



Hałas ultradźwiękowy

Dokumentacja proponowanych znowelizowanych wartości dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego¹

Ultrasonic noise

Documentation of proposed revised occupational exposure limits (OELs)

JAN RADOSZ

<https://orcid.org/0000-0001-8542-7799>

e-mail: jarad@ciop.pl

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Warsaw, Poland

Streszczenie

Hałas ultradźwiękowy stanowi istotny czynnik ryzyka w środowisku pracy, pomimo że w znacznym zakresie częstotliwości pozostaje niesłyszalny dla człowieka. W niniejszym artykule przedstawiono przegląd aktualnego stanu wiedzy dotyczącego źródeł ultradźwięków w przemyśle, ich oddziaływania na organizm człowieka oraz obowiązujących i historycznych wartości dopuszczalnych stosowanych w Polsce i na świecie. Przedstawiono również wyniki badań audiometrycznych wskazujące na możliwość występowania czasowego przesunięcia progów słyszenia oraz zmian w funkcjach poznawczych w warunkach ekspozycji na poziomy zbliżone do obowiązujących wartości dopuszczalnych. Na podstawie analizy literatury, danych pomiarowych oraz porównania wytycznych międzynarodowych wskazano na potrzebę aktualizacji krajowych wartości dopuszczalnych, w szczególności w paśmie 20 kHz, w którym obecnie obowiązujące limity mogą okazać się niewystarczające do zapewnienia odpowiedniej ochrony zdrowia pracowników.

Słowa kluczowe: hałas ultradźwiękowy, narażenie zawodowe, słuchowe i pozasłuchowe skutki ekspozycji, audiometria tonalna, czasowe przesunięcie progu słyszenia, wartości dopuszczalne.

Abstract

Ultrasonic noise is an important occupational risk factor in workplace, even though much it remains inaudible to humans across a wide frequency range. This article presents an analysis of current state of knowledge on industrial sources of ultrasonic noise, their effects on the human body, and current and historical exposure limits applied in Poland and worldwide. The results of audiometric tests are also discussed, confirming the possibility of temporary hearing threshold shifts and changes in cognitive functions when exposed to levels close to the current permissible limits. Based on a review of the literature, measurement data, and comparison of international guidelines, the need to update national exposure limits is

¹ Zrealizowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej (do 12 grudnia 2023 r. – pod nazwą: Ministerstwo Rodziny i Polityki Społecznej). Zadanie nr 3.ZS.01 pt.: „Rewizja wartości dopuszczalnych hałasu ultradźwiękowego w środowisku pracy”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

highlighted, particularly in the 20 kHz band, where current limits may be insufficient to ensure adequate protection of workers' health.

Keywords: ultrasonic noise, occupational exposure, auditory and non-auditory effects of exposure, pure-tone audiometry, temporary threshold shift (TTS), exposure limits.

Adres do korespondencji/Contact details: Jan Radosz, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: jarad@ciop.pl

WPROWADZENIE

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU z 2018 r., poz. 1286 z późn. zm.), hałas ultradźwiękowy na stanowiskach pracy jest charakteryzowany poprzez:

- równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych $10 \div 40$ kHz, odniesione do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy, lub równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych $10 \div 40$ kHz, odniesione do przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy określonego w ustawie z dnia 26 czerwca 1974 r. – Kodeks pracy (w szczególnych przypadkach, gdy oddziaływanie hałasu ultradźwiękowego na organizm człowieka ma charakter nierównomierny w poszczególnych dniach tygodnia),
- maksymalne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych $10 \div 40$ kHz.

Mimo że częstotliwości powyżej ok. $16 \div 20$ kHz nie wywołują u człowieka wrażeń słuchowych, hałas ultradźwiękowy może oddziaływać na organizm zarówno poprzez narząd słuchu, jak i inne drogi narażenia, w tym bezpośrednie przenoszenie drgań mechanicznych na tkanki ciała. W literaturze z lat 40.–60. XX wieku opisywano zespół objawów określany jako tzw. choroba ultradźwiękowa. Jednak późniejsze analizy wskazują, że interpretacja tych obserwacji nie jest jednoznaczna, a obserwowane efekty mogły mieć charakter wieloczynnikowy (Pawlaczyk-Łuszczynska, Dudarewicz 2020).

Po raz pierwszy hałas ultradźwiękowy został uwzględniony w wykazie szkodliwych czynników

fizycznych środowiska pracy w 1989 r. (DzU nr 69, poz.417). Obowiązujące obecnie wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) hałasu ultradźwiękowego wprowadzono do rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 2 stycznia 2001 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU nr 4, poz. 36). Podstawę ich wyznaczenia stanowiła dokumentacja opublikowana w kwartalniku „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy” (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2001). Historycznie wartości te wywodzą się z międzynarodowych wytycznych z lat 70. i 80. XX w., kiedy po raz pierwszy sformułowano kryteria ochrony przed ultradźwiękami w powietrzu. Obecnie jednak dostępna wiedza naukowa jest znacznie szersza, co rodzi wątpliwości, czy dotychczasowe limity zapewniają wystarczający poziom ochrony zdrowia pracowników.

W dalszej części przedstawiono kluczowe argumenty oparte na aktualnych danych naukowych, przemawiające za koniecznością pilnej aktualizacji dokumentacji dotyczącej NDN hałasu ultradźwiękowego.

Obowiązujące obecnie na świecie wartości dopuszczalne dla hałasu ultradźwiękowego w dużej mierze wywodzą się z wytycznych Międzynarodowego Stowarzyszenia Ochrony Radiologicznej (IRPA, ang. *International Radiation Protection Association*) z 1984 roku (IRPA 1984). Zalecenia te oparto na stosunkowo ograniczonym materiale badawczym dostępnym w tamtym okresie.

W najnowszej ocenie Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP, ang. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) wskazano, że biologiczne podstawy tych zaleceń są obecnie niewystarczające (ICNIRP 2024). Pierwotne wytyczne odnosiły się do istotnych efektów biologicznych, w tym efektów słuchowych oraz ogólnych

subiektywnych odczuć, i na podstawie dostępnych wówczas danych wyznaczono granice ekspozycji. ICNIRP podkreśla jednak, że limity zaproponowane przez Urząd Ochrony Radiologicznej (RPA, ang. *Radiation Protection Authority*) opierały się na ograniczonych dowodach naukowych i nie mogą być uznane za w pełni ugruntowane naukowo. W szczególności baza danych eksperymentalnych wykorzystana w latach 80. była niewielka i w dużej mierze pochodziła z badań prowadzonych w latach 60. i 70. (Acton 1968; 1974), które charakteryzowały się znaczną niepewnością w zakresie określenia progów występowania efektów. W stanowisku ICNIRP w 2024 r. wskazano, że choć nie zidentyfikowano nowych, jednoznacznych mechanizmów szkodliwego działania ultradźwięków poza tymi uwzględnionymi w wytycznych z 1984 r., to ograniczona baza danych mogła prowadzić zarówno do zaniżenia, jak i zawyżenia obowiązujących wówczas limitów ekspozycji.

W ostatnich latach pojawiły się badania sugerujące, że ultradźwięki mogą wywoływać zmiany w układzie słuchowym oraz nerwowym już przy poziomach niższych niż dotychczas uznawane za bezpieczne (Dudarewicz i in. 2017; 2022; Weichenberger i in. 2022). Dotychczasowe wytyczne opierały się na założeniu, że dźwięki o częstotliwości powyżej 20 kHz są zasadniczo niesłyszalne, a zatem – jeśli pozostają poza zakresem percepcji – nie powinny negatywnie wpływać ani na komfort pracy, ani na funkcjonowanie narządu słuchu. Niezależnie od wartości dopuszczalnych istotnym zagadnieniem pozostaje również ocena narażenia na ultradźwięki. Tradycyjne metody pomiaru hałasu w środowisku pracy (np. ISO 9612) zostały opracowane głównie dla zakresu słyszalnego i często nie uwzględniają specyfiki ultradźwięków.

Klasykne mierniki poziomu dźwięku, wyposażone w standardowe charakterystyki częstotliwościowe (np. A, C), nie są w pełni przystosowane do pomiaru energii akustycznej powyżej 20 kHz. W szczególności filtr A silnie tłumi komponenty o częstotliwościach powyżej 10 kHz, co w praktyce może prowadzić do pomijania udziału ultradźwięków w wynikach pomiarów. Dawniej stosowane metody pomiarowe nie precyzowały w sposób jednoznaczny procedur pomiaru ultradźwięków, co w praktyce skutkowało stosowaniem różnych rozwiązań i utrudniało porównywanie wyników.

W ostatnich latach odnotowano jednak istotny postęp w tym obszarze (Cieslak i in. 2021).

W Polsce opracowano nową procedurę oraz normę pomiarową dedykowaną hałasowi ultradźwiękowemu. W 2015 r. opublikowano procedurę opracowaną w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB), (Radosz 2015), a następnie, w wyniku prac normalizacyjnych, opracowano projekt Polskiej Normy prPN-Z-01339, który został ostatecznie ustanowiony jako PN-Z-01339:2020.

ŹRÓDŁA HAŁASU ULTRADŹWIEKOWEGO W ŚRODOWISKU PRACY

Głównymi źródłami hałasu ultradźwiękowego w warunkach przemysłowych są tzw. technologiczne urządzenia ultradźwiękowe niskich częstotliwości, tj. pracujące w zakresie ok. 20 ÷ 40 kHz, w których drgania ultradźwiękowe są generowane celowo w celu realizacji, przyspieszenia lub usprawnienia procesu (Pleban 2020; Smagowska 2013). Do urządzeń tych należą m.in.:

- myjki ultradźwiękowe,
- zgrzewarki oraz urządzenia do lutowania ultradźwiękowego,
- ultradźwiękowe urządzenia do cięcia, wiercenia i drążenia (np. ultradrażarki),
- wanny do cynowania i cynkowania detali.

Hałas ultradźwiękowy może być również generowany jako produkt uboczny przez maszyny i narzędzia niezaprojektowane specjalnie do emisji ultradźwięków. W takich przypadkach składowe wysokoczęstotliwościowe powstają wtórnie, m.in. w wyniku przepływu lub wypływu sprężonego gazu czy wysokich prędkości obrotowych elementów. Przykładami takich źródeł są sprężarki, palniki gazowe, zawory ciśnieniowe, narzędzia pneumatyczne czy wysokoobrotowe obrabiarki, takie jak strugarki, frezarki, szlifierki czy piły tarczowe, a także niektóre maszyny włókiennicze.

Badania prowadzone przez Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi (IMP) na 233 stanowiskach pracy wykazały, że spodziewane poziomy hałasu ultradźwiękowego oraz częstość przekroczeń wartości dopuszczalnych zależą od rodzaju urządzeń (Pawlaczyk-Łuszczczyńska i in. 2007b):

- maszyny do obróbki tkanin oraz gilotyny ultradźwiękowe – we wszystkich analizowanych przypadkach poziomy równoważne przekraczały wartości dopuszczalne dla

- 8-godzinnej ekspozycji; w maszynach do tkanin często występowały także przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów maksymalnych,
- zgrzewarki ultradźwiękowe – przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów równoważnych obserwowano w większości przypadków, a istotna część stanowisk wykazywała również przekroczenia poziomów maksymalnych; w ujęciu ogólnym zgrzewarki należą do najistotniejszych źródeł narażenia,
 - myjki ultradźwiękowe – przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów równoważnych występowały rzadziej niż w przypadku zgrzewarek i maszyn do tkanin; na wielu stanowiskach nie odnotowano przekroczeń poziomów maksymalnych,
 - szlifierki – często rejestrowano przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów równoważnych w pasmach $10 \div 16$ kHz; przekroczenia poziomów maksymalnych były rzadsze,
 - piły, strugarki oraz procesy spawania i cięcia (plazmowego i palnikowego) – odnotowywano sporadyczne przekroczenia poziomów równoważnych w pasmach dźwięków wysokiej częstotliwości, natomiast przekroczenia poziomów maksymalnych występowały generalnie sporadycznie.

