierdzają reakcje zwierząt eksponowanych na głośne koncerty czy inne głośne zdarzenia. Człowiek ma wiedzę i jego reakcje są przez tę wiedzę tłumione w przeciwieństwie do reakcji świata zwierzęcego.

W doświadczeniach ze zwierzętami stosuje się poza tym skrajnie wysokie poziomy dźwięku, które w przypadku człowieka dotyczą sytuacji lotów kosmicznych czy warunków ekspozycji militarnych i poza tymi sytuacjami takie ekspozycje nie są spotykane ani w środowisku komunalnym, ani w środowisku zawodowym. Być może dotyczy to personelu zawodowo związanego z lotnictwem, co będzie wszechstronnie omawiane w części poświęconej, tzw. chorobie wibroakustycznej (*Castelo Branco i Alves-Pereira 1999*). Nie bez znaczenia może być też fakt, że zakres słyszalności zwierząt jest inny niż człowieka i tak dla szczurów dolna granica jest określana na poziomie 200 Hz, a górna 76 000 Hz, dla myszy zakres wynosi: 1000 ÷ 91 000 Hz, a dla psów 67 ÷ 45 000 Hz (*Buxton 2006*).

Obszerny przegląd wyników badań nad pozasłuchowymi skutkami u zwierząt ekspozycji na infradźwięki przedstawiono na stronie: [http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/Chem_Background/ExSumPdf/Infrasound.pdf].

Choroba wibroakustyczna

Obecnie w piśmiennictwie, pochodzącym głównie ze środowiska pozamedycznego, coraz powszechniej pisze się o skutkach narażenia na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy (o poziomach powyżej 90 ÷ 110 dB i częstotliwościach z zakresu poniżej 500 Hz) w postaci tzw. choroby wibroakustycznej (VAD, *vibroacoustic disease*). Pojęcie to, wykazując się dużą odwagą, wprowadził do literatury zespół portugalskich badaczy pod kierownictwem *Nuno Castelo Branco i Mariany Alves-Pereira (1999)*, gdy w wyniku wieloletnich badań zaobserwowali wśród personelu technicznego lotniczych zakładów produkcyjno-naprawczych Portugalskich Sił Powietrznych (Oficinas Gerais de Material Aeronautico, OGMA) znacznie częstsze w stosunku do (portugalskiej) populacji generalnej występowanie padaczki (u 10% personel OGMA, vs. 0,2% populacja generalna).

Według autorów VAD jest chorobą całego organizmu wywołaną ekspozycją na hałas niskoczęstotliwościowy do 500 Hz, polegającą na nadmiernym rozroście substancji międzykomórkowej (*extracellular matrices*), co przejawia się zgrubieniem struktur sercowo-naczyniowych oraz zwłóknień w płucach. Zwłóknienia te udało się autorom wywołać także ekspozycją na hałas niskoczęstotliwościowy u gryzoni. Początkowo zmiany typu VAD autorzy zaobserwowali wśród techników personelu lotniczego, potem kolejno wśród pilotów wojskowych i cywilnych, a w końcu wśród osób cywilnych eksponowanych na hałas niskoczęstotliwościowy w środowisku. W 2004 r. autorzy rozpoznali chorobę wibroakustyczną nawet u 10-letniego dziecka mieszkającego w pobliżu zakładu przemysłowego (*Alves-Pereira i in. 2004a*).

Według *Alves-Pereira i Castelo Branco* rozwój choroby jest związany z czasem ekspozycji, a nie parametrami hałasu. Autorzy prowadząc badania, zdefiniowali chorobę wibroakustyczną i jej poszczególne etapy: etap I – łagodny (występujący po roku do 4 lat pracy w narażeniu na hałas niskoczęstotliwościowy), etap II – umiarkowany (od 4

do 10 lat) i etap III – ostry (powyżej 10 lat). Typowe objawy dla poszczególnych stadiów choroby według zespołu *Castello Branco* podano w tabeli 7. na podstawie wyników badań 140 pracowników technicznych wybranych spośród 306 początkowo badanych. Zastosowano następujące kryteria wykluczające:

- infekcje wywołane paciorkowcami
- cukrzyca
- rozpoznanie wcześniej chorób sercowo-naczyniowych
- nałogowe palenie (palących więcej niż 20 papierosów dziennie)
- nadużywanie alkoholu (spożywanie dziennie więcej niż litr wina zawierającego $10 \div 12\%$ alkoholu)
- uzależnienie od leków, a w szczególności od leków psychotropowych.

Tabela 7.

Stadia i typowe objawy choroby wibroakustycznej [<http://www.noisefree.org/monitor.pdf>, wersja z września 2008]

Stadium choroby wibroakustycznej	Czas pracy w narażeniu na hałas	Objawy
I etap (łagodny)	od 1 do 4 lat	nieznaczne wahania nastroju niestrawność i zgaga infekcje gardła i jamy ustnej zapalenie oskrzeli
II etap (łagodny)	od 4 do 10 lat	bóle w klatce piersiowej wyraźne wahania nastroju bóle pleców zmęczenie grzybicze, wirusowe i pasożytnicze infekcje skóry zapalenie śluzówki żołądka krwawienie z dróg moczowych zapalenie spojówek alergie
III etap (ostry)	powyżej 10 lat	zaburzenia psychiczne krwotoki żylaki kończyn górnych i hemoroidy wrzody dwunastnicy spastyczne zapalenie okrężnicy pogorszenie ostrości widzenia bóle głowy intensywne bóle mięśni zaburzenia neurologiczne

Objaw choroby wibroakustycznej był uznawany za charakterystyczny dla danego stadium choroby, gdy stwierdzono jego występowanie u co najmniej 50% badanych osób (*Castello Branco* 1999), tzn. przykładowo po od roku do czterech 4 latach ekspozycji zawodowej przynajmniej u 70 osób, spośród rozpatrywanych 140, rozwinęło się zapalenie oskrzeli, a po 10 latach występowały wrzody dwunastnicy, żylaki lub hemoroidy. Większość pacjentów skarżyła się jednocześnie na więcej niż jedną z wymienio-

nych wcześniej dolegliwości (*Castelo Branco* 1999; *Castelo Branco, Alves-Pereira* 2004b).

Alves-Pereira i *Castelo Branco* (2007) uważają, że podejrzenie choroby wibroakustycznej może mieć miejsce, wtedy gdy pacjent zgłasza jedną lub więcej wymienionych niżej dolegliwości lub skarg:

– „słyszę za dużo, jestem bardzo wrażliwy na hałas, nie mogę znieść żadnego typu hałasu, hałas doprowadza mnie do szału, kiedykolwiek występuje głośny hałas, to tak się czuję, jakby wszystko wokół krzyczało”

– „budzę się zmęczony(-a), ale nie dlatego, że spałem(-am) za krótko, lecz wydaje mi się, że nie odpoczywałem/odpoczywałam w czasie snu”

– „czasami, gdy jestem w dużym centrum handlowym lub restauracji, to się czuję tak, jakbym nie mógł oddychać i muszę wydostać się (wyjść) stamtąd”

– „mam często palpacje serca, czasami czuję, że moje serce chce mi wyskoczyć z klatki piersiowej”

– „mam kaszel, ale nie palę, moje gardło jest ciągle podrażnione i mam chrype bez powodu, a leki bez recepty nie pomagają”

albo, gdy pacjent przychodzi ze zdiagnozowaną:

– padaczką

– zaburzeniami równowagi

– migreną

– nowotworem układu oddechowego, zwłaszcza wtedy, gdy nie pali papierosów

– chorobą autoimmunologiczną, a w szczególności z toczeniem rumieniowatym układowym i bielactwem nabytym,

lub ze skierowaniem na operację wszczepienia by-passów (*Pawlaczyk-Łuszyńska* 2008).

