

Hałas ultradźwiękowy - dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego

1 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, hałas ultradźwiękowy definiuje się jako hałas, w którego widmie występują składowe wysokich częstotliwości słyszalnych oraz niskich częstotliwości ultradźwiękowych (typowo zakres 10–40 kHz). Hałas ultradźwiękowy na stanowiskach pracy jest charakteryzowany przez:

- a) równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz odniesione do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy lub równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz odniesione do przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy, określonego w ustawie z dnia 26 czerwca 1974 r. – Kodeks pracy (wyjątkowo w przypadku oddziaływania hałasu ultradźwiękowego na organizm człowieka w sposób nierównomierny w poszczególnych dniach w tygodniu),
- b) maksymalne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz.

Mimo że częstotliwości powyżej ok. 16–20 kHz nie wywołują u człowieka wrażeń słuchowych, hałas ultradźwiękowy może oddziaływać na organizm zarówno poprzez narząd słuchu, jak i przez inne drogi (np. bezpośrednio drgania mechaniczne ciała). Już w latach 60. XX w. obserwowano u pracowników narażonych na intensywne ultradźwięki tzw. chorobę ultradźwiękową, objawiającą się m.in. nudnościami, bólami i zawrotami głowy, zaburzeniami koordynacji oraz nadmiernym zmęczeniem. Stwierdzano także czasowe lub trwałe ubytki słuchu. Mierzone na stanowiskach pracy wartości poziomu ciśnienia akustycznego często przekraczają aktualne wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) hałasu ultradźwiękowego.

Wartości NDN hałasu ultradźwiękowego zostały wprowadzone 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) w oparciu o dokumentację opublikowaną w Podstawach i Metodach Oceny Środowiska Pracy (Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2001). Historycznie wartości te wywodzą się z międzynarodowych wytycznych z lat 70. i 80. XX w., kiedy to po raz pierwszy sformułowano kryteria ochrony przed ultradźwiękami w powietrzu. Obecnie jednak dysponujemy znacznie szerszą wiedzą naukową, która rodzi wątpliwości, czy dotychczasowe limity zapewniają dostateczne bezpieczeństwo. Poniżej przedstawiono kluczowe argumenty oparte na aktualnych danych przemawiające za pilną aktualizacją dokumentacji NDN hałasu ultradźwiękowego.

Obowiązujące obecnie na świecie wartości dopuszczalne dla hałasu ultradźwiękowego wywodzą się w dużej mierze z wytycznych IRPA z 1984 roku (IRPA 1984). Były one oparte na bardzo ograniczonym materiale badawczym z tamtego okresu. W najnowszej ocenie Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP) stwierdzono, że biologiczne podstawy tych zaleceń są dziś niewystarczające (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection 2024). Pierwotne wytyczne odnosiły się do istotnych efektów biologicznych (m.in. efektów słuchowych i ogólnych odczuć subiektywnych) i na dostępne wtedy dane ustalono granice ekspozycji. Jednak ICNIRP podkreśla, że limity IRPA były oparte na szczątkowych dowodach i nie można ich uznać za solidnie ugruntowane naukowo. W szczególności zakres danych doświadczalnych wykorzystanych w latach 80. był ograniczony. Wiele z nich pochodziło z badań z lat 60.–70. (np. Acton 1968, 1974) i obarczonych niepewnością co do progów efektów. ICNIRP w swoim stanowisku z 2024 r. zauważa, że co prawda nie pojawiły się jednoznacznie nowe mechanizmy szkodliwego działania ultradźwięków poza tymi rozważanymi w 1984 r., ale ograniczona baza danych mogła prowadzić zarówno do zaniżenia, jak i zawyżenia tamtych limitów.

W ostatnich latach pojawiły się badania sugerujące, że ultradźwięki mogą wywoływać zmiany w układzie słuchowym i nerwowym przy poziomach niższych niż dotychczas sądzono za bezpieczne (Dudarewicz et al. 2022; Weichenberger et al. 2022; Dudarewicz et al. 2017). Dotychczasowe wytyczne zakładały, że dźwięki powyżej 20 kHz są za założenia niesłyszalne, a zatem jeśli pozostają poza zakresem percepcji, nie powinny negatywnie wpływać na komfort ani słuch.

Niezależnie od wartości dopuszczalnych, równie ważna jest ocena narażenia na ultradźwięki. Tradycyjne metody pomiarowe hałasu w środowisku pracy (np. ISO 9612) były dostosowane głównie do zakresu słyszalnego i często nie uwzględniały specyfiki ultradźwięków. Klasyczne mierniki poziomu dźwięku wyposażone w filtry częstotliwościowe (charakterystyka A, C itp.) nie są przystosowane do pomiaru energii akustycznej powyżej 20 kHz – np. filtr A silnie tłumi komponenty powyżej 10 kHz, praktycznie eliminując ultradźwięki z wyniku pomiaru. Dawniej stosowane metody pomiarowe nie precyzowały też jednoznacznie sposobu pomiaru ultradźwięków. Zdarzało się, że poszczególne laboratoria stosowały różne rozwiązania, co utrudniało porównania. W ostatnich latach poczyniono jednak postęp w tej dziedzinie. W Polsce opracowano nową procedurę i normę pomiarową dedykowaną hałasowi ultradźwiękowemu. W 2015 r. ukazała się w procedurę opracowaną przez CIOP-PIB (Radosz 2015), a następnie – po pracach normalizacyjnych – ustanowiono projekt Polskiej Normy prPN-Z-01339 (opublikowany ostatecznie jako PN-Z-01339:2020).

2 Źródła hałasu ultradźwiękowego w środowisku pracy

Głównymi źródłami hałasu ultradźwiękowego w warunkach przemysłowych są tzw. technologiczne urządzenia ultradźwiękowe niskich częstotliwości, czyli pracujące w zakresie ok. 20–40 kHz, w których drgania ultradźwiękowe są generowane celowo w celu realizacji, przyspieszenia lub usprawnienia procesu (Smagowska 2013; Pleban 2020). Należą do nich m.in.:

- myjki ultradźwiękowe,
- zgrzewarki i urządzenia do lutowania ultradźwiękowego,
- ultradźwiękowe urządzenia do cięcia, wiercenia i drążenia (np. ultradrażarki),

- wanny do cynowania/cynkowania detali.

Hałas ultradźwiękowy bywa również generowany jako produkt uboczny przez maszyny i narzędzia niezaplanowane specjalnie do emisji ultradźwięków, w których składowe wysokoczęstotliwościowe pojawiają się wtórnie, m.in. wskutek przepływu lub wypływu sprężonego gazu czy wysokich prędkości obrotowych elementów. Przykładowo sprężarki, palniki gazowe, zawory ciśnieniowe, narzędzia pneumatyczne czy wysokoobrotowe obrabiarki (strugarki, frezarki, szlifierki, piły tarczowe), a nawet niektóre maszyny włókiennicze.

Badania prowadzone przez IMP w Łodzi (Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2007) na 233 stanowiskach pracy wykazały, że spodziewane poziomy i częstość przekroczeń dopuszczalnych wartości zależą od rodzaju urządzeń:

- Maszyny do obróbki tkanin oraz gilotyny ultradźwiękowe - we wszystkich analizowanych przypadkach poziomy równoważne przekraczały wartości dopuszczalne dla 8-godzinnej ekspozycji; w maszynach do tkanin bardzo często występowały także przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów maksymalnych.
- Zgrzewarki ultradźwiękowe - przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów równoważnych obserwowano w większości przypadków; 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, choć rzadziej niż w przypadku zgrzewarek i maszyn do tkanin; na wielu stanowiskach nie notowano przekroczeń poziomów maksymalnych.
- Szlifierki - często rejestrowano przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów równoważnych w pasmach 10–16 kHz; przekroczenia poziomów maksymalnych pojawiały się rzadziej.
- Piły i strugarki oraz procesy spawania/cięcia (plazma, palniki) - odnotowywano przypadki przekroczeń poziomów równoważnych w dolnych pasmach wysokiej słyszalności, natomiast przekroczenia poziomów maksymalnych generalnie zdarzały się sporadycznie.