Na analizowanych stanowiskach pracy kluczowym pasmem emisji ultradźwięków było pasmo 1/3-oktawowe o częstotliwości środkowej 20 kHz (tab. 1). W jego obrębie najczęściej rejestrowano najwyższe poziomy dźwięku oraz przekroczenia wartości dopuszczalnych, szczególnie podczas pracy zgrzewarek ultradźwiękowych i maszyn do obróbki tkanin. Charakterystyczna dla wielu źródeł technicznych częstotliwość pracy wynosząca około 20 kHz powoduje dominację energetyczną tego pasma w widmie hałasu ultradźwiękowego oraz relatywnie częste przekraczanie normatywów zarówno dla poziomów równoważnych, jak i maksymalnych.

Warto zauważyć, że przedstawione w tabeli 1 wyniki pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego nie uwzględniały poprawek związanych z aparaturą pomiarową, które zostały wprowadzone w późniejszych metodach oceny hałasu ultradźwiękowego (Radosz 2015). Mimo to

wnioski dotyczące wpływu hałasu ultradźwiękowego na środowisko pracy pozostają aktualne. Szczególnie istotne jest to w przypadku operatorów technologicznych urządzeń ultradźwiękowych, takich jak zgrzewarki czy myjki, dla których hałas ten stanowi znaczący czynnik ryzyka. Podobne obserwacje wynikają z badań prowadzonych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB), (Pleban i in. 2021; Smagowska 2013). Wykazano bowiem, że w przypadku operatorów technologicznych urządzeń ultradźwiękowych równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3-oktawowych osiągały wartości ok. $55 \div 121$ dB, natomiast poziomy maksymalne sięgały nawet 128 dB. W przypadku procesów obróbki metalu oraz pracy z narzędziami pneumatycznymi w pomiarach rejestrowano równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3-oktawowych w zakresie $81 \div 105$ dB, natomiast poziomy maksymalne sięgały nawet 122 dB, co często przekraczało obowiązujące w Polsce wartości dopuszczalne. Najwyższe poziomy odnotowano podczas żłobienia łukiem węglowym oraz cięcia krat pomostowych, natomiast nieco niższe wartości rejestrowano przy spawaniu łukiem krytym. Pracownicy opisują hałas jako uporczywy, przenikliwy i uciążliwy, utrudniający komunikację oraz powodujący zmęczenie. Autorzy podkreślają, że ekspozycja na ultradźwięki stanowi istotny problem higieniczny, który wymaga zarówno działań prewencyjnych, jak i doskonalenia metod pomiarowych oraz oceny ryzyka zawodowego.

Ultradźwięki o częstotliwościach rzędu kilkudziesięciu kHz charakteryzują się krótką długością fali i znacznym tłumieniem w ośrodku powietrznym. W praktyce oznacza to, że rozchodzą się na relatywnie krótkie odległości oraz łatwo ulegają rozproszeniu i pochłonięciu przez przeszkody czy ściany pomieszczeń. Niemniej jednak zagrożenie nie ogranicza się do bezpośredniego sąsiedztwa ucha operatora. W przypadku urządzeń o charakterze impulsowym lub lokalnym (np. gilotyn czy sonotrod stosowanych w zgrzewarkach) rozkłady poziomów akustycznych wskazują na istotne oddziaływanie hałasu w odległości ok. $1 \div 2$ m od źródła. W konsekwencji możliwe jest stosunkowo skuteczne ograniczenie emisji hałasu ultradźwiękowego poprzez zastosowanie obudów urządzeń lub ekranów pochłaniających, nawet wykonanych

Tabela 1. Charakterystyka poziomów hałasu ultradźwiękowego emitowanego przez wybrane urządzenia technologiczne i maszyny – wyniki pomiarów terenowych (Pawłaczyk-Łuszczynska i in. 2007b)
Table 1. Characteristics of ultrasonic noise levels emitted by selected technological devices and machines – results of field measurements (Pawłaczyk-Łuszczynska i in. 2007b)

Typ urządzenia / procesu	Dominująca częstotliwość robocza, kHz	Zakresy równoważnych poziomów, $L_{\text{eq},T_{\text{eq}}}$ dB	Zakresy maksymalnych poziomów, L_{max} dB	Najczęściej przekroczone pasma tercjowe	Udział stanowiący z przekroczeniami, $L_{\text{eq},80\text{v}}$ %	Udział stanowiący z przekroczeniami L_{max} %	Charakter emisji
Zgrzewarki ultradźwiękowe	20/31,5	54 ÷ 129	60 ÷ 137	16 ÷ 25 kHz (lokalnie 31,5 ÷ 40 kHz)	59,5	33,5	silnie tonalny charakter; duże wahania amplitudy; emisja punktowa wokół sonotrody
Maszyny do obróbki tkanin	20	62 ÷ 129	64 ÷ 137	16 ÷ 25 kHz	100	83,3	ciągła, szerokopasmowa emisja z wyraźnym maksimum na 20 kHz; wysoka energia akustyczna
Gilotyny/noże ultradźwiękowe	20	56 ÷ 104	59 ÷ 108	20 kHz (niekiedy 16 kHz)	100	71,4	impulsowy charakter emisji; krótkie czasy działania; silne pola w odległości 1 ÷ 2 m
Mijki ultradźwiękowe	25 ÷ 40	65 ÷ 112	70 ÷ 120	25 ÷ 31,5 kHz	42,9	14,3	źródło zamknięte (wanna); wysokie poziomy w bezpośrednim otoczeniu otwartej pokryw
Szlifierki / obrabiarzki wysokobrotowe	–	68 ÷ 104	73 ÷ 115	10 ÷ 16 kHz	75	<10	składowe ultradźwiękowe generowane wtórnie; zależność od rodzaju materiału i prędkości
Pły i strugarki	–	60 ÷ 95	65 ÷ 105	10 ÷ 16 kHz	28,6	<10	emisja szerokopasmowa; przekroczenia głównie w dolnych pasmach wysokiej słyszalności
Spawanie/cięcie (plazma, palniki)	–	70 ÷ 100	75 ÷ 110	10 ÷ 16 kHz	10 ÷ 20	0	sporadyczne przekroczenia; sygnał impulsowy, zależny od prądu i natężenia łuku
Urządzenia odstraszające (psy, gryzonie)	20 ÷ 40	80 ÷ 110	85 ÷ 120	25 ÷ 40 kHz	–	–	emisja wąskopasmowa; długotrwała, często poza zakresem słyszenia

z prostych materiałów. Z drugiej strony bezpośredni kontakt ciała z pracującym urządzeniem ultradźwiękowym (lub sprzężenie przez medium ciekłe) może znacząco zwiększać efektywną dawkę, ponieważ organizm odbiera wówczas energię drgań bez tłumienia w powietrzu. Dlatego wytyczne bhp zalecają unikanie bezpośredniego kontaktu fizycznego z generatorem ultradźwięków oraz skupiają się na ocenie pola akustycznego w powietrzu.

METODA POMIARU HAŁASU ULTRADŹWIEKOWEGO W ŚRODOWISKU PRACY

Metodę pomiaru hałasu ultradźwiękowego opisuje norma PN-Z-01339:2020. Norma ta określa sposób pomiaru wielkości charakteryzujących hałas ultradźwiękowy w środowisku pracy oraz procedurę wyznaczania równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego tego hałasu. Metoda ta znajduje zastosowanie w odniesieniu do wszystkich rodzajów hałasu ultradźwiękowego, niezależnie od charakteru jego zmienności w czasie. Norma precyzuje metodykę pomiaru wielkości charakteryzujących hałas ultradźwiękowy, obejmującą pasma tercjowe o częstotliwościach środkowych $10 \div 40$ kHz. Odwołuje się do Polskich Norm z zakresu akustyki i elektroakustyki, w tym m.in. do: PN-EN ISO 9612 (procedura wyznaczania zawodowej ekspozycji na hałas), PN-EN 61672-1 (wymagania dotyczące mierników poziomu dźwięku), PN-EN 61260-1 (wymagania dla filtrów 1/3-oktawowych), PN-EN 61094-4 (wymagania dla mikrofonów), PN-EN IEC 60942 (wymagania dla kalibratorów) oraz, w zakresie oceny niepewności pomiaru, do przewodnika „Guide to the expression of uncertainty in measurement” (ISO/IEC Guide 98-3). Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej obejmują stosowanie mierników lub analizatorów klasy 1, zgodnych z normami PN-EN 61672-1 oraz PN-EN 61260-1 (co najmniej do 20 kHz), wyposażonych w filtry tercjowe w zakresie $10 \div 40$ kHz oraz mikrofony pola swobodnego spełniające wymagania normy PN-EN 61094-4. Preferowany jest pomiar bez siatki ochronnej mikrofonu. Jeżeli jednak zastosowanie siatek lub osłon (np. przeciwwietrznych czy stożkowych) jest konieczne, norma wymaga wprowadzenia udokumentowanej poprawki częstotliwościowej (przykłady takich korekt przedstawiono w Załączniku B).

Kalibratory powinny spełniać wymagania normy PN-EN IEC 60942 (klasa 1) oraz być wyposażone w odpowiednie adaptory dostosowane do średnicy mikrofonu. Wskazano również obowiązek okresowej weryfikacji zgodności przyrządów w laboratoriach zapewniających spójność pomiarową.

Norma precyzuje warunki środowiskowe wykonywania pomiarów (temperatura $13 \div 33^{\circ}\text{C}$, ciśnienie $970 \div 1050$ hPa, wilgotność $25 \div 90\%$). Przed każdą serią pomiarową należy wykonać sprawdzenie poprawności działania toru pomiarowego. Pomiary prowadzi się w obecności pracownika. Dla każdej wyodrębnionej czynności należy wykonać co najmniej trzy pomiary poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach $10 \div 40$ kHz.

Metodyka obliczeń jest spójna z podejściem przyjętym w normie PN-EN ISO 9612 i opiera się na koncepcji podziału dnia pracy na „czynności” o określonym czasie trwania. Dla każdego pasma tercjowego oblicza się równoważny poziom ciśnienia akustycznego odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy ($L_{fi,eq,8h}$), ważony czasem trwania poszczególnych czynności. W przypadku nierównomiernego obciążenia w ciągu tygodnia norma przewiduje obliczenie równoważnego poziomu hałasu odniesionego do przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy ($L_{fi,eq,w}$).

Szczegółowo ujęto zagadnienie niepewności pomiarowej. Załącznik C (normatywny) opisuje składowe niepewności, obejmujące m.in. rozrzut próbek, charakterystyki metrologiczne aparatury, pozycję mikrofonu oraz estymację czasu trwania czynności. Norma wymaga, aby w sprawozdaniu końcowym, oprócz wartości zmierzonych, podawana była również niepewność rozszerzona wraz ze współczynnikiem rozszerzenia ($k = 1,65$), odpowiadającym jednostronnemu 95-procentowemu przedziałowi ufności. Jednocześnie norma zastrzega, że przy ocenie zgodności z wymaganiami prawnymi (wartościami dopuszczalnymi) uwzględnia się wyłącznie wartość zmierzoną, bez uwzględniania niepewności pomiaru, co zostało jednoznacznie określone w części dotyczącej prezentacji wyników.