U osób ekspozowanych na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy (0 ÷ 500 Hz) stwierdzano zmiany strukturalne występujące głównie w naczyniach krwionośnych, strukturach serca, tchawicy, płucach i nerkach. Zmiany te obserwowano zarówno u pacjentów, jak i u zwierząt doświadczalnych (*Alves-Pereira, Castelo Branco* (2007).

U ludzi nadmierna produkcja kolagenu, bez towarzyszących stanów zapalnych, była widoczna we krwi i ściankach naczyń limfatycznych tchawicy oraz w płucach i opłucnej, a u zwierząt ekspozowanych na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy zmiany tego typu obserwowano w: układzie oddechowym, nerkach, krwi i naczyniach limfatycznych (*Alves Pereira, Castelo Branco* 2007).

W swoich badaniach grupa *Alves-Pereira* i *Castelo Branco* nie uwzględniła ekspozycji zawodowej personelu portów lotniczych na inne czynniki środowiska pracy, często genotoksyczne, jak i o silnych właściwościach wywoływania stresu oksydacyjnego (*Cavallo* i in. 2006).

W 2007 r. *Alves-Pereira* i *Castelo Branco* dokonali przeglądu doniesień dotyczących choroby wibroakustycznej w *Biophysics and Molecular Biology*. Na 109 pozycji piśmiennictwa (oprócz 4 pozycji poświęconych problemowi zmian pozasłuchowych wywołanych przez hałas i kilkoma pozycjami dotyczącymi ogólnych problemów, jak np. testów do badania funkcji płuc czy też podręczników medycznych) wszystkie dotyczące VAD były autorstwa grupy *Alves-Pereira* i *Castelo Branco*. Pomimo ponad 25 lat funkcjonowania pojęcia „choroby wibroakustycznej” nie ma w piśmiennictwie doniesień z innego ośrodka badawczego z podobnymi wynikami badań na populacji ludzi, co z punktu widzenia zasad badań medycyny opartej na faktach (*evidence based medicine*,

EBM) znacznie obniża wartość dorobku autorów. Na korzyść grupy *Alves-Pereira* i *Castelo-Branco* przemawiają wprawdzie nieliczne wyniki badań głównie badaczy rosyjskich, należy jednakże zaznaczyć, że badania na zwierzętach dotyczą głównie ekstremalnych parametrów ekspozycji.

Do oceny hałasu badacze ci stosowali inną charakterystykę częstotliwościową A, która skutecznie „obcina” niskie częstotliwości. Wadą doniesień grupy *Alves-Pereira*, *Castelo Branco* jest pobieżna jedynie ocena ekspozycji na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy (mówi się często o długotrwałej ekspozycji bez podawania informacji o poziomach), a także brak grupy kontrolnej, w przypadku badań medycznych. Autorzy nie badali całego widma hałasu, a jak widać w przytoczonych powyżej nielicznych publikacjach, podobne zmiany u zwierząt uzyskiwano po ekspozycji na hałas o wyższych częstotliwościach. W zasadzie brak jest w piśmiennictwie badań, które wskazywałyby na specyficzność częstotliwościową (ograniczoną do zakresu częstotliwości niskich) zmian zdrowotnych wywołanych ekspozycją na infradźwięki, z wyjątkiem możliwości zjawiska rezonansu w tym zakresie częstotliwości. Autorom nie udało się określić zależności dawka-skutek, chociaż podjęli taką próbę w odniesieniu do szczurów eksponowanych na hałas niskoczęstotliwościowy (*Alves-Pereira, Castelo Branco 2007*).

Analizując objawy charakterystyczne dla poszczególnych stadiów choroby wibroakustycznej, *Alves-Pereira, Castelo Branco* nie uwzględnili grupy kontrolnej. Zdaniem *Castelo Branco* i *Alves-Pereira* „wszechobecność” hałasu niskoczęstotliwościowego stanowi istotne utrudnienie w dobraniu odpowiedniej populacji referencyjnej. Autorzy ponadto stwierdzili tylko zależność między wymienionymi wyżej zmianami a czasem ekspozycji, natomiast nie udało im się znaleźć zależności od parametrów hałasu (*Castelo Branco, Alves-Pereira 2004b*).

W internecie można znaleźć kwestionariusz zatytułowany „Survey for assessing the risk of vibroacoustic disease” [<http://www.scribd.com/doc/430696/Survey-Low-Frequency-Noise-Aviation-Workers>]. To, co jest zdumiewające w tym kwestionariuszu, to brak pytań o inne niż hałas czynniki ryzyka. Część ankiety jest poświęcona bardzo szczegółowym pytaniom dotyczącym ekspozycji na hałas od dzieciństwa, poprzez historię ekspozycji na hałas miejsca zamieszkania i historię ekspozycji na hałas w miejscu pracy. Pozostałe pytania dotyczą już tylko szczegółowej historii zdrowotnej różnych aspektów choroby, zażywanych bieżąco leków, wybranych aspektów historii zdrowotnej rodziców, w tym także to, co jest najbardziej kuriozalne, również historie zdrowotne przybranych rodziców(!). Na końcu kwestionariusza znajdują się pytania o nałogi. Brak jest jakichkolwiek pytań o inne czynniki ryzyka mogące się bądź to przyczyniać, bądź to być powodem określonych stanów zdrowotnych. Ankieta nie ma podanego autorstwa, ale jeśli jest to ankieta zespołu *Alves-Pereira* i *Castelo Branco*, co jest bardzo prawdopodobne, to nie może dziwić, że prezentowane wcześniej w tabeli symptomy korelują z ekspozycją na hałas, jako że hałas jest wszechobecny zarówno w miejscu zamieszkania, jak i miejscu pracy, a liczba i jakość różnorodnych objawów zdrowotnych zawsze narasta z wiekiem (czyli czasem pracy).

Wyniki dotychczasowych badań dotyczących VAD nie dają więc podstawy do sformułowania bezkrytycznego przyjęcia hipotezy o szkodliwym wpływie wyłącznie infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na organizm człowieka, a raczej wskazują na potrzebę przeprowadzenia wszechstronnych wielośrodkowych badań, zwłaszcza wobec licznych prac dotyczących wpływu hałasu na zmiany pozasłuchowe (WHO-EHC 12 Noise 1980; *Berglund, Lindrall 1999; Babisch 2004; Griefahn 2000*).

Badania nad wpływem infradźwięków na człowieka są nadal fragmentaryczne, zwłaszcza badania skutków długotrwałej ekspozycji zawodowej czy w środowisku komunalnym.

PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH DOPUSZCZALNYCH WARTOŚCI DLA INFRA DŹWIĘKÓW I HAŁASU NISKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO W POLSCE I W INNYCH PAŃSTWACH

Obecny stan wiedzy w zakresie szkodliwego oddziaływania infradźwięków na organizm człowieka nie pozwala jeszcze ustalić jednoznacznych wartości ekspozycji zawodowej, brak jest w tym zakresie przepisów zarówno europejskich, jak i międzynarodowych, ponieważ nie ma też takich przepisów w poszczególnych państwach. W Polsce istniały przepisy prawne w tym zakresie od 1989 do 2009 r., które zostały uchylone na wniosek Grupy ds. Hałasu Zespołu Ekspertów ds. Czynników Fizycznych Międzyresortowej Komisji do spraw Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. Wiele instytucji i autorów proponuje przyjęcie w formie zaleceń wartości dopuszczalnych poziomów dla infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego, które znacznie się jednak różnią. Powodem tego jest z jednej strony przyjęcie na podstawie skąpych jednak wyników badań, zwłaszcza w przypadku ekspozycji zawodowej, różnych kryteriów jako podstawy do ograniczania ekspozycji, np. przyjmowano kryterium uciążliwości (w przepisach polskich z 2001 r.) bądź na podstawie wyników badania aeronautycznego poziomów ekstremalnych – kryterium niebezpieczeństwa dla zdrowia (w przepisach American Conference Governmental Industrial Hygienists, ACGIH). Zalecenia te różnią się znacznie w zakresie zalecanych do oceny: charakterystyk częstotliwościowych (Lin, G, tercje, oktawy), dopuszczalnych czasów ekspozycji, jak i zakresów częstotliwości poddawanych ocenie.

Przez wielu autorów są proponowane wartości równe poziomowi percepcji słuchowej jako kryterium oceny uciążliwości infradźwięków w środowisku pracy.

Są też stosowane ograniczenia na graniczne poziomy ciśnienia akustycznego na infradźwięki, które są przykre i mogą powodować trwałe, szkodliwe zmiany w organizmie, tj. wartości $140 \div 150$ dB. Wartości te różnią się znacznie z powodu przyjęcia różnych charakterystyk korekcyjnych, różnych zakresów częstotliwości i różnych czasów ekspozycji.

Do tej pory kryteria oceny zostały opracowane zaledwie w kilku państwach. Pierwsze kryteria oceny zawodowej ekspozycji na infradźwięki pojawiły się pod koniec lat 70. XX wieku, między innymi w Szwecji (1979) i w Związku Radzieckim (1980).

We Francji od 1992 r. wykorzystywano wyniki pracy *Pimonowa* (1972), zgodnie z którą Krajowy Instytut ds. Badań i Bezpieczeństwa (Instytut National Recherche et de Sécurité, INRS) zalecał do sklasyfikowania poziomów hałasu o częstotliwościach poniżej 20 Hz stosowanie czterech następujących stref:

- $L_p \leq 120$ dB, to poziom, przy którym ekspozycja trwająca kilkadziesiąt minut nie prowadzi na ogół do skutków szkodliwych (gdzie L_p oznacza całkowity, nieskorygowany poziom ciśnienia akustycznego, w pasmach częstotliwości poniżej 20 Hz). Przyjmuje się, że nie są znane działania psychologiczne tych poziomów ani konsekwencje ekspozycji długotrwałej
- $120 \text{ dB} < L_p \leq 140$ dB, to poziom, przy którym jest możliwe pojawienie się zaburzeń psychologicznych krótkotrwałych, lecz zmęczenie jest tolerowane przez osoby o dobrej kondycji fizycznej, nawet w przypadku ekspozycji kilkunum dniowej
- $140 \text{ dB} < L_p \leq 155$ dB, to poziom, przy którym pojawienie się zaburzeń psychologicznych jest znaczące, a zmęczenie jest tolerowane przez osoby o dobrej kondycji fizycznej, w przypadku krótkich ekspozycji (2 min)
- $L_p > 180$ lub 190 dB, to poziom śmiertelny powodujący rozerwanie pęcherzyków płucnych.

Do tej pory jednakże nie ustanowiono żadnych przepisów w tym zakresie, a w 2006 r. *Chatillon* z Krajowego Instytutu ds. Badań i Bezpieczeństwa (Instytut National Recherche et de Sécurité, INRS) zaproponował, na podstawie przeglądu bibliograficznego, uznanie ograniczenia ekspozycji zawodowej do 102 dB G w przypadku hałasu ciągłego trwającego 8 h, a w przypadku hałasu impulsowego do 145 dB Lin za maksymalnie dopuszczalny poziom ekspozycji na infradźwięki.

Tabela 8.

Wartości graniczne proponowane dla ekspozycji na infradźwięki (na podstawie *Chatillon 2006*)

Infradźwięki ustalone	
Obliczanie ekspozycji	zastosowanie charakterystyki częstościowej G sumowanie energii w pasmach 1/3-oktawowych między 1 i 100 Hz
Wartość graniczna dla 8-godzinnej ekspozycji	102 dB
Jeśli czas trwania ekspozycji jest zmniejszony o czynnik 2	podniesienie (zwiększenie) wartości granicznej o +3 dB
Infradźwięki impulsowe	
Obliczanie ekspozycji	bez korekcji
Nieskorygowana wartość graniczna ekspozycji	145 dB

W ACGIH opracowano w 1998 r. po raz pierwszy wytyczne ograniczające poziomy ekspozycji na hałas infradźwiękowy, właściwie bez ograniczeń czasowych dla ekspozycji (z wyłączeniem zdarzeń impulsowych o czasie trwania krótszym niż 2 s) 150 dB Lin, a w pasmach tercjowych w zakresie $1 \div 80$ Hz wartość pułapową jednakową dla wszystkich tercji na poziomie 145 dB. Chociaż wytyczne te wspominają o możliwości ograniczenia czasowego ekspozycji, o ile to będzie wskazane ze względu na ochronę słuchu (TLVs 2005), a także w przypadku pojawienia się wibracji ciała z powodu zjawiska rezonansowego w obrębie klatki piersiowej w paśmie $50 \div 60$ Hz z uwagi na uciążliwość i dyskomfort doznań zaleca się obniżenie poziomu do takiego aby zjawisko to ustąpiło.

Z innych zaleceń należy wspomnieć także o wytycznych Służby Bezpieczeństwa i Higieny Pracy w Nowej Zelandii (New Zealand Occupational Safety and Health Service, NZOSHS) zalecających ograniczenie całkowitego poziomu ekspozycji na hałas w paśmie $1 \div 16$ Hz do wartości 120 dB Lin dla ekspozycji 24-godzinnej. Natomiast Szwajcarska Komisja ds. Ochrony Zdrowia (Eidgenössische Koordinations-kommission für Arbeitssicherheit, EKAS) stanowi: „Zgodnie z obecnym stanem wiedzy nie ma zagrożeń infradźwiękami, kiedy skorygowany poziom ciśnienia akustycznego, obliczony dla 8-godzinnej dziennej ekspozycji nie przekracza 135 dB, a wartość maksymalna jest mniejsza od 150 dB. Zakłócenia „dobrostanu” mogą występować, kiedy średni poziom przekracza 120 dB”.

Dla nieskorygowanych poziomów ciśnienia akustycznego podają stosunkowo zbliżone zalecenia: INRS, ACGiH i NZOSHS.

Przegląd tych zaleceń i historycznych kryteriów, np. szwedzkich z 1992 r., można znaleźć w publikacji *Pawlaczyk-Luszczynska* i in. (2001).

Polska była jednym z pierwszych państw, w którym takie kryteria przyjęto. W 1985 r. opracowano pierwszą dokumentację proponowanych wartości dopuszczalnych hałasu infradźwiękowego (Biuletyn... 1986). Opracowano również polską normę PN-86/N-01338. „Hałas infradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy i ogólne wymagania wykonywania pomiarów”.

Tabela 9.

Hałas infradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy ze względu na ochronę zdrowia (wg normy PN-86/N-01338)

Częstotliwość środkowa pasm oktaowych [Hz]	Dopuszczalny poziom ciśnienia akustycznego [dB] dla $t = 8$ h	Maksymalny dopuszczalny poziom ciśnienia akustycznego [dB] dla $t = 1$ min
1	2	3
4, 8; 16	110	137
31,5	105	132

W tabeli 9. podano dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy ze względu na ochronę zdrowia, a w tabeli 10. dopuszczalne wartości zapewniające pracownikom odpowiednie warunki do realizacji ich podstawowych funkcji.