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

Tab. 1. Charakterystyka poziomów hałasu ultradźwiękowego emitowanego przez wybrane urządzenia technologiczne i maszyny – wyniki pomiarów terenowych (Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczńska et al. 2007)

Typ urządzenia / procesu	Dominująca częstotliwość robocza (kKz)	Zakresy poziomów równoważnych $L_{\text{feq,Te}}$ [dB]	Zakresy poziomów maksymalnych L_{fmax} [dB]	Najczęściej przekroczone pasma tercjowe	Udział stanowisk z przekroczeniami $L_{\text{feq,8h}}$ [%]	Udział stanowisk z przekroczeniami L_{fmax} [%]	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	Stać, 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
Myjki ultradźwiękowe	25–40	65–112	70–120	25–31,5 khz	42,9	14,3	Źródło zamknięte (wanna); wysokie poziomy w bezpośrednim otoczeniu otwartej pokrywy
Szlifierki / obrabiarki wysokoobrotowe	–	68–104	73–115	10–16 khz	75	< 10	Składowe ultradźwiękowe generowane wtórnie; zależność od rodzaju materiału i prędkości
Piły 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;

Należy zwrócić szczególną uwagę na wyniki poziomów ciśnienia akustycznego, które nie uwzględniały poprawek związanych z aparaturą pomiarową, które pojawiły się w metodach oceny hałasu ultradźwiękowego od 2015 r. (Radosz 2015). Wyniki te potwierdzają również badania prowadzone w CIOP-PIB (Smagowska 2013; Pleban et al. 2021) wskazujące, że hałas ultradźwiękowy stanowi istotny czynnik ryzyka w środowisku pracy, szczególnie przy obsłudze urządzeń technologicznych, takich jak myjki i zgrzewarki ultradźwiękowe. W badaniu wykazano, że równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3-oktawowych osiągały wartości od około 55 do 121 dB, a poziomy maksymalne sięgały nawet 128 dB. Natomiast w procesach obróbki metalu i przy wykorzystaniu narzędzi pneumatycznych w pomiarach rejestrowano równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3-oktawowych od 81 do 105 dB, a wartości maksymalne sięgały nawet 122 dB, co często przekraczało obowiązujące w Polsce wartości dopuszczalne. Najwyższe poziomy odnotowano podczas żłobienia łukiem węglowym i cięcia krat pomostowych, natomiast niższe – przy spawaniu łukiem krytym. Pracownicy opisywali hałas jako uporczywy, przenikliwy i uciążliwy, utrudniający komunikację oraz powodujący zmęczenie. Autorzy podkreślają, że ekspozycja na ultradźwięki stanowi istotny problem higieniczny, wymagający działań prewencyjnych oraz doskonalenia metod pomiarowych i oceny ryzyka zawodowego

Ultradźwięki o częstotliwościach 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. Dla urządzeń o charakterze impulsowym/lokalnym (np. gilotyny, sonotrody w zgrzewarkach) rozkłady poziomów pokazują istotne oddziaływania w odległościach rzędu 1-2 m od źródła. Dzięki temu możliwa jest dość skuteczna izolacja hałasu ultradźwiękowego poprzez obudowy urządzeń lub ekrany pochłaniające, nawet wykonane z prostych materiałów). Z drugiej strony, bezpośredni kontakt ciała z pracującym urządzeniem ultradźwiękowym (lub sprzężenie przez medium ciekłe) może znacząco zwiększyć efektywną dawkę – organizm przy kontakcie odbiera energię drgań bez tłumienia przez powietrze. Dlatego zalecenia bhp zalecają unikanie kontaktu fizycznego z generatorem ultradźwięków i skupiają się na ocenie pola akustycznego w powietrzu.

3 Metoda pomiaru hałasu ultradźwiękowego w środowisku pracy

Metodę pomiaru hałasu ultradźwiękowego opisuje Polska Norma (PN-Z-01339:2020). Norma określa metodę pomiaru wielkości charakteryzujących hałas ultradźwiękowy w środowisku pracy oraz procedurę wyznaczania równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego hałasu ultradźwiękowego. Metoda ta jest stosowana do wszystkich rodzajów hałasu ultradźwiękowego, niezależnie od charakteru jego zmienności w czasie. Norma precyzuje metodykę pomiaru wielkości charakteryzujących hałas ultradźwiękowy, obejmujący pasma tercjowe o częstotliwościach środkowych od 10 kHz do 40 kHz. Norma odwołuje się do Polskich Norm z zakresu akustyki i elektroakustyki, m.in. PN-EN ISO 9612 (procedura wyznaczania zawodowej ekspozycji na hałas), PN-EN 61672-1 (wymagania dla 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), a w części

dotyczącej niepewności pomiaru do przewodnika GUM (ISO/IEC Guide 98-3). Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej dotyczą stosowania mierników/analizatorów klasy 1 zgodnie z PN-EN 61672-1 oraz PN-EN 61260-1 (co najmniej do 20 kHz), wyposażone w filtry tercjowe 10-40 kHz oraz mikrofony pola swobodnego zgodne z PN-EN 61094-4. Preferowany jest pomiar bez siatki ochronnej mikrofonu. Jeśli siatka lub osłony (np. przeciwwietrzne, stożkowe) muszą być użyte, norma wymaga wprowadzenia udokumentowanej poprawki częstotliwościowej (podano przykłady w Załączniku B). Kalibratory powinny odpowiadać PN-EN IEC 60942 (klasa 1), z odpowiednimi adapterami do średnicy mikrofonu. Wskazano również obowiązek okresowego sprawdzania zgodności przyrządów w laboratoriach zapewniających spójność pomiarową.

Norma precyzuje warunki środowiskowe pomiarów (temperatura 13-33 °C, ciśnienie 970-1050 hPa, wilgotność 25-90%). Przed każdą serią pomiarową wykonuje się sprawdzenie toru pomiarowego. Pomiar prowadzi się w obecności pracownika. Dla każdej wyodrębnionej czynności należy wykonać co najmniej trzy pomiary poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach 10–40 kHz.

Metodyka obliczeń jest spójna z podejściem z PN-EN ISO 9612 i opiera się na koncepcji podziału dnia pracy na „czynności” o ustalonym 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 czasami poszczególnych czynności. W sytuacji nierównomiernego obciążenia w skali tygodnia norma przewiduje obliczenie poziomu równoważnego odniesionego do przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy ($L_{fi,eq,w}$).

Szczegółowo ujęto zagadnienie niepewności pomiarowej. Załącznik C (normatywny) opisuje składowe niepewności, obejmując m.in. rozrzut próbek, charakterystyki metrologiczne aparatury, pozycję mikrofonu oraz estymację czasu trwania czynności. Norma wymaga, aby w sprawozdaniu końcowym oprócz wartości zmierzonych podawać niepewność rozszerzoną wraz z współczynnikiem rozszerzenia (jednostronny 95% przedział ufności). Jednocześnie zastrzega, że przy ocenie zgodności z wymaganiami prawnymi (wartościami dopuszczalnymi) bierze się pod uwagę samą wartość zmierzoną, bez doliczania niepewności, co jest jednoznacznie zapisane w części dotyczącej prezentacji wyników.

Sprawozdanie zgodne z PN-Z-01339:2020 powinno zawierać informacje ogólne (identyfikacja zlecającego, wykonawcy, stanowisk), analizę warunków pracy (opis stanowisk, czynności, źródeł oraz środków ograniczających), wykaz aparatury i danych metrologicznych (w tym zastosowane poprawki), opis warunków środowiskowych i kalibracji, a także pełne wyniki, obliczenia $L_{fi,eq,8h}/L_{fi,eq,w}$ oraz $L_{fi,max}$, oszacowaną niepewność i wnioski.

PN-Z-01339 jest spójna z krajowymi wymaganiami prawnymi dotyczącymi wartości dopuszczalnych hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy (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 2018) i dostarcza pełnej metodyki pomiarowo-obliczeniowej służącej do ich weryfikacji w praktyce

4 Dokumentacja wartości dopuszczalnych z 2001 roku – przegląd treści

W 2001 roku ukazała się obszerna „Dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego na hałas ultradźwiękowy” (Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2001). Dokument ten stanowił przegląd ówczesnej wiedzy o zagrożeniach ultradźwiękami oraz zawierał propozycje kryteriów oceny i wartości dopuszczalnych stanowiących podstawę odpowiednich rozporządzeń. W dokumencie zdefiniowano hałas ultradźwiękowy w środowisku pracy jako zakres pasm 1/3-oktawowych o częstotliwościach środkowych od 10 kHz do 40 kHz. Podkreślono, że hałas ultradźwiękowy często współistnieje z hałasem wysokoczęstotliwościowym (zakres słyszalny). Przywołano wcześniejsze normatywne definicje (PN-N-01323:1986), które historycznie poszerzały zakres nawet do 100 kHz. Wskazano również typowe źródła takie jak technologiczne urządzenia ultradźwiękowe niskich częstotliwości (myjki/płuczki, zgrzewarki, drążarki, lutownice ręczne, wanny do cynowania), a także urządzenia o emisji aerodynamicznej lub mechanicznej (sprężarki, palniki, zawory, narzędzia pneumatyczne, maszyny wysokoobrotowe - strugarki, frezarki, szlifierki, piły, niektóre maszyny włókiennicze). Część zdrowotna 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 objawów wynikających z oddziaływania na układ przedsionkowy (ból i zawroty głowy, zaburzenia równowagi, nudności), oraz reakcji o charakterze wegetatywnym. Historyczne obserwacje TTS/PTS omówiono w kontekście zjawisk nieliniowych i powstawania subharmonicznych w uchu, które mogą generować słyszalne składowe mimo „niesłyszalności” składowej podstawowej >16–20 kHz. Innymi słowy, bardzo głośny sygnał np. 25 kHz może w uchu wygenerować „wtórny” sygnał o częstotliwości ~12,5 kHz, wywołując wrażenie dźwiękowe i obciążając słuch. Badania do początku lat 2000 wskazywały, że długotrwała ekspozycja zawodowa na ultradźwięki prowadzi do podwyższenia progów słyszenia na wysokich częstotliwościach audiometrycznych (powyżej 10 kHz). Przykładowo, Grzesik i Pluta wykazali istotne pogorszenie słuchu powyżej 10–16 kHz u operatorów urządzeń ultradźwiękowych w porównaniu z grupą kontrolną. Co ważne, u badanych tych współwystępował też hałas wysokoczęstotliwościowy, co utrudnia rozdzielenie wpływu hałasu ultradźwiękowego od hałasu słyszalnego. Niemniej jednak, literatura do 2001 r. jednoznacznie potwierdzała szkodliwość ultradźwięków dla słuchu – zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio poprzez towarzyszące składowe słyszalne.