Sprawozdanie zgodne z normą PN-Z-01339:2020 powinno zawierać informacje ogólne (identyfikację zlecającego, wykonawcy oraz stanowisk), analizę warunków pracy (opis stanowisk, wykonywanych czynności, źródeł hałasu oraz zastosowanych środków ograniczających), wykaz aparatury wraz z danymi metrologicznymi

(w tym zastosowane poprawki), opis warunków środowiskowych oraz procedur kalibracji, a także pełne wyniki pomiarów, obliczenia $L_{fi,eq,8h}/L_{fi,eq,w}$ oraz $L_{fi,max}$, oszacowaną niepewność pomiaru i wnioski końcowe.

Norma PN-Z-01339 jest spójna z krajowymi wymaganiami prawnymi dotyczącymi wartości dopuszczalnych hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy, określonymi w rozporządzeniu Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Norma ta dostarcza pełnej metodyki pomiarowo-obliczeniowej służącej do ich praktycznej weryfikacji.

PRZEGLĄD TREŚCI DOKUMENTACJI WARTOŚCI DOPUSZCZALNYCH Z 2001 ROKU

W 2001 r. opublikowano obszerną dokumentację proponowanych wartości dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego na hałas ultradźwiękowy (Pawlaczyk-Łuszczńska i in. 2001). Dokument ten stanowił przegląd ówczesnego stanu wiedzy na temat zagrożeń związanych z ultradźwiękami oraz zawierał propozycje kryteriów oceny i wartości dopuszczalnych, które stały się podstawą późniejszych regulacji prawnych. W dokumencie zdefiniowano hałas ultradźwiękowy w środowisku pracy jako zakres pasm 1/3-oktawowych o częstotliwościach środkowych 10 ÷ 40 kHz. Podkreślono, że hałas ultradźwiękowy często współwystępuje z hałasem wysokoczęstotliwościowym w zakresie słyszalnym. Przywołano również wcześniejsze definicje normatywne (PN-N-01323:1986), które historycznie poszerzały zakres nawet do 100 kHz. Wskazano także typowe źródła hałasu ultradźwiękowego, takie jak technologiczne urządzenia ultradźwiękowe niskich częstotliwości (myjki i płuczki, zgrzewarki, drążarki, lutownice ręczne, wanny do cynowania), a także urządzenia o emisji aerodynamicznej lub mechanicznej (sprężarki, palniki, zawory, narzędzia pneumatyczne, maszyny wysokoobrotowe, takie jak strugarki, frezarki, szlifierki, piły oraz niektóre maszyny włókiennicze). Część dotycząca skutków zdrowotnych stanowi przegląd danych z badań środowiskowych i laboratoryjnych, ze szczególnym uwzględnieniem zarówno skutków słuchowych, jak i pozasłuchowych.

Dokumentacja podkreśla, że ekspozycja na hałas ultradźwiękowy może prowadzić do ubytków słuchu, a także do objawów wynikających z oddziaływania na układ przedsionkowy, takich jak bóle i zawroty głowy, zaburzenia równowagi czy nudności, oraz do reakcji o charakterze wegetatywnym. Historyczne obserwacje czasowego przesunięcia progu słyszenia (TTS, ang. *temporary threshold shift*) oraz trwałego przesunięcia progu słyszenia (PTS, ang. *permanent threshold shift*) omówiono w kontekście zjawisk nieliniowych oraz generowania subharmonicznych, zachodzących w uchu, które mogą powodować powstawanie składowych słyszalnych pomimo „niesłyszalności” składowej podstawowej >16 ÷ 20 kHz. Innymi słowy, bardzo głośny sygnał, np. 25 kHz, może w uchu prowadzić do powstania „wtórnej” składowej o częstotliwości ok. 12,5 kHz, wywołując wrażenie dźwiękowe i jednocześnie obciążając narząd słuchu. Badania prowadzone od początku lat 2000 wskazywały, że długotrwała ekspozycja zawodowa na ultradźwięki może prowadzić do podwyższenia progów słyszenia w zakresie wysokich częstotliwości audiometrycznych (powyżej 10 kHz). Przykładowo Grzesik i Pluta (1978; 1983; 1986a; 1986b) wykazali istotne pogorszenie słuchu w zakresie 10 ÷ 16 kHz u operatorów urządzeń ultradźwiękowych w porównaniu z grupą kontrolną. Co istotne, u badanych osób współwystępował również hałas wysokoczęstotliwościowy, co utrudniało jednoznaczne rozdzielenie wpływu hałasu ultradźwiękowego od hałasu w zakresie słyszalnym. Niemniej jednak literatura do 2001 r. wskazywała na szkodliwy wpływ ultradźwięków na narząd słuchu – zarówno bezpośredni, jak i pośredni, wynikający z obecności towarzyszących składowych słyszalnych.

Poza uszkodzeniami słuchu hałas ultradźwiękowy może wpływać niekorzystnie także na inne układy organizmu. Pracownicy narażeni na intensywne ultradźwięki zgłaszali bóle i zawroty głowy, uczucie ucisku w skroniach, zaburzenia równowagi i nudności (związane z podrażnieniem układu przedsionkowego), a także ogólne zmęczenie, rozdrażnienie i uczucie niepokoju. Mechanizmy tych efektów nie są do końca wyjaśnione i mogą wynikać z kombinacji różnych czynników, takich jak stymulacja przedsionkowa (wpływ drgań na błędnik przy drganiach czaszki), oddziaływanie na autonomiczny układ nerwowy (odruchowe reakcje wegetatywne organizmu na bodźce akustyczne wysokiej częstotliwości) czy też efekt placebo lub mechanizmy

psychosomatyczne u osób świadomych ekspozycji. Niezależnie od mechanizmu, z punktu widzenia bhp występowanie takich objawów uznaje się za sygnał zagrożenia. Nieliczne badania potwierdziły istnienie udokumentowanych efektów pozasłuchowych przy ekspozycji na powietrzne ultradźwięki o dużej intensywności, jednocześnie podkreślając brak wystarczającej liczby aktualnych danych ilościowych oraz potrzebę dalszych badań w tym zakresie. Przy ekstremalnie wysokich poziomach ultradźwięków możliwe są również bezpośrednie efekty termiczne, związane z ogrzewaniem tkanek. Według raportu Światowej Organizacji Zdrowia (WHO, ang. *World Health Organization*) z 1982 r. oraz przeglądu Health Canada (1991), poziomy przekraczające 155 dB mogą powodować odczuwalne nagrzewanie oraz oparzenia skóry. W praktyce jednak tak wysokie natężenia nie występują w typowych warunkach środowiska pracy w powietrzu – obserwowano je raczej w sytuacjach kontaktu z ultradźwiękami w ośrodkach ciekłych lub stałych. Dla powietrza przyjmuje się zasadę, że całkowity poziom ciśnienia ultradźwięków docierających do ciała nie powinien przekraczać ok. 137 dB, przy czym wartość ta uwzględnia już margines bezpieczeństwa względem progu rzędu 140 dB, przy którym notowano lokalne efekty termiczne, w tym nagrzewanie skóry.

Zbiór badań (głównie z lat 60. i 80.) wskazuje na zmiany czynnościowe ośrodkowego układu nerwowego oraz układu krążenia przy poziomach rzędu 90 ÷ 120 dB dla niższych częstotliwości ultradźwiękowych. Jednocześnie podkreśla się ograniczenia metodologiczne dawnych pomiarów oraz współwystępowanie hałasu wysokoczęstotliwościowego i czynników technologicznych (np. rozpuszczalników stosowanych przy myciu).

Dokumentacja zwraca uwagę, że objawy subiektywne oraz dyskomfort mogą pojawiać się już przy poziomach 75 ÷ 105 dB w pasmach 10 ÷ 20 kHz u osób wrażliwych, natomiast w zakresie 20 ÷ 40 kHz obserwowano progi dla zmian czynnościowych w okolicach 100 ÷ 110 dB. W podsumowaniu tej części autorzy podkreślają potrzebę przeprowadzenia nowych, dobrze kontrolowanych badań.

Na tle przeglądu kryteriów międzynarodowych (Acton, Parrack, IRPA, ACGIH) dokument uzasadnia krajowe podejście do oceny hałasu ultradźwiękowego, oparte na równoważnych poziomach

w pasmach tercjowych oraz poziomach maksymalnych. Wskazuje się, że pierwsze propozycje wartości granicznych oparto na przewencji skutków subiektywnych w paśmie 10 ÷ 20 kHz oraz na zapobieganiu uszkodzeniom słuchu poprzez ograniczanie ekspozycji w paśmie 25 ÷ 40(50) kHz. ACGIH (ang. *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) w latach 1998–2000 doprecyzowała podejście poprzez wprowadzenie wartości skorygowanych czasowo (TWA, ang. *time-weighted average*,) dla zakresu 10 ÷ 20 kHz oraz wartości maksymalnych (ang. *ceiling*) do 100 kHz. Istotnym wkładem omawianej dokumentacji jest uzasadnienie oraz propozycja krajowych wartości dopuszczalnych w Polsce.

Dla ogółu pracowników wartości NDN obowiązują równocześnie dla dwóch wskaźników: równoważnych poziomów odniesionych do 8-godzinnego dnia pracy (lub tygodnia pracy w przypadku nierównomiernej ekspozycji) oraz poziomów maksymalnych w pasmach tercjowych 10 ÷ 40 kHz. Dokumentacja formułuje również bardziej rygorystyczne wartości dla grup szczególnie wrażliwych (kobiet w ciąży oraz młodocianych), obniżając progi dla wartości równoważnych, przy jednoczesnym utrzymaniu wartości maksymalnych na poziomach zbliżonych lub nieznacznie niższych.

Ważnym elementem dokumentacji jest przegląd rzeczywistych poziomów ciśnienia akustycznego zmierzonych w krajowych zakładach pracy. Zestawiono rozpiętości poziomów tercjowych dla myjek, zgrzewarek, drążarek, narzędzi pneumatycznych, maszyn do obróbki oraz maszyn włókienniczych, a także w otoczeniu urządzeń do odstraszenia gryzoni.

Analiza wyników prowadzi do wniosku, że przekroczenia wartości NDN (8-godzinne) występują najczęściej i niemal wyłącznie w paśmie do 40 kHz, przy czym największe przekroczenia występują zwykle w zakresie 10 ÷ 20 kHz. Powyżej 50 kHz przekroczenia zarówno wartości równoważnych, jak i maksymalnych zasadniczo nie są notowane, natomiast wartości maksymalne mogą być przekraczane przy technologicznych urządzeniach ultradźwiękowych oraz sporadycznie przy narzędziach pneumatycznych i maszynach włókienniczych, nadal jednak w granicach do 40 kHz.

Dane te uzasadniają decyzję o zawężeniu formalnej oceny do zakresu 10 ÷ 40 kHz oraz odwołują się

do rzeczywistych ograniczeń ówczesnej aparatury pomiarowej. Dokumentacja wprowadza również zagadnienie badań profilaktycznych (wstępnych, okresowych, kontrolnych) dla osób narażonych na hałas ultradźwiękowy, wskazując narządy krytyczne (słuch, układ nerwowy; postulowane jest także rozszerzenie o układ przedsionkowy) oraz proponując ujednolicenie ich okresowości z przepisami dotyczącymi hałasu słyszalnego.

W dokumentacji zaproponowano:

- przyjęcie jako podstawy oceny narażenia na hałas ultradźwiękowy równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego odniesionych do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy oraz maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego, określonych w pasmach tercjowych,
- ograniczenie zakresu oceny do pasm tercjowych o częstotliwościach środkowych z przedziału 10 ÷ 40 kHz,
- utrzymanie w tych pasmach tercjowych dotychczasowych wartości dopuszczalnych ze względu na ochronę zdrowia (NDN), w tym również w odniesieniu do stanowisk pracy grup pracowników o szczególnej wrażliwości, takich jak kobiety w ciąży oraz osoby młodociane.