Tabela 10.

Hałas infradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy zapewniające pracownikom odpowiednie warunki do realizacji ich podstawowych funkcji (wg normy PN-86/N-01338)

Stanowisko pracy	Poziomy ciśnienia akustycznego [dB] w oktaowych pasmach o częstotliwościach środkowych [Hz], dla $t = 8$ h			
	4	8	16	31,5
W kabinach dyspozytorskich, obserwacyjnych, zdalnego sterowania, w pomieszczeniach do wykonywania prac precyzyjnych i w innych pomieszczeniach o podobnym przeznaczeniu	90	90	90	85
W pomieszczeniach: administracyjnych, biur projektowych, do prac teoretycznych, opracowania danych i innych o podobnym przeznaczeniu	85	85	85	80

W 1989 r. minister pracy i polityki socjalnej wprowadził wartości podane w normie jako wartości NDN w Polsce po raz pierwszy. Ocena była dokonywana w pasmach oktaowych w zakresie od $4 \div 31,5$ Hz (Rozporządzenie... 1994). Wycofano z rozporządzenia wartości dopuszczalne ustalone w celu zapewnienia pracownikom odpowiednich warunków do realizacji ich podstawowych funkcji, uznając te wartości za kryterium uciążliwości (określone wg normy PN-86/N-01338).

W wyniku pracy wykonanej w ramach Strategicznego Programu Rządowego przez zespół kierowany przez *Pawlaczyk-Luszczyńską* (2001) wartości NDN zweryfikowano w 2001 r., opierając je na równoważnym poziomie ciśnienia akustycznego

skorygowanym charakterystyką częstotliwościową G odniesionym do 8-godzinne go dnia pracy lub tygodnia pracy, wynoszącym 102 dB (Rozporządzenie... 2001).

Obecnie projekt nowelizacji polskiej normy PN-N-01338 (propozycja z czerwca 2008 r.) przewiduje wprowadzenie dla ogółu pracowników dopuszczalnego równoważnego dla 8 h poziomu ciśnienia akustycznego, skorygowanego charakterystyką częstotliwościową G dla hałasu infradźwiękowego w paśmie 1 ÷ 20 Hz wynoszącego 102 dB opartego na kryterium uciążliwości, a na stanowiskach do wykonywania prac koncepcyjnych wymagających szczególnej koncentracji uwagi – poziom 86 dB. Projekt nie przewiduje ograniczenia wartości maksymalnych i szczytowych poziomu ciśnienia akustycznego. Problemem ze stosowaniem tej normy będzie ustalenie, jakie to są „stanowiska do wykonywania prac koncepcyjnych wymagających szczególnej koncentracji uwagi”.

Szczególną opieką są otoczone kobiety w ciąży i młodociani. Dopuszczalne poziomy ciśnienia akustycznego dla 8-godzinnej dziennej ich ekspozycji lub tygodnia pracy (tab. 11) określono w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 10 września 1996 r. (DzU nr 69, poz. 332, zm. 2002 r., nr 127, poz.1092) i z dnia 30 lipca 2002 r. (DzU nr 127, poz. 1091).

Tabela 11.

Hałas infradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy kobiet w ciąży i młodocianych (Rozporządzenie Rady Ministrów... 1996)

Oceniana wielkość	Wartość dopuszczalna
Równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G odniesiony do 8-godzinne go, dobowe go lub do przeciętne go tygodniowe go, określone go w kodeksie pracy, wymiaru czasu pracy, dB	102
Szczytowy nieskorygowany poziom ciśnienia akustycznego, dB	145

Odrębnym problemem jest ograniczenia ekspozycji na hałas w przypadku ekspozycji środowiskowej, czyli hałasu w pomieszczeniach i budynkach mieszkalnych pochodzącego od źródeł zewnętrznych. W tym przypadku ograniczenia są odrębnie opracowywane, z uwagi na inne potrzeby ochrony zdrowia w tych środowiskach. W przypadku hałasu niskoczęstotliwościowe go istnieją już przepisy w kilku państwach: Danii, Niemczech, Anglii i Szwecji, a w pozostałych są stosowane propozycje oceny przygotowane przez naukowców. W Polsce do oceny hałasu infradźwiękowe go w środowisku stosuje się zalecenia *Mirowskiej* (2002), a w Holandii *van der Berga* (2005). Kryteria te są oparte na progach słyszenia infradźwięków, tzn. uciążliwość dźwięków z tego zakresu wiąże się ze słyszeniem, a zatem dopuszczalne poziomy infradźwięków nie powinny przekraczać progów słyszenia. Jest to istotne zarówno w przypadku sąsiedztwa farm wiatrowych, jak i instalacji klimatyzacyjnych w budynkach mieszkalnych.

Duńska Agencja Ochrony Środowiska (Danish Environmental Protection Agency, DEPA) zaleca, aby poziomy ekspozycji na infradźwięki środowiskowe były niższe o 10 dB od progów słyszenia infradźwięków. Według *Jakobsena* (2001) skorygowany charakterystyką G próg słyszenia dla osób o szczególnej wrażliwości wynosi 95 dB. DEPA zaleca więc, aby średni całkowity poziom skorygowany charakterystyką częstotliwościową G w zakresie częstotliwości do 20 Hz nie przekraczał 95 dB. Kiedy są rozpatrywane poziomy ciśnienia akustyczne skorygowane charakterystyką częstotli-

ściową G, wówczas norma ISO 7196:1995 lub DEPA wskazują, że wartości niższe od 85 dB lub 90 dB będą zawsze poniżej progów percepcji lub uciążliwości.

Tabela 12.

Dopuszczalne poziomy infradźwięków w narażeniu środowiskowym według Duńskiej Agencji Ochrony Środowiska, DEPA (Jakobsen 2001)

Częstotliwość, Hz	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
Poziom ciśnienia, dB, Leq	90,4	83,4	76,7	70,5	64,7	59,4	54,6	50,2	46,2	42,5	39,1	36,1	33,4

Zalecenia Departamentu Środowiska, Żywności i Terenów Rolniczych (Department for Environment, Food and Rural Area, DEFRA) rządu Wielkiej Brytanii oceny hałasu niskoczęstotliwościowego z 2005 r. są oparte na progach słyszenia tych częstotliwości. Jeżeli poziomy hałasu przekroczy wartości w poszczególnych tercjach (w tabeli 13.) wówczas, hałas może być źródłem zakłóceń.

Tabela 13.

Dopuszczalne poziomy infradźwięków w narażeniu środowiskowym (wg DEFRA 2005)

Częstotliwość, Hz	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
Poziom ciśnienia, dB, Leq	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

W Niemczech do oceny hałasu w pomieszczeniach jest stosowana norma DIN 45680; 1997. W normie zaleca się ocenę w pasmach tercjowych w zakresie: 8 ÷ 100 Hz w odniesieniu do 16 h podczas pracy dziennej i 1 godziny nocnej, a poziomy nie powinny przekraczać wartości podanej w tabeli 14.

Tabela 14.

Dopuszczalne poziomy infradźwięków w narażeniu środowiskowym (wg DIN 45680 1997)

Częstotliwość, Hz	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
Poziom ciśnienia, dB, Leq (dzień)	108	100	91,5	84	76	68	60,5	53	45	38,5	38	38,5
Poziom ciśnienia, dB, Leq (noc)	103	95	86,5	79	71	63	55,5	48	40	33,5	33	33,5

Holenderskie kryteria oceny hałasu niskoczęstotliwościowego w paśmie 20 ÷ 100 Hz są oparte na pojęciu progu słyszenia 10% najwrażliwszej populacji w wieku 50 ÷ 60 lat (NSG 1999).