Poza uszkodzeniami słuchu, hałas ultradźwiękowy wpływa niekorzystnie na inne układy organizmu. Pracownicy narażeni na intensywne ultradźwięki uskarżali się na ból i zawroty głowy, uczucie ucisku w skroniach, zaburzenia równowagi i nudności (związane z podrażnieniem układu przedsionkowego) ogólne zmęczenie, rozdrażnienie, uczucie niepokoju. W literaturze opisywano je już we wspomnianych przypadkach „choroby ultradźwiękowej” w latach 60., zwłaszcza przy ekspozycjach o bardzo wysokim natężeniu. Mechanizmy tych efektów nie są do końca wyjaśnione – mogą wynikać z kombinacji czynników, takich jak: stymulacja przedsionkowa (wpływ na błędniak przy drganiach czaszki), wpływ na układ nerwowy autonomiczny (odruchowe reakcje wegetatywne organizmu na bodziec akustyczny wysokiej częstotliwości) czy nawet efekt placebo/psychosomatyczny 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 ultradźwięki

powietrzne o dużym natężeniu, choć podkreślono równocześnie brak wystarczającej liczby nowszych danych ilościowych i potrzebę dalszych badań. Przy ekstremalnie wysokich poziomach ultradźwięków możliwe są też bezpośrednie efekty termiczne (ogrzewanie tkanek). Według WHO (raport z 1982) i przeglądu Health Canada (1991), poziomy >155 dB mogą wywołać odczuwalne nagrzewanie i oparzenia skóry. W praktyce jednak tak wysokie natężenia nie występują w normalnych warunkach środowiska pracy w powietrzu – odnotowano je raczej w kontekście 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 (wartość ta zawiera już margines bezpieczeństwa względem progu ~140 dB, przy którym notowano lokalne nagrzewanie skóry).

Zbiór badań (głównie z lat 60.–80.) odnotowuje zmiany czynnościowe OUN i układu krążenia przy poziomach rzędu 90-120 dB w dla niższych częstotliwości ultradźwiękowych, ale jednocześnie wskazuje na ograniczenia metodologiczne dawnych pomiarów oraz współwystępowanie hałasu wysokoczęstotliwościowego i czynników technologicznych (np. rozpuszczalniki przy myciu). Dokumentacja zwraca uwagę, że objawy subiektywne i dyskomfort mogą pojawiać się już przy 75–105 dB w pasmach 10–20 kHz u osób wrażliwych, a w zakresie 20–40 kHz obserwowano progi dla zmian czynnościowych w okolicach 100–110 dB. W podsumowaniu tej części autorzy sugerują potrzebę nowszych, dobrze kontrolowanych badań.

Na tle przeglądu kryteriów międzynarodowych (Acton, Parrack, IRPA, ACGIH) dokument uzasadnia krajowe podejście do oceny hałasu ultradźwiękowego oparte o równoważne poziomy w pasmach tercjowych oraz poziomy maksymalne. Wskazuje, że pierwsze propozycje limitów oparto na prewencji skutków subiektywnych w paśmie 10–20 kHz i prewencji uszkodzeń słuchu poprzez ograniczanie ekspozycji w paśmie 25–40(50) kHz. ACGIH w latach 1998–2000 doprecyzowała podejście poprzez wartości TWA dla 10–20 kHz oraz wartości maksymalne (ceiling) do 100 kHz. Istotnym wkładem dokumentacji jest uzasadnienie i propozycja wartości dopuszczalnych w Polsce. Dla ogółu pracowników wartości NDN obowiązują równocześnie dla dwóch wskaźników: równoważnych poziomów odniesionych do 8 godzin (alternatywnie tygodnia pracy w razie nierównomiernej ekspozycji) oraz poziomów maksymalnych, w pasmach tercjowych 10–40 kHz. Dokumentacja równolegle formułuje bardziej rygorystyczne wartości dla grup szczególnie wrażliwych (kobiety ciężarne, młodociani), obniżając progi równoważne i pozostawiając maksima na poziomach tożsamyh lub niewiele niższych.

Ważnym elementem dokumentacji jest przegląd realnych poziomów ciśnienia akustycznego zmierzonych w krajowych zakładach. Zestawiono rozpiętości poziomów tercjowych przy myjkach, zgrzewarkach, drażarkach, narzędziach pneumatycznych, maszynach do obróbki i maszynach włókienniczych, a także w otoczeniu urządzeń do odstraszania gryzoni. Analiza wyników prowadzi do wniosków, że przekroczenia NDN (8-h) występują najczęściej i niemal wyłącznie do 40 kHz, największe przekroczenia występują zwykle w zakresie 10–20 kHz, powyżej 50 kHz przekroczenia zarówno równoważnych, jak i maksymalnych wartości generalnie nie są notowane oraz że wartości maksymalne bywają przekraczane przy technologicznych urządzeniach ultradźwiękowych oraz sporadycznie przy narzędziach pneumatycznych i maszynach włókienniczych, wciąż jednak w granicach do 40 kHz. Te dane wzmacniają decyzję o zawężeniu formalnej oceny do 10–40 kHz oraz odwołuje się do realnych ograniczeń ówczesnej aparatury pomiarowej. Dokumentacji wprowadza również zagadnienie badań profilaktycznych (wstępnych, okresowych, kontrolnych) dla osób narażonych na

hałas ultradźwiękowy, wskazując narządy krytyczne (słuch, układ nerwowy; postuluje się rozszerzenie o układ przedsionkowy) i proponując ujednoczenie okresowości z przepisami dot. 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 i maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego, określonych w pasmach tercjowych;
- ograniczenie zakresu oceny do pasm tercjowych o częstotliwościach środkowych z przedziału od 10 kHz do 40 kHz;
- utrzymanie w ww. pasmach tercjowych dotychczasowych wartości dopuszczalnych, ze względu na ochronę zdrowia (NDN) i w odniesieniu do stanowisk pracy dla grup pracowników o szczególnej wrażliwości (kobiety ciężarne, osoby młodociane).

5 Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego

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 (Dz.U. 2018 poz. 1286). W rozporządzeniu tym są podane dopuszczalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy, ustalone dla poszczególnych pasm tercjowych z zakresu częstotliwości 10-40 kHz (Tab. 2), przy czym 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 ($L_{dop,max}$).

Tab. 2. Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego, ustalone ze względu na ochronę zdrowia pracowników

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

W odniesieniu do prac wzbronionych kobietom i młodocianym obowiązują 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 i 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 na taki hałas kobiet w ciąży, przedstawiono w Tab. 3 a przy zawodowym narażeniu osób młodocianych, w

Tab. 4.

Tab. 3. Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego w odniesieniu do kobiet ciężarnych

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

Tab. 4 Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego w odniesieniu do osób młodocianych

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 na świecie wynika, że niewiele krajów posiada odrębne, obowiązujące przepisy prawne dotyczące ekspozycji na ultradźwięki w środowisku pracy. Najczęściej funkcjonują one w formie zaleceń lub norm instytucji bhp, opartych na międzynarodowych wytycznych (Tab. 5). Historycznie kluczową rolę odegrały tymczasowe wytyczne IRPA z 1984 r., które zalecały dla ekspozycji zawodowej 110 dB SPL dla częstotliwości powyżej 20 kHz oraz znacznie niższy próg 75 dB SPL w pasmie 20 kHz (ze względu na możliwe odczuwanie ultradźwięków na granicy słyszalności). Wiele państw – m.in. Polska, Francja, Wielka Brytania, Niemcy – adoptowało te wytyczne IRPA (bądź bardzo zbliżone) jako podstawę swoich rekomendacji. Niemcy Francja i Wielka Brytania nie wprowadziły dotąd odrębnych limitów – zalecają kierowanie się literaturą i standardami międzynarodowymi; np. w Niemczech podkreśla się brak jednoznacznych kryteriów ochronnych powyżej 8 kHz z uwagi na niedostatek badań.

Z kolei USA i Kanada rozwinęły własne wytyczne. ACGIH (USA) początkowo przyjmował podobny poziom jak IRPA (105–115 dB powyżej 20 kHz), jednak nowsze zalecenia podwyższyły dopuszczalne wartości o 30 dB (do 140–145 dB SPL w pasmach ultradźwiękowych 25–100 kHz) pod warunkiem braku kontaktu ultradźwięków z ciałem. Ma to związek z oceną, że wcześniejsze limity były nadmiernie

rygorystyczne. Health Canada natomiast utrzymała konserwatywne podejście (75 dB dla 16–20 kHz, 110 dB powyżej 20 kHz).