WARTOŚCI DOPUSZCZALNE
HAŁASU ULTRADŹWIĘKOWEGO

Aktualnie w Polsce oceny hałasu ultradźwiękowego dokonuje się na podstawie rozporządzenia Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU 2018, poz. 1286). W rozporządzeniu tym określono dopuszczalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy, ustalone dla poszczególnych pasm tercjowych w zakresie częstotliwości 10 ÷ 40 kHz (tab. 2). Podano je w postaci:

- dopuszczalnego, dla każdego pasma tercjowego, poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy ($L_{dop,8h}$ lub $L_{dop,w}$),
- dopuszczalnego, dla każdego pasma tercjowego, maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego ($L_{dop,max}$).

W odniesieniu do prac wzbronionych kobietom i młodocianym obowiązują następujące akty prawne:

1. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 3 kwietnia 2017 r. w sprawie wykazu prac uciążliwych, niebezpiecznych lub szkodliwych dla zdrowia kobiet w ciąży i kobiet karmiących dziecko piersią.
2. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 19 czerwca 2023 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym i warunków ich zatrudniania przy niektórych z tych prac.

Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego w przypadku zawodowego narażenia kobiet w ciąży przedstawiono w tabeli 3, natomiast w przypadku zawodowego narażenia osób młodocianych – w tabeli 4.

Tabela 2. Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego, ustalone ze względu na ochronę zdrowia pracowników
Table 2. Occupational exposure limits for ultrasonic noise established to protect workers' health

Częstotliwość środkowa pasm tercjowych, kHz	Dopuszczalny poziom ciśnienia akustycznego odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy, $L_{dop,8h}$ lub $L_{dop,w}$ dB	Dopuszczalny maksymalny poziom ciśnienia akustycznego, $L_{dop,max}$ dB
10; 12,5; 16	80	100
20	90	110
25	105	125
31,5; 40,	110	130

Tabela 3. Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego w odniesieniu do kobiet ciężarnych
Table 3. Permissible levels of ultrasonic noise under occupational exposure for pregnant women

Częstotliwość środkowa pasm tercjowych, kHz	Dopuszczalny poziom ciśnienia akustycznego odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy, $L_{dop,8h}$ lub $L_{dop,w}$ dB	Dopuszczalny maksymalny poziom ciśnienia akustycznego, $L_{dop,max}$ dB
10; 12,5; 16	75	100
20	85	110
25	100	125
31,5; 40,	105	130

Tabela 4. Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego w odniesieniu do osób młodocianych
Table 4. Permissible levels of ultrasonic noise under occupational exposure for young workers

Częstotliwość środkowa pasm tercjowych, kHz	Dopuszczalny poziom ciśnienia akustycznego odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy, $L_{dop,8h}$ lub $L_{dop,w}$ dB	Dopuszczalny maksymalny poziom ciśnienia akustycznego, $L_{dop,max}$ dB
10; 12,5; 16	75	100
20	85	110
25	100	125
31,5; 40,	105	130

Z przeglądu przepisów dotyczących wartości dopuszczalnych wynika, że niewiele krajów posiada odrębne, obowiązujące przepisy prawne regulujące ekspozycję na ultradźwięki w środowisku pracy; najczęściej przyjmowane są one w formie zaleceń lub norm instytucji bhp, opartych na międzynarodowych wytycznych (tab. 5.). Historycznie kluczową rolę odegrały tymczasowe wytyczne International Radiation Protection Association (IRPA) z 1984 r., które zalecały dla ekspozycji zawodowej wartość 110 dB SPL dla częstotliwości powyżej 20 kHz oraz znacznie niższy próg 75 dB SPL dla pasma 20 kHz, co wiązano z możliwością odczuwania ultradźwięków na granicy słyszalności człowieka.

Wiele państw, w tym Polska, Francja, Wielka Brytania i Niemcy, przyjęło te wytyczne lub bardzo zbliżone wartości jako podstawę krajowych rekomendacji. Jednocześnie Niemcy, Francja i Wielka Brytania nie wprowadziły odrębnych limitów ekspozycji, zalecając opieranie się na danych literaturowych oraz standardach międzynarodowych. W Niemczech zwraca się ponadto uwagę na brak jednoznacznych kryteriów ochronnych dla częstotliwości powyżej 8 kHz, co wiąże się z ograniczoną liczbą dostępnych badań.

Z kolei Stany Zjednoczone i Kanada opracowały własne wytyczne. ACGIH (USA) początkowo przyjmował poziomy podobne do zaleceń IRPA (105 ÷ 115 dB powyżej 20 kHz), jednak nowsze rekomendacje podwyższyły dopuszczalne wartości o 30 dB (do 140 ÷ 145 dB SPL w pasmach ultradźwiękowych 25 ÷ 100 kHz), pod warunkiem

braku kontaktu ultradźwięków z ciałem, co wynika z oceny, że wcześniejsze limity były nadmiernie rygorystyczne. Natomiast Health Canada utrzymała bardziej konserwatywne podejście, określając dopuszczalne poziomy na 75 dB dla pasma 16 ÷ 20 kHz oraz 110 dB dla częstotliwości powyżej 20 kHz.

Istotnym argumentem przemawiającym za aktualizacją polskich przepisów jest fakt, że krajowe limity różnią się znacząco od zaleceń uznanych instytucji międzynarodowych. W niektórych przypadkach są mniej restrykcyjne, w innych bardziej, co wskazuje na brak spójnego standardu. Przykładowo IRPA (1984) dla ekspozycji zawodowej rekomendowała maksymalny poziom 75 dB w paśmie 20 kHz, argumentując, że dolna część tego pasma może być słyszalna dla młodych pracowników. Health Canada w kodeksie bezpieczeństwa z 1991 r. przyjęła wartość 75 dB jako dopuszczalny poziom dla 8-godzinnej ekspozycji przy 20 kHz, zaostrezając tym samym wcześniejszy limit wynoszący 110 dB. Zmianę tę uzasadniano faktem, że częstotliwości z zakresu ok. 16 ÷ 20 kHz znajdują się na granicy słyszalności, a nawet częściowa percepcja ultradźwięków może powodować dyskomfort, dlatego limit powinien być zbliżony do progu słyszenia osób najbardziej wrażliwych. Na tym tle polska norma wynosząca 90 dB dla 20 kHz wydaje się stosunkowo wysoka, przewyższając zalecenia IRPA i Kanady o 15 dB. Z kolei amerykańskie wytyczne ACGIH (Threshold Limit Values) przez długi czas dopuszczały znacznie łagodniejsze kryterium w tym paśmie – 105 dB przy 20 kHz dla ekspozycji ciągłej.

Tabela 5. Porównanie dopuszczalnych poziomów ultradźwięków w środowisku pracy w wybranych krajach
Table 5. Comparative permissible levels of ultrasonic noise in occupational settings in selected countries

Kraj	Przepisy	Dopuszczalne wartości ekspozycji	Uwagi	Źródło / podstawa
Stany Zjednoczone (USA)	brak odrębnych przepisów federalnych; stosowane są zalecenia ACGIH (TLV). OSHA nie określa osobnych limitów dla ultradźwięków, ale odwołuje się do wartości TLV	10 ÷ 20 kHz: 105 dB (wartość szczytowa; TWA 8h ~88 ÷ 94 dB) >20 kHz: 115 dB (wartość szczytowa przy potencjalnym kontakcie ciała z medium; 145 dB jeśli brak sprzężenia ultradźwięków z ciałem)	wyższe poziomy mogą wywołać subiektywne efekty (np. dyskomfort)	ACGIH TLVs (2024); OSHA Technical Manual (wzmianka o TLV)
Kanada	wytyczne rządowe (Safety Code 24, Health Canada, 1991); brak oddzielnej regulacji prawnej	16 ÷ 20 kHz: 75 dB (1/3-oktawowe pasma 16 kHz i 20 kHz) 25 ÷ 50 kHz: 110 dB (pasma 25, 31,5, 40, 50 kHz)	limity niezależne od czasu ekspozycji; można przekroczyć tylko przy ochronnikach słuchu redukujących poziom do limitu	Health Canada – Guidelines for Safe Use of Ultrasound: Part II (Safety Code 24)
Francja	brak osobnych przepisów ustawowych; zalecenia INRS oparte na wytycznych IRPA 1984	8 ÷ 20 kHz: 75 dB (1/3-oktawowe pasma 8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz) 20 ÷ 50 kHz: 110 dB (1/3-oktawowe pasma 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz, 50 kHz)	limity dla ekspozycji 8-godzinnej; przy krótszych ekspozycjach dopuszcza się korektę +3 do +9 dB	INRS – rekomendacje bhp (2006); IRPA/INIRC 1984 (wytyczne tymczasowe)
Niemcy	brak oficjalnych norm; wytyczna techniczna VDI 3766:2012	brak ustalonych krajowych wartości; stosuje się zalecenia międzynarodowe (IRPA 1984: 75 dB przy 20 kHz, 110 dB dla >20 kHz)	brak kryteriów oceny powyżej 8 kHz z powodu niewystarczających danych	VDI 3766:2012 (wytyczne inżynierskie); publikacje DGUV/IFA
Wielka Brytania (UK)	brak specyficznych limitów; obowiązują ogólne przepisy dot. hałasu w pracy (nie uwzględniające eksplicite >20 kHz); HSE i PHE zalecają kierowanie się wytycznymi IRPA/WHO	brak własnych norm; zaleca się nieprzekraczanie 75 ÷ 85 dB (10 ÷ 20 kHz) i 105 ÷ 110 dB (>20 kHz)	poziomy uznane międzynarodowo za bezpieczne, aby zapobiec uciążliwości i efektom subiektywnym	HSE Research Report CRR 343 (2001); wytyczne WHO/IRPA 1984
Japonia	wytyczne rządowe (Ministerstwo Pracy 1971); aktualne normy oparte na tych wcześniejszych ustaleniach	8 ÷ 16 kHz: 90 dB (1/3-oktawowe pasma 8 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz) ≥20 kHz: 110 dB (1/3-oktawowe pasma 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz, 40 kHz, 50 kHz)	limity zapobiegają dolegliwościom subiektywnym i efektom fizjologicznym	Normy Japonii (1971) – za: INRS/Health Canada
Rosja (d. ZSRR)	normy higieniczne z 1975 r.; współcześnie prawdopodobnie nadal stosowane	12,5 kHz: 75 dB 16 kHz: 85 dB 20 ÷ 50 kHz: 110 dB (1/3-oktawowe pasma)	normy rygorystyczne w okolicy granicy słyszalności, związane z higieną pracy	Normy ZSRR (1975) – za: publ. IRPA/Health Canada
Szwecja	zalecenia państwowe (Arbetskysdssstyrelsen, ok. 1978); niewiążące prawnie	16 kHz: brak oficjalnego limitu 20 kHz: 105 dB 25 kHz: 110 dB 31,5 ÷ 50 kHz: 115 dB	wartości zbliżone do późniejszych wytycznych ACGIH; bardziej liberalne niż IRPA przy 20 kHz	Rekomendacje Szwecji (1978) – za: INRS/OSHA

Różnice w dopuszczalnych poziomach ultradźwiękowych wynikają z odmiennej interpretacji danych. ACGIH uznała, że najniższe częstotliwości ultradźwiękowe (ok. 20 kHz) powinny podlegać tym samym zasadom co zwykły hałas wysokoczęstotliwościowy, stąd przyjęto pułap 105 dB, zbliżony do ochrony słuchu przed dźwiękami słyszalnymi. Jeszcze dalej posunęła się w latach 80.–90. amerykańska Occupational Safety and Health Administration (OSHA), która przez pewien czas zezwalała na dodatkowe podniesienie

dopuszczalnego poziomu ultradźwięków o 30 dB, pod warunkiem braku obecności składowych słyszalnych. W praktyce oznaczało to akceptację poziomów rzędu ok. 135 dB zamiast 105 dB dla czysto ultradźwiękowego hałasu. Tak liberalne podejście spotkało się jednak z krytyką i obecnie zostało zastąpione bardziej ostrożnymi wytycznymi. Niemniej jednak powyższe przykłady wskazują, że rozpiętość dopuszczalnych poziomów dla 20 kHz w różnych przepisach i zaleceniach mieści się w zakresie 75 ÷ 105 dB.