Tabela 15 .

Dopuszczalne poziomy infradźwięków w narażeniu środowiskowym (wg normy NSG 1999)

Częstotliwość, Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100
Poziom ciśnienia, dB, Leq	74	64	55	46	39	33	27	22

Szwedzkie kryteria oceny hałasu niskoczęstotliwościowego w paśmie 31,5 ÷ 200 Hz są opublikowane jako wytyczne Narodowego Biura ds. Zdrowia i Opieki (SOSFS 1996:7). Dopuszczalne poziomy zmieniają się od 56 dB dla 1,5 Hz do 34 dB dla 200 Hz i są podane w pasmach tercjowych (tab. 16).

Tabela 16.

Dopuszczalne poziomy infradźwięków w narażeniu środowiskowym (wg SOSFS 1996:7)

Częstotliwość, Hz	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Poziom ciśnienia, dB, Leq	56	49	43	41,5	40	38	36	34	32

Mirowska (2002) proponuje przeprowadzenie oceny hałasu niskoczęstotliwościowego w budynkach mieszkalnych w tercjach o paśmie 10 ÷ 250 Hz. W zakresie częstotliwości 2 ÷ 63 Hz proponuje poziomy o około 20 ÷ 30 dB poniżej percepcji słuchowej, a powyżej 80 Hz ma przebieg zbliżony do krzywej izofonicznej A10.

Tabela 17.

Dopuszczalne poziomy infradźwięków w narażeniu środowiskowym (wg *Mirowskiej* 2002)

Częstotliwość, Hz	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
Poziom ciśnienia, dB, Leq	80,4	73,4	66,7	60,5	54,7	49,3	44,6	40,2	36,2	32,5	29,1	26,1	23,4	20,9	18,6

PODSUMOWANIE

Mimo że badania poświęcone wpływowi hałasu na zdrowie mają długą historię, wciąż pojawiają się nowe problemy. Ostatnio zainteresowanie naukowców skupiło się na hałasie o niskich częstotliwościach, z uwagi na to, że wzrasta liczba antropogenicznych źródeł infradźwięków w środowisku, dlatego rośnie ekspozycja i zwiększa się liczba osób ekspozycyjnych na ten hałas. Badania prowadzone w okresie rozpoczęcia podbojów kosmosu były ukierunkowane głównie na skutki ekspozycji o poziomach ekstremalnych. W najnowszych czasach skoncentrowano się głównie na ekspozycji środowiskowej, natomiast badania skutków ekspozycji zawodowej są niezwykle skąpe i nieliczne. Doniesienia grupy *Alves-Perreira* i *Castelo Branco* (2007 b) na temat, tzw. choroby wibroakustycznej jako specyficznej (?) dla ekspozycji na hałas niskoczęstotliwościowy wzbudziło zrozumiany niepokój, z uwagi na jakość skutków dla układu krążenia, układu oddechowego i nerwowego, a także inicjowanie powstania nowotworów(?). I mimo że w żadnym innym ośrodku badawczym nie udało się do tej pory uży-

skąć podobnych wyników, a także z uwagi na fakt, że prace zespołu *Alves-Perreira* nie są pozbawione błędów czy niedoróbek, wyników ich badań nie można wprawdzie całkowicie zaakceptować, ale również brak jest argumentów za ich odrzuceniem bez przeprowadzenia wszechstronnych dobrze zaplanowanych badań i to prowadzonych w wielu ośrodkach. Na obecnym etapie wiedzy ustalenie wartości granicznej i kryterium szkodliwości infradźwięków dla ekspozycji zawodowej nie jest tym bardziej możliwe bez wszechstronnych, powszechnych badań, w tym także epidemiologicznych.

Wydaje się, że przyszłe kryterium szkodliwości powinno być oparte na wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową G lub inną charakterystyką częstotliwościową umożliwiającą pomiar infradźwięków w zakresie częstotliwości $1 \div 20$ Hz. Kryterium to powinno być powiązane z kryterium szkodliwości dźwięków słyszalnych (hałasu słyszalnego) z zakresu częstotliwości powyżej 20 Hz mierzonych z zastosowaniem charakterystyki częstotliwościowej A.

PIŚMIENNICTWO

ACGIH (1998) Threshold limit values for chemical substances and physical agents TLV's and BEI's, 113.

Adams M., Moorhouse A., Waddington D. (2008) Social effects of low frequency noise exposure on sufferers; developing a procedure of assessment NVB 2008. *J. Low. Freq. Noise Vibr. Active Control* 113–122 [reprint].

Alekseev S.V. (1985) Myocardial ischemia in rats exposed to infrasound. *Gigiena Truda i Prof. Zabolewania* 8, 34–38.

Altmann J. (1999) Acoustic weapons – A prospective assessment. Sources, propagation, and effects of strong sound. Ithaca NY, Peace Studies Program, Cornell University 1999.

Altmann J. (2001) Acoustic weapons. A prospective assessment. *Science & Global Security* 9, 165–234.

Alves-Pereira M. (1999) Noise-induced extra-aural pathology: a review and commentary. *Aviat. Space Environ. Med.* 70(3 Pt 2), A7–21.

Alves-Pereira M., Castelo Branco N.A.A. (2007) Vibroacoustic disease. Biological effects of infrasound and low frequency noise explained by mechanotransduction cellular signaling. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 93, 256–279.

Alves-Pereira M., Joanaz de Melo J., Castelo Branco N.A.A. (2004a) Public transportation and low frequency noise, a health hazard? [W:] *Proceedings of the 11th International Congress on Sound and Vibration*. St. Petersburg, Russia, 1761–1766.

Alves-Pereira M., Joanaz de Melo J., Castelo Branco, N.A.A. (2004b) Low frequency noise in trains. [W:] *Proceedings of Internoise (2004)*. Prague, Czech Republic 643, 5.

Arlinger S.D. (1991) Normal hearing threshold levels in the low-frequency range determined by an insert earphone. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 90, issue 5, 2411–2414.

ASA/NOISE-CON (2000, wersja z 20.08.2008) Daniel Raichel Boom Cars: Noise Pollution at its Worst [www.acoustics.org/press/140th/raichel2.htm].

Babisch W. (1998) Epidemiological studies of the cardiovascular effects of occupational noise – a critical appraisal. *Noise and Health* 1, 24–39.