Istotnym argumentem za aktualizacją jest fakt, że polskie limity różnią się znacząco od zaleceń uznanych instytucji międzynarodowych. W niektórych przypadkach są mniej restrykcyjne, w innych bardziej, co świadczy o niespójności i braku jednolitego standardu. Przykładowo, IRPA (1984) dla ekspozycji zawodowej rekomendowała maksymalny poziom 75 dB w pasmie 20 kHz, kierując się tym, że dolna część tego pasma może być słyszalna dla młodych pracowników. Health Canada, w swoim kodeksie bezpieczeństwa z 1991 r., przyjęła tę wartość 75 dB jako dopuszczalny poziom 8-godzinny dla 20 kHz, zaostrzając wcześniejszy własny limit wynoszący 110 dB. Uzasadniono to faktem, że częstotliwości ~16–20 kHz leżą na skraju słyszalności i nawet częściowa słyszalność ultradźwięku może powodować dyskomfort, więc limit należy zbliżyć do proggu słyszenia najwrażliwszych osób. Na tym tle Polska norma 90 dB dla 20 kHz wydaje się relatywnie wysoka – o 15 dB powyżej zaleceń IRPA i Kanady. Co ciekawe jednak, z kolei amerykańskie podejście ACGIH (Threshold Limit Values) przez długi czas dopuszczało znacznie łagodniejsze kryterium w tym paśmie – 105 dB przy 20 kHz (dla ekspozycji ciągłej).

Tab. 5. Tabela porównawcza dopuszczalnych poziomów ultradźwięków w środowisku pracy w innych krajach

Kraj	Przepisy	Dopuszczalne wartości ekspozycji	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; dodatkowo TLV definiuje TWA 8h ~88–94 dB przy 10–20 kHz) – wyższe poziomy mogą wywołać subiektywne efekty (np. dyskomfort) >20 kHz: 115 dB (wartość szczytowa przy potencjalnym kontakcie ciała z medium; 145 dB jeśli brak możliwości sprzężenia ultradźwięków z ciałem)	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 (dla 1/3-oktawowych pasm 16 kHz i 20 kHz) 25–50 kHz: 110 dB (dla pasm 25, 31,5, 40, 50 kHz) <i>Uwaga: Limity niezależne od czasu ekspozycji (efekty mogą wystąpić natychmiast), dotyczą poziomu ciągłego 8-godzinnego. Powyższe wartości można przekroczyć tylko przy zastosowaniu ochronników słuchu redukujących poziom do tych limitów.</i>	Health Canada – Guidelines for Safe Use of Ultrasound: Part II (Safety Code 24).
Francja	Brak osobnych przepisów ustawowych; zalecenia INRS (instytut BHP) oparte na wytycznych międzynarodowych (IRPA 1984).	8–20 kHz: 75 dB (dla każdej 1/3-oktawy 8, 10, 12,5, 16, 20 kHz) 20–50 kHz: 110 dB (dla każdej 1/3-oktawy 25, 31,5, 40, 50 kHz) <i>Uwaga: Limity dla ekspozycji 8-godzinnej; przy krótszych ekspozycjach dopuszcza się korektę +3 do +9 dB (wg zaleceń IRPA).</i>	INRS – rekomendacje bhp (2006); IRPA/INIRC 1984 (wytyczne tymczasowe).
Niemcy	Brak oficjalnych norm dotyczących ultradźwięków w powietrzu; istnieje wytyczna techniczna VDI 3766:2012 (pomiar i ocena), jednak brak krajowych wartości granicznych z powodu niewystarczających danych naukowych.	Brak ustalonych krajowych wartości – w praktyce stosowane są zalecenia międzynarodowe (historycznie IRPA 1984). Niemieckie źródła wskazują na brak kryteriów oceny powyżej 8 kHz. (Dla porównania: IRPA zalecała 75 dB przy 20 kHz i 110 dB dla >20 kHz, co bywa przyjmowane orientacyjnie.)	VDI 3766:2012 (wytyczne inżynierskie); publikacje DGUV/IFA.
Wielka Brytania (UK)	Brak specyficznych limitów prawnych dla ultradźwięków; obowiązują ogólne przepisy dot. hałasu w pracy (nie uwzględniają eksplicite >20 kHz). Organy takie jak HSE i PHE zalecają kierowanie się wytycznymi IRPA/WHO.	Brak własnych norm – zaleca się nieprzekraczanie poziomów uznanych międzynarodowo za bezpieczne: ok. 75–85 dB w pasmach 10–20 kHz (aby zapobiec uciążliwości i efektom subiektywnym) oraz ok. 105–110 dB powyżej 20 kHz.	HSE Research Report CRR 343 (2001); wytyczne WHO/IRPA 1984.

<p>Japonia</p>	<p>Wytyczne rządowe ustanowione już w latach 70. (Ministerstwo Pracy, 1971). Aktualne normy opierają się na tych wczesnych ustaleniach.</p>	<p>8–16 kHz: 90 dB (dla każdej 1/3-oktawy 8, 10, 12,5, 16 kHz).</p> <p>≥20 kHz: 110 dB (dla 1/3-oktaw 20, 25, 31,5, 40, 50 kHz)</p> <p><i>Uwagi: Limity japońskie z 1971 r. były jednymi z pierwszych – ustalono stały poziom 90 dB dla wysokich częstotliwości słyszalnych i 110 dB dla ultradźwięków, co miało zapobiegać zarówno dolegliwościom subiektywnym, jak i efektom fizjologicznym.</i></p>	<p>Normy Japonii (1971) – za: INRS/Health Canada.</p>
<p>Rosja (d. ZSRR)</p>	<p>Normy higieniczne z okresu ZSRR (1975) – formalnie obowiązywały w zakładach pracy; współcześnie prawdopodobnie nadal stosowane w Federacji Rosyjskiej (brak nowszych jawnych danych).</p>	<p>12,5 kHz: 75 dB</p> <p>16 kHz: 85 dB</p> <p>20–50 kHz: 110 dB (dla każdej 1/3-oktawy)</p> <p><i>Uwagi: Radzieckie normy były dość rygorystyczne w okolicy granicy słyszalności (np. 75 dB przy 12,5 kHz) i łączyły się z wymogami higieny pracy.</i></p>	<p>Normy ZSRR (1975) – za: publ. IRPA/Health Canada.</p>
<p>Szwecja</p>	<p>Zalecenia państwowe (Arbetarskyddsstyrelsen, ok. 1978) – niewiążące prawnie, lecz stosowane w praktyce.</p>	<p>16 kHz: brak oficjalnego limitu (w zaleceniach skupiono się na >20 kHz).</p> <p>20 kHz: 105 dB</p> <p>25 kHz: 110 dB</p> <p>31,5–50 kHz: 115 dB</p> <p><i>Uwagi: Szwedzkie wartości zbliżone były do późniejszych wytycznych ACGIH – bardziej liberalne niż IRPA przy 20 kHz (105 dB zamiast 75 dB) i wyższe limity dla wyższych częstotliwości (do 115 dB) w celu uniknięcia nadmiernej surowości limitów.</i></p>	<p>Rekomendacje Szwecji (1978) – za: INRS/OSHA.</p>

Różnica ta wynikała z odmiennej interpretacji danych: ACGIH uznała, że najniższe częstotliwości ultradźwiękowe (ok. 20 kHz) powinny podlegać zasadom jak dla zwykłego hałasu wysokoczęstotliwościowego, stąd pułap 105 dB zbliżony do ochrony słuchu przed dźwiękami słyszalnymi. Jeszcze dalej posunął się w latach 80.–90. amerykański OSHA, który przez pewien czas zezwalał na dodatkowe podniesienie dopuszczalnego poziomu ultradźwięków o 30 dB pod warunkiem braku składowych słyszalnych. Oznaczało to w praktyce tolerowanie np. ~135 dB zamiast 105 dB, jeśli hałas miał charakter czysto ultradźwiękowy. Tak liberalne podejście spotkało się jednak z krytyką i obecnie jest zarzucone na rzecz bardziej ostrożnych wytycznych. Niemniej, powyższe przykłady świadczą o tym, że rozpiętość dopuszczalnych poziomów 20 kHz w różnych przepisach czy wytycznych (od 75 dB do 105 dB) jest wysoka.

6 Wpływ hałasu ultradźwiękowego na organizm człowieka

6.1 Skutki słuchowe

Współczesne badania nad oddziaływaniem hałasu ultradźwiękowego w powietrzu na narząd słuchu koncentrują się na ocenie przejściowego (TTS) i trwałego (PTS) przesunięcia progów słyszenia, przy czym szczególną rolę odgrywa audiometria wysokoczęstotliwościowa rozszerzona poza zakres standardowy. W raporcie przeglądowym dla brytyjskiego HSE (Lawton 2001) zwrócono uwagę, że w przypadku dźwięków bardzo wysokich częstotliwości (VHF) i ultradźwięków kluczowe jest ujęcie progu percepcji oraz możliwych skutków audiologicznych w kategoriach zmian progowych, z naciskiem na badania w pasmach powyżej 8 kHz.