WPŁYW HAŁASU ULTRADŹWIĘKOWEGO NA ORGANIZM CZŁOWIEKA W ŚWIELE NAJNOWSZYCH BADAŃ

Skutki słuchowe

Współczesne badania nad wpływem hałasu ultradźwiękowego w powietrzu na narząd słuchu koncentrują się głównie na ocenie przejściowego (TTS) i trwałego (PTS) przesunięcia progów słyszenia. Szczególną rolę odgrywa audiometria wysokoczęstotliwościowa, rozszerzona poza standardowy zakres. W raporcie przeglądowym dla brytyjskiego Health and Safety Executive (HSE), (Lawton 2001) podkreślono, że dla dźwięków o bardzo wysokich częstotliwościach (VHF, ang. *very high frequencies*) i ultradźwięków kluczowe jest uwzględnienie zarówno progu percepcji, jak i możliwych skutków audiologicznych w kategoriach zmian progowych, ze szczególnym naciskiem na pasma powyżej 8 kHz.

Badania terenowe prowadzone w ostatnich dwóch dekadach wskazują, że pracownicy obsługujący urządzenia emitujące ultradźwięki mogą doświadczać pogorszenia słuchu w zakresie wyższych częstotliwości słyszalnych. Macca i in. (2015) stwierdzili istotne podwyższenie progów słuchu w zakresie 10 ÷ 14 kHz u 24 pracowników narażonych na ultradźwięki w środowisku przemysłowym, w porównaniu do grupy kontrolnej liczącej 148 osób nienarażonych. Różnica ta utrzymywała się nawet po uwzględnieniu wpływu wieku i typowego hałasu.

Również Mehrparvar i in. (2014) oraz nowsze badania przeprowadzone przez Instytut Medycyny Pracy w Łodzi wykazały u osób narażonych na ultradźwięki obniżoną sprawność ślimaka. W badaniach przeprowadzono kompleksową ocenę stanu słuchu operatorów technologicznych urządzeń ultradźwiękowych, porównując wyniki z starannie dobraną grupą kontrolną narażoną wyłącznie na hałas słyszalny o porównywalnym poziomie ekspozycji dobowej (Dudarewicz i in. 2022). Autorzy łączyli standardową audiometrię tonalną z audiometrią wysokoczęstotliwościową oraz rejestracją emisji otoakustycznych produktów zniekształceń (DPOAE, ang. *distortion-product otoacoustic emissions*) i przejściowo wywołanych emisji otoakustycznych (TEOAE, ang. *transient-evoked otoacoustic emissions*). Dodatkowo stosowano

kwestionariusz *Modified Amsterdam Inventory for Auditory Disability and Handicap* (mAIDAH) oraz wykonywano pomiary narażenia akustycznego w pasmach tercjowych 10 ÷ 40 kHz i w paśmie słyszalnym zgodnie z ujednoliconymi procedurami (PN-Z-01339, PN-EN ISO 9612). Środowiska pracy obejmowały głównie procesy zgrzewania i mycia ultradźwiękowego. W znacznej części stanowisk stwierdzono przekroczenie dopuszczalnych wartości hałasu ultradźwiękowego, podczas gdy poziomy hałas słyszalnego utrzymywały się na umiarkowanym poziomie. W porównaniu z grupą kontrolną nie stwierdzono różnic w progach słyszenia do ok. 3 kHz, natomiast w zakresie wyższych częstotliwości (4 ÷ 14 kHz) operatorzy systematycznie wykazywali gorszą czułość słuchu. Wyniki te potwierdziły również pomiary DPOAE i TEOAE, przy czym różnice między grupami były bardziej wyraźne w przypadku audiometrii wysokoczęstotliwościowej rozszerzonej (EHFA, ang. *extended high-frequency audiometry*) oraz DPOAE. Subiektywna samoocena funkcji słuchowych wskazywała na nieco większe trudności w rozróżnianiu dźwięków, lokalizacji źródeł oraz rozumieniu mowy, szczególnie w warunkach hałasu. Autorzy podkreślają jednocześnie trudność w rozdzieleniu wpływu składowych słyszalnych i ultradźwiękowych w łącznej dawce hałasu oraz ograniczenia wynikające z doboru i charakterystyki grup porównawczych.

W pilotażowym badaniu przeprowadzonym przez IMP oceniano stan słuchu 25 operatorów zgrzewarek ultradźwiękowych, którzy byli narażeni przez 2 ÷ 13 lat na hałas impulsowy o komponentach w zakresie 10 ÷ 40 kHz. Uzyskane progi audiometryczne porównano z wartościami przewidywanymi przez normę ISO 1999:1990 dla hałasu słyszalnego (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2007). Pomiar ekspozycji (1/3-oktawy w zakresie 10 ÷ 80 kHz, mikrofon przy uchu) wykazał częste przekroczenia polskich wartości dopuszczalnych dla hałasu ultradźwiękowego. Po uwzględnieniu efektywnego czasu pracy nadmierne poziomy odnotowano na 60% stanowisk. Poziomy ekspozycji $L_{EX,8h}$ mieściły się w szerokim zakresie wartości przy medianie wynoszącej ok. 82 dB. Często obserwowano przekroczenia 85 dB, szczególnie przy urządzeniach ~20 kHz. Mimo tak scharakteryzowanej ekspozycji nie stwierdzono istotnego postępu ubytku słuchu w standardowej audiometrii tonalnej (0,25 ÷ 8 kHz) w okresie obserwacji sięgającym ok. 7 lat.

Rzeczywiste progi w paśmie $2 \div 6$ kHz były zgodne z teoretycznymi oszacowaniami według normy ISO 1999:1990, co sugeruje, że model przewidujący skutki hałasu słyszalnego może być użyteczny także przy prognozowaniu trwałych przesunięć progu słuchu w przypadku ekspozycji obejmującej komponentę ultradźwiękową.

W kolejnych badaniach przeprowadzonych przez IMP porównano progi słyszenia 90 pracowników narażonych na hałas zgrzewarek ultradźwiękowych, obejmujący zarówno komponent ultradźwiękowy, jak i słyszalny, z grupą referencyjną 156 osób eksponowanych wyłącznie na hałas słyszalny o zbliżonych poziomach $L_{EX,sh}$ (Dudarewicz i in. 2017). W ramach badań wykonano pomiary hałasu (1/3-oktawy do 40 kHz) oraz audiometrię tonalną w zakresie standardowym i rozszerzonym (do 16 kHz). Mimo częstych przekroczeń dopuszczalnych wartości hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy, nie odnotowano różnic w progach słyszenia w zakresie $0,5 \div 6$ kHz między grupami. Natomiast w zakresie wysokich częstotliwości ($8 \div 12,5$ kHz) u pracowników narażonych na hałas z komponentą ultradźwiękową stwierdzono istotnie wyższe (gorsze) progi słyszenia, co autorzy tłumaczą odmiennym składem widmowym ekspozycji.

W innych badaniach dotyczących zmian słuchowych i pozasłuchowych u lekarzy dentystów, przeprowadzonych bezpośrednio po godzinnej pracy ze skalerami ultradźwiękowymi, zastosowano audiometrię tonalną (PTA, ang. *pure-tone audiometry*), tympanometrię z odruchem strzemiączkowym oraz emisje otoakustyczne (OAE, ang. *otoacoustic emissions*), (Chopra i in. 2016). Autorzy wykazali spójny wzorzec czasowego upośledzenia funkcji narządu słuchu, obejmujący wzrost progów słyszenia w PTA, podwyższenie progów odruchu strzemiączkowego, zmianę ciśnień w uchu środkowym oraz istotne obniżenie amplitud OAE. Wyniki te łącznie wskazują na rozwój przejściowego przesunięcia progu (TTS) z towarzyszącą dysfunkcją komórek rzęsatych ślimaka. Efekty te były asymetryczne, częściej bardziej wyraźne w uchu lewym, i współwystępowały z objawami pozasłuchowymi typowymi dla reakcji stresowej na hałas, takimi jak szum w uszach, ból ucha, zmęczenie mięśni rąk, drażliwość oraz subiektywne pogorszenie komfortu. W dyskusji podkreślono biologiczne mechanizmy, dzięki którym powtarzające się TTS oraz zmiany w OAE mogą kumulować się w czasie,

zwiększając ryzyko rozwoju trwałego uszkodzenia słuchu (PTS). Zwrócono również uwagę na znaczenie czynników modyfikujących, takich jak wiek, podatność osobnicza, organizacja pracy oraz utrzymanie sprzętu. Autorzy zalecali włączenie personelu stomatologicznego do programów ochrony słuchu, stosowanie indywidualnych ochronników słuchu, ograniczanie łącznego czasu ekspozycji oraz regularne monitorowanie słuchu, przy czym szczególnie podkreślono zastosowanie OAE jako wskaźnika wczesnych zmian. Jednocześnie zaznaczono potrzebę dalszych badań nad długoterminowymi skutkami ekspozycji na hałas z komponentami ultradźwiękowymi w praktyce stomatologicznej.

W badaniach prowadzonych w CIOP-PIB (Radosz 2025) podjęto próbę oceny krótkoterminowych skutków narażenia na hałas ultradźwiękowy zarówno dla słuchu, jak i funkcji poznawczych, wykorzystując kontrolowane, mobilne stanowisko badawcze odtwarzające warunki pracy. U 20 młodych dorosłych, spełniających kryteria prawidłowego słuchu, wykonano audiometrię tonalną w zakresie standardowym oraz rozszerzonym ($8 \div 16$ kHz) zarówno przed, jak i po godzinnej ekspozycji na sygnał emitowany przez myjkę ultradźwiękową. Ekspozycję przeprowadzono najpierw na poziomie odpowiadającym aktualnym wartościom dopuszczalnym, a następnie 5 dB poniżej tego progu. Widmo słyszalne zostało odfiltrowane w celu wyizolowania wpływu składowych ultradźwiękowych. Równolegle, podczas ekspozycji, przeprowadzono testy psychologiczne Abilitest, oceniające czas reakcji prostej i selektywnej uwagi. Badanie wykazało istotne statystycznie czasowe przesunięcia progów słyszenia przy ekspozycji na poziomie dopuszczalnym (NDN) – obustronnie w 8 kHz i 16 kHz (średnio ok. 3,8 dB i 5,8 dB), przy braku istotnych zmian po obniżeniu poziomu o 5 dB, co wskazuje na istnienie progu dawki-odpowiedzi w zakresie wysokich częstotliwości. Jednocześnie odnotowano spowolnienie odpowiedzi o ok. 20% w zadaniu reakcji prostej i o ok. 13% w zadaniu selektywnej uwagi, co potwierdza negatywny wpływ ultradźwięków na sprawność poznawczo-psychomotoryczną w trakcie narażenia.