- Babisch W.* (2004) Health effects related to stress mechanisms – cardiovascular effects. [W:] WHO, Report on the second meeting on night noise guidelines. Geneva 2004, 9–10.
- Bedard A.J.* (2000) Detection of infrasound from natural and civilization sources: measurement of complex signal/noise environments. Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings. IGARSS. IEEE 2000 International vol. 3, issue 1195–1197.
- Bedard A.J., George T.M.* (2000) Atmospheric infrasound. *Physics Today* 53(3) 32–37.
- Bengtsson J., Peroson Waye K., Kjellberg A.* (2004) Evaluations of effects due to low frequency noise in low demanding work situation. *J. Sound. Vibr.* 278, 83–99.
- Bengtsson J.* (2003) Low frequency noise during work – effects on performance and annoyance. Thesis Goteborg University.
- Berger E. H.* (1996) Protection for infrasonic and ultrasonic noise exposure. Monographie technique [<http://www.e-a-r.com/pdf/hearingcons/earlog14.pdf>].
- Berglund B., Lindvall T., Schwela D.H.* (1999) Guidelines for community noise, Geneva, DMS/WHO 94.
- Berglund B., Hassmen P., Job R.F.* (1996) Sources and effects of low-frequency noise. *J. Acoust Soc. Am.* 99(5), 2985–3002.
- Berkow E.R., Beers, Fletcher M.A.* (1997) The merck manual of medical information. Home edition. New York, Pocket Books 5, 94–5, 1089–1091.
- Bigert C., Bluhm G., Theorell T.* (2005) Saliva cortisol – a new approach in noise research to study stress effects. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 208, 227–230.
- Biuletyn Międzyresortowej Komisji ds. Aktualizacji Wykazu NDS i NDN Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy (1986), z. 2, 77–105.
- Borredon P.* (1980) Physiological effects of infrasounds in our everyday environment. [W:] Proceedings of the Conference on Low frequency Noise and hearing. Alborg University Press.
- British Wind Energy Association (February 2005) Low frequency noise and wind turbines. Technical Annex. 10 pages [<http://www.bwea.com/pdf/lfn-annex.pdf>].
- Bunsel R.G., Lehmann A.G.* (1978) Infrasound and sound: differentiation of their psychophysiological effects through use of genetically deaf animals. *JASA* 63(3) 974–977.
- Buxton I.* (2006, wersja wrzesień 2008) Low frequency noise and infrasound A literary comment [<http://www.wind-watch.org/documents/wp-content/uploads/buxton-infrasoundandlandbasedanimals.doc>].
- Campo P., Damongeot A.* (1991) La ponderation « A » est-elle un indicateur pertinent de la nocivite des bruits basse frequence? Étude bibliographique. *Cahiers de Notes Documentaires* 144, 3^{ème} trimestre 1991, 485–492.
- Castelo Branco N.A., Rodriquez E.* (1999) The vibroacoustic disease. An emerging pathology. *Aviat. Space.*
- Castelo Branco N.A., Ferreira J.R., Alves-Pereira M.* (2007) Respiratory pathology in vibroacoustic disease: 25 years of research. *Revista Portuguesa De Pneumologia* 13 (1), 129–35.
- Castelo Branco N.A.* i in. (2008, wersja wrzesień) Monitoring vibroacoustic disease [<http://www.noisefree.org/monitor.pdf>].
- Cavallo D.* i in. (2006) Occupational exposure in airport personel. Characterization and evaluation of genotoxic and oxidative effects. *Toxicology* 223, 26–35.
- Chatillon J.* (2006) Limites d'exposition aux infrasons et aux ultrasons – Etude bibliographique, Hygiene et Securite du Travail, *Cahiers de Notes Documentaires, INRS*, 2^{ème} trimestre 2006, 203.

- CIOP [<http://www.ciop.pl/6541.html>] (dane z 20.08.2008).
- Corso J.F. (1958) Absolute threshold for tones of low frequency. *Am. J. Psychol.* 71, 367–374.
- Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne (1998). Wyd I. Warszawa, CIOP–PIB.
- Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne (2007). Wyd IV. Warszawa, CIOP–PIB.
- Danielsson A., Landstörn U. (1985) Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. An experimental study. *Acta Medica Scandinavica*, 217.5, 531–535
- Damijan Z., Wiciak J. (2005) The influence of LFN (low-frequency noise) on the changes of EEG signal morphology. *Molecular and Quantum Acoustics* 26, 61–74.
- Damijan Z., Wiciak J. (2007) The influence of LFN (low-frequency noise) on the changes of EEG signal morphology. *Molecular and Quantum Acoustics* 28, 65–70.
- Davis H.W. (2005) Occupational exposure to noise and mortality from acute myocardial infarction. *Epidemiology* 16, 1, 25–32.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs (Royaume-Uni). A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. Report for Defra by Dr Geoff Leventhall Assisted by Dr Peter Pelmeare and Dr Stephen Benton (2003) 88 [<http://www.defra.gov.uk/environment/noise/lowfrequency/pgf/lowfreqnoise.pdf>].
- Evans M.J., Tempest W. (1972) Some effects of infrasonic noise in transportation. *J. Sound and Vibration* 22(1), 19–24.
- Frenzelli G. i in. (2004) Effects of loud noise exposure on DNA integrity in rat adrenal gland. *Environmental Health Perspectives* 112, 17, 1671–1672.
- Griefahn B. (2000) Noise-induced extraaural effects. *Acoustical Science and Technology* 21, 6, 307–317.
- Griffin M.J. (1990) Handbook of human vibration. London, Academic Press.
- Gorgeladze A.S., Glinchikov V.V., Usenko V.R. (1986) Experimental myocardial ischemia caused by infrasound. *Gigiena Truda i Prof. Zabolewania* 8, 30–33.
- Guest H. (2003) Inadequate standards currently applied by local authorities to determine statutory nuisance from LF and infrasound. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 22, 1, 1–7.
- Harris C.S., Sommer H.C., Johnsons D.L. (1976) Review of effects of infra sounds on man. *Aviat Space Environ. Med.* 47, 430–434.
- Hee G., Barbara J.J., Gros P. (1992) Valeurs limites d'exposition aux agents physiques en ambiance de travail. *Cahiers de Notes Documentaires* (1992) 148, 3^{ème} trimestre. Mise à jour mai 1993. Référence INRS: ND 1886-148-92, 297–318.
- Hensel J. i in. (2007) Impact of infrasound on the human cochlea. *Hearing Research* 233, 67–76.
- Holmberg K. i in. (1996) Hygienic assessment of low frequency noise annoyance in working environments. *J. Low Freq. Noise Vibr.* 15, 1 7–15.
- Horror movies and low frequencies [<http://www.reallyscary.com/interviewdeltoro.asp>] (wersja z 20.08.2008).
- [http://ntp-server.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/Chem_Background/ExSumPdf/Infrasound.pdf]
- [http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/Wind_Turbine_Acoustic_Noise_Rev_2006.pdf] (wersja wrzesień 2008).
- [http://www.ninapierpont.com/pdf/Effects_of_low_frequency_noise_on_sleep.pdf].

[<http://www.scribd.com/doc/430696/Survey-Low-Frequency-Noise-Aviation-Workers>].

Huang Qibay C.Y., Shi H. (2004) An investigation on the physiological and psychological effects of infrasound on persons. *Journal of Low Frequency Noise. Vibration and Active Control* 23(1), 71–76.

Infrasound brief review of toxicological literature (2001) [http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/Chem_Background/ExSumPdf/Infrasound.pdf].

ISO 226 (1987) Normal equal-loudness level contours.

ISO 226: 2003 Aout 2003. Acoustique – Lignes isoniques normales.

ISO 389-7.1996 Reference zero for calibration of audiometric equipment – Part 7. Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions.

ISO 7196:1995 Acoustics – Frequency – weighting characteristic for infrasound measurements.

ISO 7196:1995 Acoustics. Methods for describing infrasound with respect to its effects on humans.

ISO 9612:1997 Acoustics. Guidelines for the measurement and assessment of exposure to noise in the working environment.

Iwahashi K., Ochiai H. (2001) Infrasound pressure meter and examples of measuring data. *Journal of Low Frequency Noise. Vibration and Active Control*. 20, 1, 15–19.

Jakobsen J. (2001) Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration. *Journal of Low Frequency Noise. Vibration and Active Control*. (20)3, 141–148.

Jacobsen J. (2005) Infrasound emission from wind turbines. *J. Low Freq. Noise. Vibr. Active Control* 24, 3, 145–155.