Badania terenowe z ostatnich dwóch dekad wskazują, że pracownicy obsługujący urządzenia emitujące ultradźwięki mogą doświadczać pogorszenia słuchu w wyższych częstotliwościach słyszalnych. (Macca et al. 2015) stwierdzili istotne podwyższenie progów słuchu w zakresie 10–14 kHz u 24 pracowników narażonych na ultradźwięki w środowisku przemysłowym, w porównaniu do 148 osób nienarażonych (różnica ta występowała ponad wpływ samego starzenia się i typowego hałasu). Również (Mehrparvar et al. 2014) oraz nowsze badania IMP w Łodzi zaobserwowały u osób z ekspozycją ultradźwiękową obniżoną sprawność ślimaka - w badaniach przeprowadzono kompleksową ocenę stanu słuchu operatorów technologicznych urządzeń ultradźwiękowych w odniesieniu do starannie dobranej grupy kontrolnej narażonej wyłącznie na hałas słyszalny o porównywalnym poziomie ekspozycji dobowej (Dudarewicz et al. 2022). Autorzy połączyli standardową audiometrię tonalną z audiometrią wysokoczęstotliwościową oraz rejestracją emisji otoakustycznych (DPOAE, TEOAE), a także kwestionariuszem (mAIADH), równolegle dokonując pomiarów narażenia w pasmach tercjowych 10–40 kHz i w paśmie słyszalnym według ujednoliconych procedur (PN-Z-01339, PN-EN ISO 9612). Środowiska pracy obejmowały głównie zgrzewanie i mycie ultradźwiękowe. W znacznej części stanowisk wartości dopuszczalne dla hałasu ultradźwiękowego były przekroczone, podczas gdy poziomy hałas słyszalnego kształtowały się przeciętnie na poziomie umiarkowanym. W porównaniu z grupą kontrolną nie stwierdzono różnic progów słyszenia do ok. 3 kHz, natomiast w zakresie wyższych częstotliwości (4–14 kHz) operatorzy wykazywali systematycznie gorszą czułość, co potwierdziły również wyniki DPOAE i TEOAE (bardziej wyraźne dla EHFA i DPOAE). Subiektywna samoocena funkcji słuchowych wskazywała na nieco większe trudności w rozróżnianiu dźwięków, lokalizacji źródeł oraz rozumieniu mowy, szczególnie w hałasie. Autorzy podkreślają trudność

rozdzielenia składowych słyszalnych i ultradźwiękowych w łącznej dawce hałasu oraz ograniczenia wynikające z doboru i charakterystyki grup porównawczych.

W pilotażowym badaniu IMP oceniano stan słuchu 25 operatorów zgrzewarek ultradźwiękowych narażonych przez 2–13 lat na hałas impulsowy o komponentach 10–40 kHz oraz porównano uzyskane progi audiometryczne z przewidywaniami normy ISO 1999:1990 dla hałasu słyszalnego (Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska et al. 2007). Pomiar ekspozycji (1/3-oktawy 10–80 kHz, mikrofon przy uchu) wykazał częste przekroczenia polskich wartości dopuszczalnych dla ultradźwięków; po uwzględnieniu efektywnego czasu pracy nadmierne poziomy odnotowano na 60% stanowisk, a poziomy ekspozycji $L_{EX,8h}$ mieściły się w szerokim zakresie, z medianą ok. 82 dB i częstymi przekroczeniami 85 dB zwłaszcza 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 ~7 lat, a rzeczywiste progi w paśmie 2–6 kHz były zgodne z teoretycznymi oszacowaniami według ISO 1999:1990, co sugeruje, że model dla hałasu słyszalnego może użytecznie prognozować trwałe przesunięcia progu także przy ekspozycjach z komponentą ultradźwiękową.

W kolejnych badaniach IMP porównano progi słyszenia 90 pracowników narażonych na hałas zgrzewarek ultradźwiękowych (wraz z komponentem słyszalnym) z grupą referencyjną 156 osób eksponowanych wyłącznie na hałas słyszalny o zbliżonych poziomach $L_{EX,8h}$ (Dudarewicz et al. 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 wartości dopuszczalnych dla ultradźwięków na stanowiskach pracy, nie odnotowano różnic progów słyszenia w zakresie 0,5–6 kHz między grupami, natomiast w zakresie wysokich częstotliwości (8–12,5 kHz) u pracowników narażonych na hałas z komponentą ultradźwiękową stwierdzono istotnie wyższe (gorsze) progi słyszenia, co autorzy wiążą z odmiennym składem widmowym ekspozycji.

W innych badaniach dot. zmian słuchowych i pozasłuchowych występujących u lekarzy dentystów bezpośrednio po godzinnej pracy z użyciem skalerów ultradźwiękowych wykorzystano audiometrię tonalną (PTA), tympanometrię z odruchem strzemiączkowym oraz emisje otoakustyczne (OAE) (Chopra et al. 2016). Autorzy wykazali spójny wzorzec czasowego upośledzenia funkcji narządu słuchu (wzrost progów słyszenia w PTA), podwyższenie progów odruchu strzemiączkowego i zmianę ciśnień ucha środkowego oraz istotne obniżenie amplitud OAE, co łącznie wskazuje na rozwój przejściowego przesunięcia progu (TTS) z towarzyszącą dysfunkcją komórek rzęsatych ślimaka. Efekty te były asymetryczne (częściej wyraźniejsze dla ucha lewego) i współwystępowały z objawami pozasłuchowymi typowymi dla reakcji stresowej na hałas (m.in. szum uszny, ból ucha, znużenie mięśni rąk, drażliwość, subiektywne pogorszenie komfortu). W dyskusji podkreślono biologiczne mechanizmy, poprzez które powtarzające się TTS oraz zmiany w OAE mogą akumulować się w czasie, zwiększając ryzyko trwałego uszkodzenia słuchu (PTS), a także znaczenie czynników modyfikujących (wiek, podatność osobnicza, organizacja pracy i utrzymanie sprzętu). Autorzy sugerowali włączenie personelu stomatologicznego w programy ochrony słuchu, stosowanie ochronników indywidualnych, ograniczanie łącznego czasu ekspozycji i regularne monitorowanie słuchu (zwłaszcza z użyciem OAE jako wskaźnika wczesnych zmian), zaznaczając jednocześnie potrzebę dalszych badań nad długoterminowymi następstwami ekspozycji na hałas o komponentach ultradźwiękowych w praktyce stomatologicznej.

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

6.2 Skutki termiczne:

Ultradźwięki niosą 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, skutkujące ostrym uszkodzeniem tkanek (oparzenia, uszkodzenia skóry). Już przy poziomach rzędu 140–150 dB obserwowano u ludzi 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 powietrznych przenika w głąb nieosłoniętej skóry, reszta jest odbijana. Oznacza to, że ciało ludzkie jest stosunkowo słabo podatne na pochłanianie energii ultradźwiękowej z powietrza – w przeciwieństwie do sytuacji, gdy ultradźwięki są wprowadzane bezpośrednio do tkanek (np. w kontakcie poprzez głowicę ultradźwiękową w fizykoterapii) (Moyano et al. 2022; Pawlaczyk-Łuszczynska i Dudarewicz 2020).

Od czasu ustalenia wstępnych wytycznych IRPA w 1984 r. nie odnotowano nowych danych sugerujących zagrożenie efektem cieplnym 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 i lokalizacja tego zjawiska zależą zarówno od częstotliwości, jak i warunków propagacji. W zakresie niskich ultradźwięków (20–100 kHz), typowym dla urządzeń przemysłowych, energia akustyczna jest pochłaniana głównie w warstwach powierzchniowych, prowadząc do miejscowego wzrostu temperatury skóry oraz struktur podskórnych (Ahmadi et al. 2012). Autorzy zwracają uwagę, że w warunkach zawodowych, mimo znacznie niższych poziomów mocy niż w zastosowaniach terapeutycznych, miejscowe efekty cieplne mogą występować przy długotrwałej ekspozycji kontaktowej z elementami

generującymi ultradźwięki, zwłaszcza przy niewłaściwym ekranowaniu lub braku kontroli temperatury urządzenia.

Obowiązujące normy bezpieczeństwa pozostają ostrożne, np. Health Canada (Canada 2018) i HPA zalecają, by poziomy natężenia ultradźwięków nie przekraczały wartości, przy których mogłoby dojść do podniesienia temperatury tkanek powyżej fizjologicznych norm. Przyjmuje się, że wzrost temperatury tkanki do 41°C utrzymany przez 5 minut lub dłużej stwarza już istotne ryzyko uszkodzeń (np. przegrzania komórek) (Moyano et al. 2022). Analizy wskazują, iż 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 środowisku pracy typowe poziomy ultradźwięków (np. przy wanienkach ultradźwiękowych, spawarkach, urządzeniach czyszczących) są znacznie niższe od progów powodujących efekt termiczny. Dotychczas nie opisano przypadku oparzeń czy uszkodzeń termicznych u ludzi wynikających z samego hałasu ultradźwiękowego w powietrzu – takie skutki mogą wystąpić jedynie przy skrajnie wysokich natężeniach, które w normalnych warunkach nie powinny mieć miejsca (zwłaszcza przy przestrzeganiu norm NDN). Warto dodać, że mniej oczywistym efektem termicznym może być uczucie ciepła lub gorąca w uchu/na twarzy zgłaszane przy ekspozycji bardzo blisko silnego źródła ultradźwięków. Jest to jednak zjawisko krótkotrwałe i lokalne.