Skutki termiczne

Ultradźwięki przenoszą energię mechaniczną, która podczas absorpcji w tkankach może przekształcać

się w ciepło. Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy, głównym zagrożeniem termicznym jest ekspozycja na ultradźwięki o ekstremalnie dużych natężeniach. Badania wykazały, że fale ultradźwiękowe w powietrzu o poziomie przekraczającym ok. 155 dB mogą powodować nadmierne nagrzewanie ciała, prowadzące do ostrych uszkodzeń tkanek, takich jak oparzenia czy uszkodzenia skóry. Już przy poziomach rzędu $140 \div 150$ dB u ludzi obserwowano wibracje włosów w przewodzie słuchowym i nosie oraz miejscowy wzrost temperatury skóry. Tak wysokie natężenia są jednak skrajnie rzadkie w typowych warunkach – występują właściwie tylko bezpośrednio przy bardzo silnych źródłach ultradźwięków. Co istotne, mniej niż 1% energii ultradźwięków w powietrzu przenika w głąb nieosłoniętej skóry, podczas gdy reszta jest odbijana. Oznacza to, że ciało ludzkie jest stosunkowo mało podatne na pochłanianie energii ultradźwiękowej z powietrza, w przeciwieństwie do sytuacji, gdy ultradźwięki są wprowadzane bezpośrednio do tkanek, na przykład poprzez głowicę ultradźwiękową w fizykoterapii (Moyano i in. 2022; Pawlaczyk-Łuszczynska, Dudarewicz 2020).

Od czasu ustalenia wstępnych wytycznych IRPA w 1984 r. nie pojawiły się nowe dane sugerujące ryzyko efektu cieplnego przy niższych poziomach ultradźwięków. Współczesne badania nad efektami termicznymi narażenia na hałas ultradźwiękowy wskazują, że wzrost temperatury w tkankach jest konsekwencją absorpcji energii fal o wysokiej częstotliwości, przy czym intensywność oraz lokalizacja tego zjawiska zależą zarówno od częstotliwości, jak i od warunków propagacji. W zakresie niskich ultradźwięków ($20 \div 100$ kHz), typowym dla urządzeń przemysłowych, energia akustyczna jest pochłaniana głównie w warstwach powierzchniowych, co prowadzi do miejscowego wzrostu temperatury skóry oraz struktur podskórnych (Ahmadi i in. 2012). Autorzy podkreślają, że w warunkach zawodowych, mimo znacznie niższych poziomów mocy niż w zastosowaniach terapeutycznych, miejscowe efekty cieplne mogą występować przy długotrwałej ekspozycji w bezpośrednim kontakcie z elementami generującymi ultradźwięki, szczególnie przy niewłaściwym ekranowaniu lub braku kontroli temperatury urządzenia.

Obowiązujące normy bezpieczeństwa pozostają ostrożne. Na przykład Health Canada (Canada 2018) oraz Health Protection Agency (HPA) zalecają, aby

poziomy ciśnienia akustycznego ultradźwięków nie przekraczały wartości, przy których mogłoby dojść do podniesienia temperatury tkanek powyżej norm fizjologicznych. Przyjmuje się, że wzrost temperatury tkanki do 41°C utrzymany przez 5 min lub dłużej stwarza istotne ryzyko uszkodzeń, takich jak przegrzanie komórek (Moyano i in. 2022). Analizy wskazują, że zapobiega temu ograniczenie maksymalnego poziomu ekspozycji do ok. 137 dB SPL – przy takich wartościach ultradźwięków nie powinno dochodzić do odczuwalnego ogrzewania żadnej części ciała. W typowych środowiskach pracy, takich jak stanowiska z waniem ultradźwiękowymi, spawarkami czy urządzeniami czyszczącymi są znacznie niższe od progów wywołujących efekt termiczny. Dotychczas nie odnotowano przypadków oparzeń ani uszkodzeń termicznych u ludzi spowodowanych wyłącznie hałasem ultradźwiękowym w powietrzu; takie skutki mogłyby wystąpić jedynie przy skrajnie wysokich natężeniach, które w normalnych warunkach nie mają miejsca, szczególnie przy przestrzeganiu wartości NDN. Mniej oczywistym efektem termicznym może być odczucie ciepła w uchu lub na twarzy podczas ekspozycji bardzo blisko silnego źródła ultradźwięków, jednak jest to zjawisko krótkotrwałe i lokalne.

Pozostałe skutki

Niektóre badania sugerują, że ultradźwięki poniżej progu słyszenia mogą wywierać mierzalny wpływ na układ nerwowy (Weichenberger i in. 2022). W badaniach zastosowano funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI, ang. *functional magnetic resonance imaging*) do oceny aktywności mózgu u osób ekspozowanych na ton o częstotliwości 21,5 kHz, zarówno tuż powyżej, jak i nieco poniżej ich indywidualnego progu słyszenia. Zaskakująco, stymulacja poniżej progu, czyli w warunkach braku świadomego odbioru dźwięku, powodowała pobudzenie dolnego zakrętu czołowego, obszaru kory mózgowej związanej z siecią kontroli poznawczej. Nie zaobserwowano istotnej aktywacji kory słuchowej przy bodźcu słyszalnym tuż powyżej progu. Wynik ten interpretowano jako wzrost obciążenia poznawczego – obecność słabego ultradźwięku niesłyszalnego świadomie mogła podprogowo rozpraszając uwagę i wymuszać dodatkowy wysiłek podczas wykonywania zadania wymagającego koncentracji. Choć mechanizmy tych zjawisk wymagają dalszych

badania, implikacja jest istotna: nawet ultradźwięki formalnie niesłyszalne mogą wpływać na organizm (np. w sposób subtelnie zaburzający funkcje poznawcze), co sugeruje, że brak odczucia dźwięku nie gwarantuje braku efektu – istotne spostrzeżenie z perspektywy ustalania wartości NDN.

W badaniach *Macca* i in. (2015) zebrano również dane dotyczące dolegliwości pozasłuchowych. W grupie narażonej na ultradźwięki częściej zgłaszano objawy takie jak astenia czy zawroty głowy, zwykle pod koniec zmiany lub w jej trakcie. Część objawów utrzymywała się przez kilka dni po ekspozycji i nie występowała poza pracę. Autorzy wskazują, że spektrum subiektywnych objawów – zmęczenie, ból głowy, nudności, uczucie pełności w uszach, chwiejność chodu oraz zaburzenia snu – może być nasilane przez współwystępujące składowe słyszalne lub subharmoniczne towarzyszące emisji ultradźwięków.

W ostatnich latach prowadzono badania nad wpływem ultradźwięków na funkcje poznawcze, takie jak koncentracja, uwaga czy ogólna sprawność poznawcza. Wyniki tych badań są w dużej mierze uspokajające – nie wykazano poważnych zaburzeń funkcji poznawczych przy ekspozycjach na poziomach typowych dla środowiska pracy.

Przykładowo, *Fletcher* i in. (2018) przeprowadzili dwa uzupełniające się eksperymenty: w pierwszym badali wpływ dźwięku o bardzo wysokiej częstotliwości słyszalnej (VHFS, ang. *very high-frequency sound*; 17,5 kHz, ok. 90 dB) na samopoczucie i zdolność uwagi, a w drugim – wpływ niesłyszalnego ultradźwięku 20 kHz (~84 dB) w warunkach podwójnie ślepej próby. W pierwszym przypadku część osób zgłaszała objawy (ból głowy, dyskomfort) podczas ekspozycji na słyszalny sygnał VHFS. Natomiast w drugim – gdy bodziec 20 kHz znajdował się poniżej progu słyszenia – nie stwierdzono różnic w wynikach testów uwagi ani w subiektywnym odczuwaniu między grupą eksponowaną a kontrolną. Innymi słowy, niesłyszalny dźwięk nie wywierał istotnego wpływu na sprawność poznawczą ani samopoczucie badanych, co potwierdza wcześniej omówioną hipotezę progu percepcji. Podobnie *Ascone* i in. (2021) w badaniu prowokacyjnym, w którym ochotnicy przez 28 kolejnych nocy byli eksponowani (lub nie, grupa kontrolna) na niesłyszalne ultradźwięki 22,4 kHz <90 dB, nie stwierdzili znaczących różnic w wynikach testów funkcji poznawczych (uwaga, pamięć itp.) między grupami. Autorzy odnotowali co prawda pewne

zmiany w obrazowaniu mózgu (MRI) po ekspozycji – zarówno wzrost, jak i spadek objętości istoty szarej w niektórych obszarach – jednak były one niewielkie i trudne do zinterpretowania.

W innym eksperymencie laboratoryjnym oceniono, czy krótkotrwała ekspozycja na ton 40 kHz o poziomie ok. 120 dB SPL w odległości 50 ÷ 60 cm, generowany przez skalibrowaną dziewięcioelementową macierz przetworników, wpływa na sprawność funkcji poznawczych młodych dorosłych (*Di Battista* i in. 2022). We wszystkich kluczowych porównaniach uzyskano jednoznaczne dowody na brak wpływu ekspozycji na funkcje poznawcze – ani trafność, ani czasy reakcji nie różniły się między grupą eksponowaną na ultradźwięki a grupą kontrolną. Uczestnicy nie potrafili również wiarygodnie określić momentu obecności bodźca, co dodatkowo przeczy hipotezie o doraźnym pogorszeniu koncentracji lub uwagi w wyniku ekspozycji na ultradźwięki. Przy poziomach rzędu 120 dB SPL i ekspozycjach do ok. 30 ÷ 45 min nie stwierdzono mierzalnego spadku wydajności w zadaniach wymagających reakcji i utrzymania uwagi, choć autorzy podkreślają potrzebę dalszych badań w innych populacjach i scenariuszach.

PROPOZYCJE NOWYCH WARTOŚCI DOPUSZCZALNYCH HAŁASU ULTRADŹWIEKOWEGO

Mając na uwadze wyniki dotychczasowych badań i analiz własnych oraz doniesienia literatury przedmiotu, a także uwzględniając możliwości techniczne realizacji pomiarów, zaproponowano:

- utrzymanie jako podstawy oceny narażenia na hałas ultradźwiękowy równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego odnoszonych do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy oraz maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego, określonych w pasmach tercjowych (10 ÷ 40 kHz);
- utrzymanie metody oceny narażenia na hałas ultradźwiękowy zgodnie z normą PN-Z-01339:2020;
- zmianę dotychczasowych wartości dopuszczalnych w celu lepszej ochrony zdrowia (NDN) – w szczególności w pasmach 1/3 oktaowych o częstotliwości środkowej 20 kHz);

- wprowadzenie progów działania analogicznych do tych stosowanych w zakresie hałasu słyszalnego (Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne);
- zmianę przepisów dotyczących profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami (Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 12 listopada 2020 r., zmieniające przepisy w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy) – z rozszerzeniem zakresu audiometrii tonalnej do $8 \div 16$ kHz;
- utrzymanie wartości dopuszczalnych określonych w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 3 kwietnia 2017 r. w sprawie wykazu prac uciążliwych, niebezpiecznych lub szkodliwych dla zdrowia kobiet w ciąży i karmiących oraz w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 19 czerwca 2023 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym i warunków ich zatrudniania przy niektórych z tych prac.