Johnson D.L. (1980) The effects of high level infrasound. *Proceed of Conference on Low Frequency. Noise*, Moller H. & Rubak P Aalborg 1–14.

Johnson D.L. (1982) Hearing hazards associated with infrasound. [W:] *New perspectives on noise-induced hearing*. Loss New York, Raven Press 407–421.

Johnson D.L. (1997) Proposed TLV for infrasound and low frequency noise [niepublikowana dokumentacja dla zespołu ekspertów ACGIH, Physical Agents TLV's].

Kaczmarska-Kozłowska A., Augustyńska D. (1992) Study of sound insulation of control cabins in industry in the low frequency range. *Journal of Low Frequency Noise. Vibration and Active Control*, II, 2, 42–46.

Kaczmarska A., Augustyńska D. (1999) Ograniczenie hałasu niskoczęstotliwościowego w kabinach przemysłowych. Warszawa, CIOP.

Kaczmarska A., Augustyńska D., Wierzejski A. (2006) Hałas infradźwiękowy na stanowiskach pracy kierowców. *Bezpieczeństwo Pracy* 10, 6–7.

Kjellberg A. i in. (1997) Evaluation of frequency – weighted sound level measurements for prediction of low frequency noise annoyance. *Environ. International* 23, 4 519–527.

Landström U. (1987) Laboratory and field studies on infrasound and its effects on humans. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 6, 1, 29–33.

Landström U., Landström R., Byström M. (1983) Exposure to infrasound. Perception and changes in wakefulness. *Journal of Low Frequency Noise. Vibration and Active Control*. 2, 1, L–II.

Landström U. i in. (1982) Changes in wakefulness during exposure to infrasound. *J. Low. Freq. Noise Vibr.* 1,2, 79–87.

Landström U., Byström M. (1984) Infrasonic threshold levels of physiological effects. *J. Low Freq. Noise Vibr.* 3(4) 167–173.

Legislation hinders research into low frequency noise [<http://kondor.etf.bg.ac.yu/~vm/cd1/papers/135.pdf>].

Leighton T.G. (2007) Rapporteur report. Mechanism and interaction. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 93, 256–279.

Lenzi P. i in. (2003) DNA damage associated with ultrastructural alteration in rat myocardium after loud noise exposure. *Environmental Health Perspectives* 111, 4, 467–471.

Leventhall G.A. (2003) Review of published research on low frequency noise and its effects. Report for DEFRA.

Leventhall H.G. (2004) Low frequency noise and annoyance. *Noise and Health* 6(23), 59–72.

Leventhall G. (2007) What is infrasound? *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 93, 130–137.

Lim D.J. i in. (1982) Trauma of the ear from infrasound. *Acta Oto-Laryngol* 94(3-4), 213–231.

Mahendra Prashanth K., Sridar V. (2008) The relationship between noise frequency components and physical, physiological and psychological effects of industrial workers. *Noise and Health* 10, 90–98.

Maschke C., Rupp T., Hecht K. (2000) The influence of stressors on biochemical reactions – a review of present scientific findings with noise. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 203, 45–53.

Mirowska M. (2002) An investigation and assessment of annoyance of low frequency noise in dwellings. *Noise Notes* vol. 1, 1, 30–34.

Mohr G.C. i in. (1965) Effects of low frequency and infrasonic noise on man. *Aerospace Medicine* 36(9), 817–824.

Moller H. (1987) Annoyance of audible infrasound. *J. Low Freq. Noise Vibr* 6(1), 1–17.

Moller H., Pedersen C.S. (2004) Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise and Health* 6(23), 37–57.

Moore B.C.J. (1999) Wprowadzenie do psychologii słyszenia. Warszawa, PWN 66–73.

Nekhoroshew A.S. (1986) Exposure to low frequency narrow band noise and reaction of stria vascularis vessels. *Vest, Otorinolaringol* 6, 17–19.

Nishimura K.K. (1987) The pituitary adrenocortical response in rats and human subjects exposed to infrasound. *Journal of Low Frequency Noise & Vibration* 6. 1, 18–28.

Noble J.M. (2008, wersja z dnia 20.08.) Tenney SM Detection of naturally occurring events from small aperture infrasound arrays [<http://www.tornadochaser.net/research/infasonicdetector.pdf>].

Okai O. i in. (1980) Physiological parameters in human response to infrasound. [W:] Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing. Aalborg, University Press 234–254.

Okai O. i in. (1983) Infrasound generated by human body. *Proceedings of Internoise* 83, 239–242.

Okamoto K. i in. (1986) The influence of infrasound upon human body. *Sangyo Ika Daigaku Zasshi* 8(Suppl.), 135–149. (Japanese).

Pawlaczyk-Luszczynska M. i in. (2003) Assessment of annoyance from low frequency and broadband noise. *Int. J. Occupal. Med. Environ. Health* 16, 4 337–343.

Pawlaczyk-Luszczynska M. i in. (2005) The impact of low frequency noise on human mental performance. *Int. J. Occupal. Med. Environ. Health* 18, 2 185–198.

- Pawlaczyk-Łuszczynska M.* i in. (2001) Hałas infradźwiękowy. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2(28), 5–45.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M.* (2008) Hałas infradźwiękowy – jego oddziaływanie na organizm. Przegląd piśmiennictwa [Seminarium]. Warszawa, CIOP.
- Persson Wayne K.* i in. (1997) Effect on performance and work quality due to low frequency ventilation noise. *J. Sound. Vibr.* 203, 467–474.
- Persson Wayne K.* i in. (2002) Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during performance. *Life Sciences* 70, 745–758.
- Persson Wayne K.* i in. (2003) Effects of nighttime low frequency noise on cortisol response to awakening and subjective sleep quality. *Life Sciences* 72, 863–875.
- Persson Wayne K.* i in. (2004) Cortisol response and subjective sleep disturbance after low – frequency noise exposure. *J. Sound. Vibr.* 277, 453–457.
- Pimonow L.* (1972) Les bruits. Etude documentaire relative aux effets des vibrations acoustiques sur l'organisme. Secretariat general de l'aviation civile.
- PN-86/N-01338. Hałas infradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy i ogólne wymagania wykonywania pomiarów.
- PN-EN 61672-1:2005. Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 1. Wymagania.
- PN-N-01338:1986. Hałas infradźwiękowy. Wartości odniesienia poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy. Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów i oceny [projekt roboczy z czerwca 2008, norma w nowelizacji].
- DEFRA (2005) Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance.
- Qibai C.Y.H., Shi H.* (2004) An investigation on the physiological and psychological effects of infrasound on persons. *J. Low. Freq. Noise Vibr. Active Vontrol.* 23,1, 71–76.
- Rosenlund M.* i in. (2001) Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise. *Occupational Environ Med.* 58, 769–773.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym. DzU nr 127, poz. 1091; zm.: DzU 2005, nr 136, poz. 1145.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 1996 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych kobietom. DzU nr 114, poz. 545; zm.: DzU 2002, nr 127, poz. 1092.
- Rozporządzenie ministra pracy i polityki socjalnej z dnia 1 grudnia 1989 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU nr 69, poz 417.
- Rozporządzenie ministra pracy i polityki socjalnej z dnia 23 grudnia 1994 r. i obwieszczenie z dnia 17 maja 1995 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU nr 3, poz. 16; z 1995 r. DzU nr 69, poz. 351.
- Rozporządzenie ministra pracy i polityki socjalnej z dnia 2 stycznia 2001 r. i z dnia 3 grudnia 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU nr 4, poz. 36; z 2002 r. nr 217, poz. 1832.
- Sandberg U.* (1983) Combined effects of noise, infrasound and vibration on drivers performance. [W:] Proceedings of Inter-noise 887–890.
- Schust M.* (2004) Effects of low frequency noise up tp 100 Hz. *Noise and Health* 6, 23, 73–85.
- Stark J.* i in. (1994) The effetc of low frequency noise on postural stability. *ACES* 6(1-2), 83–88.
- Stepanow V.* (2001) Biological effcta of low frequency acoustic oscillations and their hygienic regulation. Final report. Moskawa, State Research Center.