6.3 Pozostałe skutki

Niektóre badania sugerują, że ultradźwięki poniżej progu słyszenia mogą wywierać mierzalny wpływ na układ nerwowy (Weichenberger et al. 2022). W badaniach zastosowano funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI) do zbadania aktywności mózgu osób eksponowanych na ton 21,5 kHz zarówno tuż powyżej, jak i nieco poniżej ich indywidualnego progu słyszenia. Ku zaskoczeniu badaczy, przy stymulacji poniżej progu (czyli gdy uczestnicy nie słyszeli ultradźwięku świadomie) doszło do pobudzenia obszarów kory czołowej (dolny zakręt czołowy) związanych z siecią kontroli poznawczej. Nie obserwowano zaś istotnej aktywacji kory słuchowej przy bodźcu słyszalnym tuż nad progiem. Wynik ten zinterpretowano jako wzrost obciążenia poznawczego – obecność słabego ultradźwięku niesłyszalnego świadomie mogła podprogowo rozpraszać uwagę i zmuszać mózg do dodatkowego wysiłku w zadaniu wymagającym koncentracji. Choć mechanizmy tych zjawisk wymagają dalszych badań, implikacja jest jasna: nawet ultradźwięki formalnie niesłyszalne mogą wpływać na organizm, np. w sposób subtelnie zaburzający funkcje poznawcze. To zaś oznacza, że brak odczucia dźwięku nie gwarantuje braku efektu – ważne spostrzeżenie z perspektywy ustalania NDN.

W omawianych powyżej badaniach (Macca et al. 2015) zebrano również dane o dolegliwościach pozasłuchowych. W grupie narażonej na ultradźwięki istotnie częściej zgłaszano astenie i zawroty głowy (analiza χ^2), zwykle pod koniec zmiany lub w jej trakcie. Część objawów utrzymywała się jeszcze przez kilka dni po ekspozycji i nie pojawiała się poza pracą. Autorzy wskazują, że spektrum subiektywnych dolegliwości (zmęczenie, ból głowy, nudności, uczucie pełności w uszach, chwiejność chodu, zaburzenia snu) bywa wzmacniane przez składowe słyszalne/subharmoniczne współwystępujące z emisją ultradźwięków.

W ostatnich latach podjęto próby oceny, czy ultradźwięki mogą wpływać na czynności mózgu, takie jak koncentracja, uwaga czy funkcje poznawcze. Wyniki tych badań są na razie uspokajające – nie wykazano poważnych zaburzeń funkcji poznawczych w następstwie ekspozycji ultradźwiękowej o natężeniach spotykanych w praktyce. Przykładowo, Fletcher i in. (2018) przeprowadzili dwa uzupełniające eksperymenty: w pierwszym badali wpływ dźwięku o bardzo wysokiej częstotliwości słyszalnej (VHFS, 17.5 kHz, ~90 dB) na samopoczucie i zdolność uwagi, a w drugim – wpływ nie słyszalnego ultradźwięku 20 kHz (~84 dB) w warunkach podwójnie ślepej próby. W pierwszym przypadku część osób zgłaszała objawy (ból głowy, dyskomfort) przy ekspozycji na słyszalny sygnał VHFS. Natomiast w drugim – gdy bodziec 20 kHz był poniżej progu słyszenia – nie odnotowano różnic w wynikach testów uwagi ani w odczuwaniu między grupą eksponowaną a kontrolną. Innymi słowy, dźwięk niesłyszalny nie wywarł istotnego wpływu na sprawność poznawczą ani samopoczucie badanych, co popiera wspomnianą wcześniej hipotezę progu percepcji. Podobnie Ascone i in. (2021) w badaniu prowokacyjnym, gdzie ochotnicy przez 28 kolejnych nocy byli eksponowani (bądź 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 ci odnotowali co prawda pewne zmiany w obrazowaniu mózgu (MRI) po ekspozycji, zarówno wzrost, jak i spadek objętości istoty szarej w niektórych obszarach, jednak zmiany te były niewielkie i trudne do zinterpretowania.

W innym eksperymencie laboratoryjnym zbadano, 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 et al. 2022). We wszystkich kluczowych porównaniach uzyskano jednoznaczne, dodatnie dowody na brak wpływu ekspozycji na funkcje poznawcze. Ani trafność, ani czasy reakcji nie różniły się między grupami z ekspozycją na ultradźwięki i kontrolną. Uczestnicy nie potrafili też wiarygodnie wskazać, kiedy bodziec był obecny, co dodatkowo przemawia przeciwko hipotezie o doraźnym pogorszeniu koncentracji czy uwagi pod wpływem ekspozycji na ultradźwięki. Przy poziomach rzędu 120 dB SPL i ekspozycjach do ~30–45 min nie stwierdzono mierzalnego pogorszenia wydajności w zadaniach wymagających reakcji i podtrzymywania uwagi, choć autorzy wskazują na potrzebę dalszych badań w innych populacjach i scenariuszach.

7 Propozycje nowych wartości dopuszczalnych hałasu ultradźwiękowego

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

- utrzymanie jako podstawy oceny narażenia na hałas ultradźwiękowy równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego odniesionych do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy i maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego, określonych w pasmach tercjowych (10-40 kHz);
- utrzymanie metody oceny narażenia na hałas ultradźwiękowy zgodnie z PN-Z-01339:2020;
- zmianę dotychczasowych wartości dopuszczalnych, ze względu na ochronę zdrowia (NDN) (pasmo 1/3 oktawowo o częstotliwości środkowej 20 kHz);

- wprowadzenie progów działania analogicznie do zakresu 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 rozporządzenie w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy) – rozszerzenie zakresu audiometrii tonalnej o zakres 8-16 kHz.
- utrzymanie wartości dopuszczalnych ujętych w Rozporządzeniu 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 oraz Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 19 czerwca 2023 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym i warunków ich zatrudniania przy niektórych z tych prac.

Tab. 6. Propozycja nowych wartości NDN i progów działania dla hałasu ultradźwiękowego

Częstotliwość środkowa 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

Powyższą propozycję uzasadniają zarówno wyniki eksperymentu laboratoryjnego (Radosz 2025), jak i dane z badań w przemyśle (Dudarewicz et al. 2017; 2022; Macca et al. 2015; M. Pawlaczyk-Łuszczczyńska et al. 2007b; 2007a) potwierdzające, że pasmo tercjowe o częstotliwości środkowej 20 kHz stanowi pasmo o najwyższym ryzyku przekroczeń i wystąpienia skutków słuchowych. 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) powodowała istotne statystycznie czasowe przesunięcia progu słyszenia (TTS). Obniżenie poziomu ekspozycji o 5 dB eliminowało zmiany progów słyszenia w badanym zakresie (1–16 kHz). Dodatkowo odnotowano pogorszenie wyników w testach czasu reakcji, co wskazuje, że ekspozycja na hałas ultradźwiękowy o obecnie dopuszczalnym poziomie wpływa również na funkcje psychomotoryczne. Równolegle, dane środowiskowe z szeroko zakrojonych badań terenowych prowadzonych w zakładach przemysłowych wykazały, że pasmo 20 kHz jest dominujące w emisji hałasu ultradźwiękowego i najczęściej odpowiedzialne za przekroczenia wartości dopuszczalnych. W pomiarach przeprowadzonych na 233 stanowiskach pracy stwierdzono, że najwyższe poziomy równoważne i maksymalne występują właśnie w tercjach 10–25 kHz, ze szczególnym udziałem źródeł pracujących w okolicach 20 kHz – zwłaszcza zgrzewarek ultradźwiękowych i maszyn do obróbki tkanin. Badania stanu słuchu osób narażonych na hałas ultradźwiękowy potwierdzają z kolei, że przy poziomach ekspozycji zbliżonych do obecnych wartości NDN dochodzi

do istotnych zmian audiometrycznych. U operatorów urządzeń ultradźwiękowych obserwowano istotnie gorsze progi słuchu w zakresie wysokich częstotliwości (4–14 kHz) względem grup kontrolnych, pomimo podobnych poziomów hałasu A-ważonego. W kontekście pomiarów środowiskowych, które wskazują na częste przekroczenia wartości dopuszczalnych w pasmach 10–25 kHz, zwłaszcza przy 20 kHz, taki profil wyników potwierdza niedostateczną skuteczność obowiązującej wartości granicznej.

8 Bibliografia

ACGIH, The Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs), 2024

Acton, W. I. 1968. „A criterion for the prediction of auditory and subjective effects due to airborne noise from ultrasonic sources”. *Annals of Occupational Hygiene* 11 (3): 227–234. <https://doi.org/10.1093/annhyg/11.3.227>.

Acton, W. I. 1974. „The effects of industrial airborne ultrasound on humans”. *Ultrasonics* 12 (3): 124–128. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(74\)90069-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(74)90069-9).