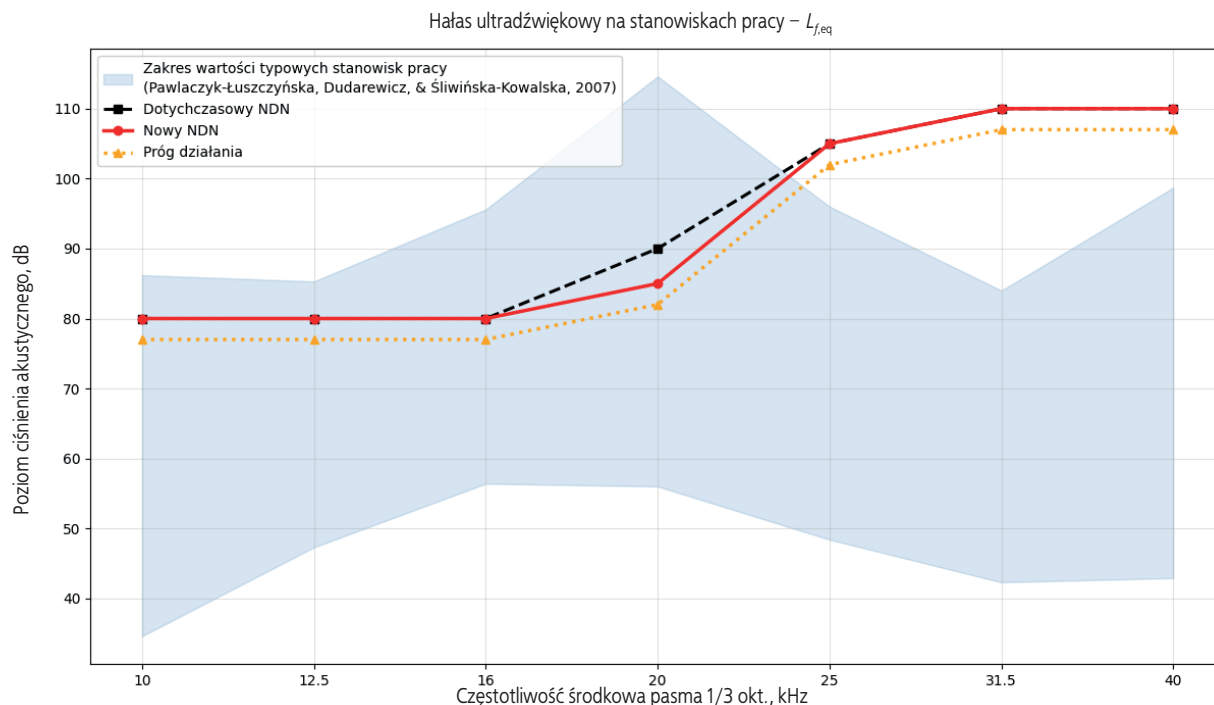
Powyższą propozycję uzasadniają zarówno wyniki eksperymentu laboratoryjnego (Radosz 2025), jak i dane z badań przemysłowych (Dudarewicz i in. 2017; 2022; Macca i in. 2015; Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2007b; 2007a), które potwierdzają, że pasmo tercjowe o częstotliwości środkowej 20 kHz stanowi pasmo o najwyższym ryzyku przekroczeń oraz największej podatności na skutki słuchowe. Propozycje nowych wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń oraz progów działania dla hałasu ultradźwiękowego przedstawiono w tabeli 6.

W przeprowadzonym eksperymencie laboratoryjnym, odwzorowującym rzeczywiste warunki pracy operatorów urządzeń ultradźwiękowych, wykazano, że ekspozycja na poziomie odpowiadającym obecnemu limitowi ($L_{20kHz,eq,8h} = 90$ dB) prowadziła do istotnych statystycznie, tymczasowych przesunięć progu słyszenia (TTS). Obniżenie poziomu ekspozycji o 5 dB eliminuje zmiany progów słyszenia w badanym zakresie ($1 \div 16$ kHz). Dodatkowo zaobserwowano pogorszenie wyników w testach czasu reakcji, co wskazuje, że ekspozycja na hałas ultradźwiękowy na obecnie dopuszczalnym poziomie także na funkcje psychomotoryczne. Równoległe dane środowiskowe z szerego zakrojonych badań terenowych prowadzonych w zakładach przemysłowych wykazały, że pasmo 20 kHz dominuje w emisji hałasu ultradźwiękowego i najczęściej odpowiada za przekroczenia wartości dopuszczalnych. W pomiarach przeprowadzonych na 233 stanowiskach pracy stwierdzono, że najwyższe poziomy równoważne i maksymalne występują w pasmach tercjowych $10 \div 25$ kHz (ryc. 1, 2), przy czym szczególny udział mają źródła pracujące w okolicach 20 kHz – przede wszystkim zgrzewarki ultradźwiękowe i maszyny do obróbki tkanin.

Badania stanu słuchu osób narażonych na hałas ultradźwiękowy potwierdzają, że przy poziomach ekspozycji zbliżonych do obecnych wartości NDN dochodzi do istotnych zmian audiometrycznych. U operatorów urządzeń ultradźwiękowych stwierdzono istotnie wyższe progi słyszenia w zakresie wysokich częstotliwości ($4 \div 14$ kHz) w porównaniu z grupami kontrolnymi, pomimo podobnych poziomów hałasu A-ważonego. Uwzględniając wyniki pomiarów środowiskowych, które wskazują na częste przekroczenia wartości dopuszczalnych w pasmach $10 \div 25$ kHz, szczególnie w okolicach 20 kHz, profil ten potwierdza ograniczoną skuteczność obowiązującej wartości granicznej.

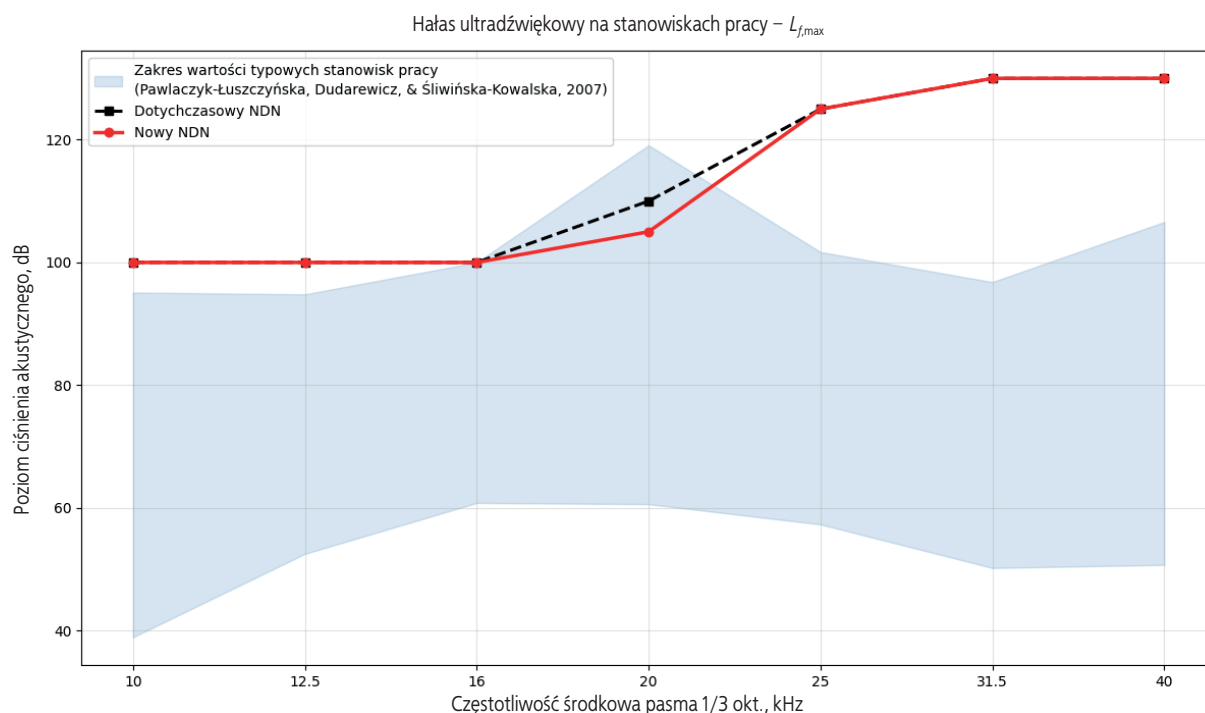
Tabela 6. Propozycje nowych wartości NDN i progów działania dla hałasu ultradźwiękowego
Table 6. Proposed new MAC (NDN) values and action levels for ultrasonic noise

Śródkowa częstotliwość pasma 1/3-okt. (kHz)	Dotychczasowy NDN ($L_{f,eq,8h}$, dB)	Nowy NDN ($L_{f,eq,8h}$, dB)	Dotychczasowy NDN ($L_{f,max}$, dB)	Nowy NDN ($L_{f,max}$, dB)	Próg działania ($L_{f,eq,8h}$, dB)
10; 12,5; 16	80	80	100	100	77
20	90	85	110	105	82
25	105	105	125	125	102
31,5; 40	110	110	130	130	107



Rycina 1. Zakres wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego ($L_{f,eq}$), hałasu ultradźwiękowego na typowych stanowiskach pracy w pasmach 1/3-oktawowych o częstotliwościach środkowych 10 ÷ 40 kHz, przedstawiony na tle dotychczasowych i proponowanych wartości NDN oraz progów działania. Opracowanie własne na podstawie danych Pawlaczyk-Łuszczynska i in. (2007)

Figure 1. Range of equivalent sound pressure levels ($L_{f,eq}$) of ultrasonic noise at typical workplace in 1/3-octave bands with centre frequencies from 10 to 40 kHz, presented against the background of current and proposed maximum admissible intensity (MAI) values and action thresholds. Author's own elaboration based on data from Pawlaczyk-Łuszczynska et al. (2007)



Rycina 2. Zakres wartości maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego ($L_{f,max}$), hałasu ultradźwiękowego na typowych stanowiskach pracy w pasmach 1/3-oktawowych o częstotliwościach środkowych 10 ÷ 40 kHz, przedstawiony na tle dotychczasowych i proponowanych wartości NDN oraz progów działania. Opracowanie własne na podstawie danych Pawlaczyk-Łuszczynska i in. (2007)

Figure 2. Range of maximum sound pressure levels ($L_{f,max}$) of ultrasonic noise at typical workplace in 1/3-octave bands with centre frequencies from 10 to 40 kHz, presented against the background of current and proposed maximum admissible intensity (MAI) values and action thresholds. Author's own elaboration based on data from Pawlaczyk-Łuszczynska et al. (2007)

PIŚMIENNICTWO

ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists (2024). The threshold limit values (TLVs) and biological exposure indices (BEIs).

Acton W. I. (1968). A criterion for the prediction of auditory and subjective effects due to airborne noise from ultrasonic sources. *Ann. Occup. Hyg.* 11(3), 227–234. DOI: 10.1093/ann-hyg/11.3.227.

Acton W. I. (1974). The effects of industrial airborne ultrasound on humans. *Ultrasonics* 12(3), 124–128. DOI: 10.1016/0041-624X(74)90069-9.

Acton W. I. (1975). Exposure criteria for industrial ultrasound". *Ann. Occup. Hyg.* 18(3), 267–268. DOI: 10.1093/ann-hyg/18.3.267.

Acton W. I. (1983). Exposure to industrial ultrasound: hazards, appraisal and control. *J. Soc. Occup. Med.* 33(3), 107–113. DOI: 10.1093/occmed/33.3.107.

Acton W. I., Carson M.B. (1967). Auditory and subjective effects of airborne noise from industrial ultrasonic sources. *Br. J. Ind. Med.* 24(4), 297–304. DOI: 10.1136/oem.24.4.297.

Acton W.I., Carson M.B. (1975). Auditory and subjective effects of airborne ultrasound in laboratory assistants. *J. Sound Vibr.* 42(2), 227–243. DOI: 10.1016/0022-460X(75)90419-2.

Ahmadi F., McLoughlin I.V., Chauhan S. i in. (2012). Bioeffects and safety of low-intensity, low-frequency ultrasonic exposure. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 108(3), 119–138. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2012.01.004.