- Szelenberger W.* (1982) Psycholofizjologiczne reakcje człowieka na działanie fal infradźwiękowych. Materiały do Studiów i Badań nr 62. Warszawa, CIOP 31–43.
- Takahashi Y., Harada N.* (2007) A consideration of an evaluation index for high – level low-frequency noise by taking into account the effect of human body vibration. *J. Low. Freq. Noise Vibration&Active Control* 26(1), 15–27.
- Takahashi Y.* i in. (2005) A study on the relationship between subjective unpleasantness and body surface vibration induced by high-level low-frequency pure tone. *Industrial Health* 4, 580–587.
- Takahashi Y.* i in. (1997) An infrasonic experiment for industrial hygiene. *Industrial Health* 35, 480–488.
- Takahashi Y.* i in. (1999) A pilot study on the human body vibration induced by low frequency noise. *Industrial Health* 37, 28–35.
- Tang S.K., Wong M.Y.* (2004) On noise indices for domestic air conditioners 274, 1–12.
- Tempest W., Bryan M.E.* (1972) Low frequency noise measurement in vehicles. *Applied Acoustics* 5, 133139.
- Tempest W.* (1976) *Infrasound and low frequency vibration.* London, Academic Press.
- The largest organ in the world [<http://www.theatreorgan.com/atlcity/index2.htm> wersja z 20.08.2008].
- Van der Berg* (2005, wersja z 20.08.2008) Influence of low frequency noise on health and well-being. Informal Draft No GBR-41-8.
- Van der Berg M., Passhier-Vermeer W.* (1999) Assessment of low frequency noise complaints. *Proceed. Inter. Noise, Fort Lauderdale.*
- Van Kempen E.E.* i in. (2002) The association between noise exposure and blood pressure and ischemic heart disease: a meta-analysis. *Environmental Health Perspectives* 110, 3, 307–317.
- Von Gierke H.E., Nixon C.* (1976) Effects of intense infrasound on man. [W:] *Infrasound and Low Frequency Vibration.* New York, Academic Press 197–203.
- Watanabe T., Moller H.* (1990) Low frequency hearing threshold in pressure and in free field. *J. of Low Frequency Noise and Vibration* 9(3), 106–115.
- Waye K.P.* (2005) Adverse effects of moderate levels of low frequency noise in the occupational environment *ASHRAE Transaction* 111, *Career and Technical Education* 672–683.
- WHO, World Health Organization (1980) *Environmental Health Criteria* 12 – Noise.
- Infrasound* (2001) *Brief Review of Toxicological Literature* 51.
- Yamada S.* i in. (1983) Body sensation of low frequency noise of ordinary persons and profoundly deaf persons. *J. Low Freq. Noise and Vibr.* 2, 32–36.
- Yamazaki K., Tokita Y.* (1984) Effects of infra and low frequency sound on sleep stage. *Proceedings of Internoise* 929–932.
- Yeowart N.S., Evens M.J.* (1974) Threshold of audibility for very low frequency pure tones. *JASA* 55, 814–818.
- Yeowart N.S., Bryan M.E., Tempest W.* (1967) Low frequency noise thresholds. *J. of Sound and Vibration* 9, 447–453.

The influence of infra- and low-frequency sound on human – a review of the literature

Abstract

Infrasound is traditionally defined as low-frequency sound that is inaudible. Infrasound is acoustic energy with a frequency below 16 Hz or 20 Hz and both frequency limits are used. There is no agreement regarding a definition of infrasonic noise. According to Polish standard PN-N-01338:1986, noise whose spectrum consists of sounds with frequencies below 50 Hz is called infrasonic noise, but in literature the term low-frequency noise is more common and 250 Hz is usually considered its upper-frequency limit. Besides a natural origin sources of infrasound like volcanoes, tornados, snow avalanches or less intensive ones like sounds of some animals, etc., there are many human origin sources, e.g., air transport, heavy trucks, compressors, ventilation, air-conditioning systems and more recently wind farms. The latter are spreading as alternative renewable sources of energy. That is why interest in infrasound has recently increased.

Infrasound, contrary to traditional opinion about its inaudibility, is perceived by our body through our hearing organ and perception via mechanoreceptors has been reported when the infrasound is sufficiently strong. Its audibility depends on the acoustic pressure level and requires a much higher level than in the conventional range (20 ÷ 20000 Hz). Infrasound at an extreme high level above 175 dB induces aural pain and could destroy the middle and inner ear (eardrum rupture occurs at 185 ÷ 190 dB). Exposure to infrasound induces temporary threshold shift of hearing. Data on permanent hearing effects are scarce and this problem requires further research.

The vestibular organ seems to be sensitive. There are some studies reporting that exposure to infrasound elicits nystagmus (eye movements) from both animals and humans and can result in nausea and giddiness.

Subjects exposed to infrasound at a high level (above 130 dB) have reported body vibration. In the region of 40 ÷ 80 Hz the lungs, and below 10 Hz the chest, head and abdomen are resonated. Some results on infrasound were the basis for acoustic weapons.

The most prominent effect of infrasound is annoyance, especially in non-occupational exposure but extra-aural effects of exposure are very large in dependence of levels, frequency, circumstances and the subject's sensitivity. The following have been reported: temporary changes in EEG, sleep disturbances, changes in the cardiovascular system and blood pressure, changes in the digestive and endocrine systems and many others. Tiredness, drowsiness, reduction in concentration ability and performance have been shown as well. Experiments with animals supported human results, however, summing up there are many inconsistencies between the results of different research centres.

For over 25 years a team led by *Alves-Pereira* and *Castelo Branco* has published many papers on the vibroacoustic disease (VAD). According to their hypothesis exposure to low-frequency noise causes many pathological changes called VAD. The list of symptoms is long, starting with mood and behavioral abnormalities that are early findings related to stage 1 of VAD through increased irritability and aggressiveness, a tendency for isolation, depressions and decreased cognitive skills to psychiatric disorders, hemorrhages, ulcers, neurological problems, muscle pain and many others at VAD stage III. So far, nobody other than *Alves-Pereira* and *Castelo Branco's* team has reported VAD. Therefore, their hypothesis seems to be original but controversial.

Lack or scarcity of evidence should be filled by multicenter research based on scientific methods including epidemiological studies. Some problems with the effect of infrasound on human have resulted from the inconsistency in various authors' measurements of low-frequency noise.

There are some regulations related to infrasound and low-frequency noise, e.g., in Sweden, France, Russia, New Zealand and recently Poland. There is also a recommendation of the American Conference of Governmental Industrial Hygienists for ceiling levels of infrasound in occupational settings. Besides, some countries established national criteria for low-frequency noise in the environment or indoors (Denmark, the Netherlands, Germany, the UK, Sweden and Poland).

Summarizing, it should be emphasised that further research on the health effect of infrasound on human are necessary; especially the hypothesis of VAD should be investigated by multi-center research to be confirmed or refuted. Research should be performed using standardized methods of measurement and equipment. So nowadays to establish TLVs for low-frequency noise in occupational settings further research is necessary.