Acton, W. I. 1975. „Exposure criteria for industrial ultrasound”. *Annals of Occupational Hygiene* 18 (3): 267–268. <https://doi.org/10.1093/annhyg/18.3.267>.

Acton, W. I. 1983. „Exposure to industrial ultrasound: hazards, appraisal and control”. *Journal of the Society of Occupational Medicine* 33 (3): 107–113. <https://doi.org/10.1093/occmed/33.3.107>.

Acton, W. I., & M. B. Carson. 1967. „Auditory and subjective effects of airborne noise from industrial ultrasonic sources”. *British Journal of Industrial Medicine* 24 (4): 297–304. <https://doi.org/10.1136/oem.24.4.297>.

Acton, W. I., & M. B. Carson. 1975. „Auditory and subjective effects of airborne ultrasound in laboratory assistants”. *Journal of Sound and Vibration* 42 (2): 227–243. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(75\)90419-2](https://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90419-2).

Ahmadi, F., I. V. McLoughlin, S. Chauhan, & G. ter Haar. 2012. „Bioeffects and safety of low-intensity, low-frequency ultrasonic exposure”. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 108 (3): 119–138. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2012.01.004>.

Ahmed, H. O., J. H. Dennis, O. Badran, et al. 2001. „High frequency (10–18 kHz) hearing thresholds: reliability, and effects of age and occupational noise exposure”. *Occupational Medicine* 51 (4): 245–258. <https://doi.org/10.1093/occmed/51.4.245>.

Allen, C. H., H. Frings, & I. Rudnik. 1948. „Some biological effects of intense high frequency airborne sound”. *JASA* 20 (1): 62–65. <https://doi.org/10.1121/1.1906349>.

Ascone, L., C. Kling, J. Wiecek, C. Koch, & S. Kühn. 2021. „A Longitudinal, Randomized Experimental Pilot Study to Investigate the Effects of Airborne Infrasound on Human Mental Health, Cognition, and Brain Structure”. *Scientific Reports* 11: 3190. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82203-6>.

Ashihara, K. 2007. „Hearing thresholds for pure tones above 16 kHz”. *JASA* 122 (3): EL52–EL57. <https://doi.org/10.1121/1.2761883>.

Ashihara, K., K. Kurakata, T. Mizunami, & K. Matsushita. 2006. „Hearing threshold for pure tones above 20 kHz”. *Acoustical Science and Technology* 27 (1): 12–19. <https://doi.org/10.1250/ast.27.12>.

Bass, H. E., L. C. Sutherland, A. J. Zuckerwar, D. T. Blackstock, & D. M. Hester. 1995. „Atmospheric Absorption of Sound: Further Developments”. *JASA* 97 (1): 680–683. <https://doi.org/10.1121/1.412989>.

Di Battista, A. (b.d.). The Effect of 40 kHz Ultrasonic Noise Exposure on Human Hearing.

Health Canada. 2018. „Guidelines for the Safe Use of Ultrasound: Part II – Industrial & Commercial Applications (Safety Code 24)”.

- Carcagno, S., A. Di Battista, & C. J. Plack. 2019. „Effects of High-Intensity Airborne Ultrasound Exposure on Behavioural and Electrophysiological Measures of Auditory Function”. *Acta Acustica united with Acustica* 105 (11): 1183–1197. <https://doi.org/10.3813/AAA.919395>.
- Cheng, J. T., I. Ghanad, A. Remenschneider, & J. Rosowski. 2021. „The Onset of Nonlinear Growth of Middle-Ear Responses to High Intensity Sounds”. *Hearing Research* 405: 108242. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2021.108242>.
- Chopra, A., B. S. Thomas, K. Mohan, & K. Sivaraman. 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. <https://doi.org/10.3290/j.ohpd.a36520>.
- Cieslak, M., C. Kling, & A. Wolff. 2021. „Development of a Personal Ultrasound Exosimeter for Occupational Health Monitoring”. *IJERPH* 18 (24): 13289. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413289>.
- „Construction Material of the Sound Conduction System of the Human Ear”. *JASA (AIP Publishing)*, 2025.
- HSE. 2025. „Controlling noise at work – L108”.
- Government of Canada (DCIEM). Crabtree, R. B., & S. E. Forshaw. 1977. *Exposure to ultrasonic cleaner noise in the Canadian Forces*. (Oficjalna publikacja rządowa).
- Dallos, P. J., & C. O. Linnell. 1966. „Even-Order Subharmonics in the Peripheral Auditory System”. *JASA* 40 (3): 561–564. <https://doi.org/10.1121/1.1910119>.
- Dallos, P. J., & C. O. Linnell. 1966. „Subharmonic components in cochlear-microphonic potentials”. *JASA* 40 (1): 4–11. <https://doi.org/10.1121/1.1910063>.
- Danner, P. A., E. Ackerman, & H. W. Frings. 1954. „Heating in haired and hairless mice in high intensity sound fields from 6–22 kHz”. *JASA* 26 (1): 141–142.
- Di Battista, A., A. Price, R. Malkin, B. W. Drinkwater, P. Kuberka, & C. Jarrold. 2022. „The effects of high-intensity 40 kHz ultrasound on cognitive function”. *Applied Acoustics* 200: 109051. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109051>.
- Dobroserdov, V. K. 1967. *Gigiena i Sanitariya* 32: 17–21.
- Duck, F., & T. G. Leighton. 2018. „Frequency bands for ultrasound, suitable for the consideration of its health effects”. *JASA* 144 (4): 2490. <https://doi.org/10.1121/1.5063578>.
- Dudarewicz, A., K. Zaborowski, P. Rutkowska-Kaczmarek, et al. 2017. „The Hearing Threshold of Employees Exposed to Noise Generated by the Low-Frequency Ultrasonic Welding Devices”. *Archives of Acoustics* 42 (2): 199–205. <https://doi.org/10.1515/aoa-2017-0022>.
- Dudarewicz, A., M. Zamojska-Daniszevska, K. Zaborowski, & M. Pawlaczyk-Łuszczynska. 2022. „Hearing Status of People Occupationally Exposed to Ultrasonic Noise”. *IJOMEH* 35 (3): 309–325. <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.01816>.
- WHO Regional Office for Europe. 2020. „Environmental Noise in Europe — 2020”.
- Fastl, H. 2005. „Psycho-Acoustics and Sound Quality”. W: *Communication Acoustics*, red. J. Blauert. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-27437-5_6.
- Fletcher, M. D., S. L. Jones, P. R. White, C. N. Dolder, T. G. Leighton, & B. Lineton. 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. <https://doi.org/10.1121/1.5063819>.
- Fletcher, M. D., S. L. Jones, P. R. White, C. N. Dolder, B. Lineton, & T. G. Leighton. 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. <https://doi.org/10.1121/1.5063818>.
- Fletcher, M. D., S. Lloyd Jones, P. R. White, C. N. Dolder, T. G. Leighton, & B. Lineton. 2018. „Public exposure to ultrasound and very high-frequency sound in air”. *JASA* 144 (4): 2554. <https://doi.org/10.1121/1.5063817>.

- Fujioka, T., R. Kakigi, A. Gunji, & Y. Takeshima. 2002. „The auditory evoked magnetic fields to very high frequency tones”. *Neuroscience* 112 (2): 367–381. [https://doi.org/10.1016/S0306-4522\(02\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0306-4522(02)00086-6).
- Grigor'eva, V. M. 1965. *Akusticheski Zhurnal* 11 (4): 469–497.
- Grigor'eva, M. 1966. *Sov. Phys. Acoust.* 2: 426–427.
- Grzesik, J., & E. Pluta. 1978. „Hearing threshold levels in operators of industrial ultrasonic devices”. *Int Arch Occup Environ Health* 41: 105–115. <https://doi.org/10.1007/BF00378491>.
- Grzesik, J., & E. Pluta. 1983. „High-Frequency Hearing Risk of Operators of Industrial Ultrasonic Devices”. *Int Arch Occup Environ Health* 53 (1): 77–88. <https://doi.org/10.1007/BF00406179>.
- Grzesik, J., & E. Pluta. 1986. „Dynamics of high frequency hearing loss of operators of industrial ultrasonic devices”. *Int Arch Occup Environ Health* 57 (2): 137–142. <https://doi.org/10.1007/BF00381381>.
- Grzesik, J., & E. Pluta. 1986. „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. <https://doi.org/10.1007/BF00381380>.
- Health Canada. 1991. „Guidelines for the Safe Use of Ultrasound: Part II – Industrial and Commercial Applications (Safety Code 24)”.
- Hemilä, S., S. Nummela, & T. Reuter. 1995. „What Middle Ear Parameters Tell about Impedance Matching and High Frequency Hearing”. *Hearing Research* 85 (1–2): 31–44. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(95\)00031-X](https://doi.org/10.1016/0378-5955(95)00031-X).
- Henry, K. R., & G. A. Fast. 1984. „Ultrahigh-frequency auditory thresholds in young adults...”. *Audiology* 23 (5): 477–489. <https://doi.org/10.3109/00206098409070087>.
- Herman, B. A., & D. Powell. 1981. *Airborne ultrasound: Measurement and possible adverse effects*. HHS (FDA) 81-8163.
- Holmberg, K., U. Landström, & B. Nordström. 1995. „Annoyance and Discomfort during Exposure to High-Frequency Noise from an Ultrasonic Washer”. *Perceptual and Motor Skills* 81 (3 Pt 1): 819–827. <https://doi.org/10.2466/pms.1995.81.3.819>.
- Hosoi, H., S. Imaizumi, T. Sakaguchi, M. Tonoike, & K. Murata. 1998. „Activation of the auditory cortex by ultrasound”. *The Lancet* 351 (9101): 496–497. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)78683-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)78683-9).
- Huang, S., W. Dong, & E. S. Olson. 2012. „Subharmonic Distortion in Ear Canal Pressure and Intracochlear Pressure and Motion”. *JARO* 13 (4): 461–471. <https://doi.org/10.1007/s10162-012-0326-3>.
- I. Salleh, M.Z. Md. Zain, R.I. Raja Hamzah. 2022. „Evaluation of Annoyance and Suitability of a Back-Up Warning Sound for Electric Vehicles”. *IJAME* 8: 1267–1277. <https://doi.org/10.15282/ijame.8.2013.16.0104>.
- IRPA. 1984. „Interim guidelines on limits of human exposure to airborne ultrasound”. *Health Physics* 46 (4): 969–974.
- ICNIRP. 2010. „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)”. *Health Physics* 99 (6): 818–836.
- ICNIRP. 2017. „ICNIRP Statement on Diagnostic Devices Using Non-Ionizing Radiation...”. *Health Physics* 112 (3): 305–321.
- ICNIRP. 2020. „Principles for Non-Ionizing Radiation Protection”. *Health Physics* 118 (5): 477–482.
- ICNIRP. 2020. „Intended Human Exposure to Non-Ionizing Radiation for Cosmetic Purposes”. *Health Physics* 118 (5): 562–579.