Ascone L., Kling C., Wieczorek J. i in. (2021). A longitudinal, randomized experimental pilot study to investigate the effects of airborne infrasound on human mental health, cognition, and brain structure. *Sci. Rep.* 11, 3190. DOI: 10.1038/s41598-021-82203-6.

Ashihara K. (2007). Hearing thresholds for pure tones above 16 kHz. *JASA* 122(3), EL52–EL57. DOI: 10.1121/1.2761883.

Ashihara K., Kurakata K., Mizunami T. (2006). Hearing threshold for pure tones above 20 kHz. *Acoust. Sci. Tech.* 27(1), 12–19. DOI: 10.1250/ast.27.12.

Di Battista A. (2019). The effect of 40 kHz ultrasonic noise exposure on human hearing. In: Ochman M., Vorlander M., Fels J. (eds.). *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustic.* Aachen, Germany 9–13.09.2019. DOI: 10.18154/RWTH-CONN-239884.

Chopra A., Thomas B.S., Mohan K. i in. (2016). Auditory and nonauditory effects of ultrasonic scaler use and its role in the development of permanent hearing loss. *Oral Health & Preventive Dentistry* 14 (6): 493–500. DOI: 10.3290/j.ohpd.a36520.

Cieslak, M., C. Kling C., Wolff A. i in. (2021). Development of a personal ultrasound Eexposimeter for occupational health monitoring. *IJERPH* 18(24), 13289. DOI: 10.3390/ijerph182413289.

Construction material of the sound conduction system of the human ear (2025). *JASA* (AIP Publishing).

Dallos P.J., i in. (1966). Even-Order Subharmonics in the Peripheral Auditory System". *JASA* 40(3), 561–564. DOI: 10.1121/1.1910119.

Dallos P.J., Linnell C.O. 1966. Subharmonic components in cochlear-microphonic potentials. *JASA* 40(1), 4–11. DOI: 10.1121/1.1910063.

Dudarewicz A., Zaborowski K., Rutkowska-Kaczmarek P. i in. (2017). The Hearing Threshold of Employees Exposed to Noise Generated by the Low-Frequency Ultrasonic Welding Devices. *Arch. Acoust.* 42(2), 199–205. DOI: 10.1515/aoa-2017-0022.

Dudarewicz A., Zamojska-Daniszevska M., Zaborowski K. i in. (2022). Hearing Status of People Occupationally Exposed to Ultrasonic Noise. *IJOMEH* 35(3), 309–325. DOI: 10.13075/ijomeh.1896.01816.

Fletcher M.D., Jones S.L., White P.R. i in. (2018). Effects of very high-frequency sound and ultrasound on humans. Part I: Adverse symptoms after exposure to audible very-high frequency sound. *JASA* 144(4), 2511. DOI: 10.1121/1.5063819.

Fletcher M.D., Jones S.L., P. R. White P.R. i in. (2018). Effects of Very High-Frequency Sound and Ultrasound on Humans. Part II: A Double-Blind Randomized Provocation Study of Inaudible 20-kHz Ultrasound. *JASA* 144(4), 2521. DOI: 10.1121/1.5063818.

Fletcher M.D., Lloyd Jones S., White P.R. i in. (2018). Public exposure to ultrasound and very high-frequency sound in air. *JASA* 144(4), 2554. DOI: 10.1121/1.5063817.

Grzesik J., Pluta E. (1978). Hearing threshold levels in operators of industrial ultrasonic devices. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 41, 105–115. DOI: 10.1007/BF00378491.

Grzesik J., Pluta E. (1983). High-Frequency Hearing Risk of Operators of Industrial Ultrasonic Devices. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 53(1), 77–88. DOI: 10.1007/BF00406179.

Grzesik J., Pluta E. (1986a). Dynamics of high frequency hearing loss of operators of industrial ultrasonic devices. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 57(2), 137–142. DOI: 10.1007/BF00381381.

Grzesik J., Pluta E. (1986b). High-frequency noise-induced hearing loss: a field study on the role of intensity level and accumulated noise dose. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 57(2), 127–136. DOI: 10.1007/BF00381380.

Health Canada (1991). Guidelines for the safe use of ultrasound: Part II – Industrial and commercial applications (Safety Code 24).

Health Canada (2018). Guidelines for the safe use of ultrasound: Part II – Industrial & commercial applications (Safety Code 24).

Health Protection Agency, Independent Advisory Group on Non-Ionising Radiation (2010). Health effects of exposure to ultrasound and infrasound: Report of the Independent

- Advisory Group on Non-Ionising Radiation. Chilton, UK: Health Protection Agency report.
- HSE (2025). Controlling noise at work – L108.
- ICNIRP (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys.* 99(6), 818–836.
- ICNIRP (2017). ICNIRP Statement on diagnostic devices using non-ionizing radiation: Existing Regulations and Potential Health Risks. *Health Phys.* 112(3), 305–321.
- ICNIRP (2020). Principles for non-ionizing radiation protection. *Health Phys.* 118(5), 477–482.
- ICNIRP (2020). Intended human exposure to non-ionizing radiation for cosmetic purposes. *Health Phys.* 118(5), 562–579.
- ICNIRP (2024). Validity of the 1984 interim guidelines on airborne ultrasound and gaps in the current knowledge. *Health Phys.* 127(2), 326–347. DOI: 10.1097/HP.0000000000001800.
- IEC, International Electrotechnical Commission (2013). IEC 61672-1:2013 – Electroacoustics: Sound level meters – Part 1: Specifications.
- ILO, International Labour Organization (1977). Protection of workers against noise and vibration in the working environment. Geneva: ILO.
- IRPA (1984). Interim guidelines on limits of human exposure to airborne ultrasound. *Health Phys.* 46(4), 969–974.
- ISO, International Organization for Standardization (2013). ISO 1999:2013 – Acoustics: Estimation of noise-induced hearing loss.
- Kling C., Schöneweiß R., Wolff A. i in. (2017/2024). Investigations on airborne ultrasound at working places. ICSV24 (London). DOI: 10.25144/23860.
- Koch C. (2017). Hearing beyond the limit: Measurement, perception and impact of infrasound and ultrasonic noise. ICBEN 2017.
- Lawton B.W. (2001). Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency. HSE Research Report CRR 343.
- Leighton T.G. (2016). Are some people suffering as a result of increasing mass exposure of the public to ultrasound in air? *Proc. Royal Society A* 472(2185), 20150624. DOI: 10.1098/rspa.2015.0624.
- Leighton T.G. (2020). Public exposure to airborne ultrasound and very high frequency sound. *Acoust. Today* 16(3), 17–28.
- Macca L., Scapellato M.L., Carrieri M. i in. (2015). High-frequency hearing thresholds: effects of age, occupational ultrasound and noise exposure. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 88(2), 197–211. DOI: 10.1007/s00420-014-0951-8.
- Moyano D.B., Paraiso D.A., González-Lezcano R.A. i in. (2022). Possible effects on health of ultrasound exposure, risk factors in the work environment and occupational safety review. *Healthcare* 10(3), 423. DOI: 10.3390/healthcare10030423.
- Parrack H.O. (1952). Ultrasound and industrial medicine. *Ind. Med. Surg.* 21(4), 156–164.
- Parrack H.O. (1966). Effect of Air-Borne Ultra-sound on Humans. *Int. J. Audiol.* 5(3), 294–308. DOI: 10.3109/05384916609074198.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Dudarewicz A., Koton J. i in. (2001). Hałas ultradźwiękowy. Dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego. *Podst. Met. Oceny Środow.* Pr. 2(28), 55–88.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Koton J., Śliwińska-Kowalska M. i in. (2001). Verified maximum admissible intensity (MAI) values for the ultrasonic noise in work environment. *Med. Pr.* 52(3), 221–226.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Dudarewicz A., Śliwińska-Kowalska M. (2007a). Theoretical predictions and actual hearing threshold levels in workers exposed to ultrasonic noise of impulsive character – a pilot study. *JOSE* 13(4), 409–418. DOI: 10.1080/10803548.2007.11105098.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Dudarewicz A., Śliwińska-Kowalska M. (2007b). Źródła ekspozycji zawodowej na hałas ultradźwiękowy – ocena wybranych urządzeń. *Med. Pr.* 58(2), 105–116.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Dudarewicz A., Zamojska-Daniszevska M. i in. (2018). Noise exposure and hearing status among call center operators. *Noise Health* 20(96), 178–189. DOI: 10.4103/nah.NAH_11_18.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Dudarewicz A. (2020). Impact of very high-frequency sound and low-frequency ultrasound on people – the current state of the art. *IJOMEH* 33(4), 389–408. DOI: 10.13075/ijomeh.1896.01586.
- Pleban D., Smagowska B., Radosz J. (2020). Hałas ultradźwiękowy w inżynierii środowiska pracy. Warszawa, CIOP-PIB.
- Pleban D., Smagowska B., Radosz J. (2021). Assessment of Occupational Risk in the Case of the Ultrasonic Noise Exposure. *Arch. Acoust.* 46(1), 167–175. <https://doi.org/10.24425/aoa.2021.136570> [dostęp: 27.04.2026].
- Sensory unpleasantness of high-frequency sounds (2013). *Acoustical Science and Technology* 34, 26. <https://doi.org/10.1250/ast.34.26>. [dostęp: 27.04.2026].
- Radosz J. (2015). Procedura pomiaru hałasu ultradźwiękowego. *Podst. Met. Oceny Środow.* Pr. 4(86), 169–190.
- Radosz J. (2026). Temporary Hearing Threshold Shifts and Cognitive Effects Induced by Ultrasonic Noise Exposure. *Applied Sciences*, 16(2), 622. <https://doi.org/10.3390/app16020622> [dostęp: 27.04.2026].
- Radosz J., Pleban D. (2018). Ultrasonic noise measurements in the work environment. *JASA* 144(4), 2532.
- Rahko A. A., Karma P.H., Rahko K.T. i in. (1988). High-frequency hearing of dental personnel. *Community Dent. Oral*

Epidemiol. 16, 268–270. DOI: 10.1111/j.1600-0528.1988.tb01771.x.

Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2018, poz. 1286.

Schöneweiß R., Kling C., Koch C. (2020). A laboratory study for occupational safety and health on the structure of airborne ultrasound fields. *Acta Acustica* 4, 12. DOI: 10.1051/aacus/2020013.

Smagowska B. (2013). An objective and subjective study of noise exposure within 10–40 kHz. *Arch. Acoust.* 38(4), 559–563. DOI: 10.2478/aoa-2013-0066.

Smagowska B. (2013). Ultrasonic noise sources in a work environment. *Arch. Acoust.* 38(2), 169–176. DOI: 10.2478/aoa-2013-0019.

Smagowska B., Pawlaczyk-Łuszczynska M. (2013). Effects of ultrasonic noise on the human body – a bibliographic review. *JOSE* 19(2), 195–202. DOI: 10.1080/10803548.2013.11076978.

Ueda M., Ota A., Takahashi H. (2014). Investigation on high-frequency noise in public space. INTER-NOISE 2014.

Ullisch-Nelken C., Wolff A., Schöneweiß R. i in. (2018). A measurement procedure for the assessment of industrial ultrasonic noise. *Acta Acustica United with Acustica*, 104(3), 535–546. DOI: 10.3813/AAA.1916.

Weichenberger M., Bug M.U., Brühl R. i in. (2022). Air-Conducted ultrasound below the hearing threshold elicits functional changes in the cognitive control network. *PLoS ONE* 17(12), e0277727. DOI: 10.1371/journal.pone.0277727.

WHO, World Health Organization (1982). Environmental health criteria 22: Ultrasound. WHO.

World Health Organization Regional Office for Europe (2020). Environmental noise in Europe – 2020.