ICNIRP. 2024. „Validity of the 1984 Interim Guidelines on Airborne Ultrasound and Gaps in the Current Knowledge”. *Health Physics* 127 (2): 326–347. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001800>.

ISO. 2013/2025 page. „ISO 1999:2013”.

IEC 61672-1:2013. *Electroacoustics – Sound Level Meters – Part 1: Specifications*.

Izadifar, Z., P. Babyn, & D. Chapman. 2017. „Mechanical and biological effects of ultrasound: a review...”. *Ultrasound in Medicine & Biology* 43 (6): 1085–1104. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2017.01.023>.

Kling, C., R. Schöneweiß, A. Wolff, & C. Ullisch-Nelken. 2017/2024. „Investigations on Airborne Ultrasound at Working Places”. ICSV24 (London). <https://doi.org/10.25144/23860>.

Knight, J. J. 1968. „Effects of airborne ultrasound on man”. *Ultrasonics* 6 (1): 39–41. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(68\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0041-624X(68)90016-4).

Koch, C. 2017. „Hearing beyond the limit: Measurement, perception and impact of infrasound and ultrasonic noise”. ICEN 2017.

Kühler, R., M. Weichenberger, M. Bauer, et al. 2019. „Does Airborne Ultrasound Lead to Activation of the Auditory Cortex?” *Biomedizinische Technik / Biomedical Engineering* 64 (4): 481–493. <https://doi.org/10.1515/bmt-2018-0048>.

Lawton, B. W. 2001. „Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency”. HSE Research Report CRR 343.

Lawton, B. W. 2013. *Exposure limits for airborne sound of very high frequency and ultrasonic frequency*. ISVR Technical Report 334.

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. <https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0624>.

Leighton, T. G. 2020. „Public Exposure to Airborne Ultrasound and Very High Frequency Sound”. *Acoustics Today* 16 (3): 17–28.

Lenhardt, M. L. 2007. „Eyes as Fenestrations to the Ears...”. *International Tinnitus Journal* 13 (1): 3–10.

Macca, I., M. L. Scapellato, M. Carrieri, S. Maso, A. Trevisan, & G. B. Bartolucci. 2015. „High-frequency hearing thresholds: effects of age, occupational ultrasound and noise exposure”. *Int Arch Occup Environ Health* 88 (2): 197–211. <https://doi.org/10.1007/s00420-014-0951-8>.

Pawlaczyk-Łuszczczyńska, M., A. Dudarewicz, & M. Śliwińska-Kowalska. 2007. „Źródła ekspozycji zawodowej na hałas ultradźwiękowy — ocena wybranych urządzeń”. *Medycyna Pracy* 58 (2): 105–116.

Mapp, P. 2018. „Potential Audibility of Ultrasonic Signal Monitoring of Public Address and Life Safety Sound Systems”. *JASA* 144 (4): 2539. <https://doi.org/10.1121/1.5063993>.

Markiewicz, L. 1978. „[Results of the study on the ultrasonic vibrations impact on human body]”. 43.

Masterton, B., H. Heffner, & R. Ravizza. 1969. „The Evolution of Human Hearing”. *JASA* 45 (4): 966–985. <https://doi.org/10.1121/1.1911574>.

Mehrotra, A., S. P. Shukla, A. K. Shukla, M. K. Manar, S. K. Singh, & M. Mehrotra. 2024. „A Comprehensive Review of Auditory and Non-Auditory Effects of Noise on Human Health”. *Noise & Health* 26 (121): 59–69. https://doi.org/10.4103/nah.nah_124_23.

Mehrparvar, A. H., S. J. Mirmohammadi, M. H. Davari, et al. 2014. „Conventional Audiometry, Extended High-Frequency Audiometry, and DPOAE for Early Diagnosis of NIHL”. *Iranian Red Crescent Medical Journal* 16 (1): e9628. <https://doi.org/10.5812/ircmj.9628>.

Milkov, L. E., V. M. Grigor'eva, V. I. Stepanova, et al. 1968. *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniya* 12: 8–14.

Möller, P., A. O. Grevstad, & T. Kristoffersen. 1976. „Ultrasonic scaling of maxillary teeth causing tinnitus and temporary hearing shifts”. *Journal of Clinical Periodontology* 3 (2): 123–127. <https://doi.org/10.1111/j.1600-051X.1976.tb01858.x>.

Moyano, D. B., D. A. Paraiso, & R. A. González-Lezcano. 2022. „Possible Effects on Health of Ultrasound Exposure...”. *Healthcare* 10 (3): 423. <https://doi.org/10.3390/healthcare10030423>.

Neitzel, R. L., & B. J. Fligor. 2019. „Risk of Noise-Induced Hearing Loss Due to Recreational Sound: Review and Recommendations”. *JASA* 146 (5): 3911. <https://doi.org/10.1121/1.5132287>.

Neppiras, E. A. 1980. „Acoustic cavitation thresholds and cyclic processes”. *Ultrasonics* 18: 201–209. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(80\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0041-624X(80)90120-1).

Oohashi, T., E. Nishina, M. Honda, et al. 2000. „Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: hypersonic effect”. *Journal of Neurophysiology* 83 (6): 3548–3558. <https://doi.org/10.1152/jn.2000.83.6.3548>.

Parrack, H. O. 1952. „Ultrasound and industrial medicine”. *Industrial Medicine and Surgery* 21 (4): 156–164.

Parrack, H. O. 1966. „Effect of Air-Borne Ultrasound on Humans”. *International Audiology* 5 (3): 294–308. <https://doi.org/10.3109/05384916609074198>.

Pawlaczyk-Łuszczynska, M., J. Koton, M. Śliwińska-Kowalska, D. Augustyńska, & M. Kameduła. 2001. „[Verified maximum admissible intensity (MAI) values for the ultrasonic noise in work environment]”. *Medycyna Pracy* 52 (3): 221–226.

Pawlaczyk-Łuszczynska, M., A. Dudarewicz, & M. Śliwińska-Kowalska. 2007. „Theoretical Predictions and Actual Hearing Threshold Levels in Workers Exposed to Ultrasonic Noise of Impulsive Character – a Pilot Study”. *JOSE* 13 (4): 409–418. <https://doi.org/10.1080/10803548.2007.11105098>.

Pawlaczyk-Łuszczynska, M., A. Dudarewicz. 2020. „Impact of very high-frequency sound and low-frequency ultrasound on people – the current state of the art”. *IJOMEH* 33 (4): 389–408. <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.01586>.

Pawlaczyk-Łuszczynska, M., A. Dudarewicz, J. Koton, M. Śliwińska-Kowalska, D. Augustyńska, & M. Kameduła. 2001. „Hałas ultradźwiękowy. Dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych...”. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2 (28): 55–88.

Pawlaczyk-Łuszczynska, M., A. Dudarewicz, M. Zamojska-Daniszewska, K. Zaborowski, & P. Rutkowska-Kaczmarek. 2018. „Noise Exposure and Hearing Status among Call Center Operators”. *Noise & Health* 20 (96): 178–189. https://doi.org/10.4103/nah.NAH_11_18.

„Sensory Unpleasantness of High-Frequency Sounds”. *Acoustical Science and Technology* 34: 26. <https://doi.org/10.1250/ast.34.26>.

Pong, W., & W. Marcaccio. 1963. „Nonlinearity of the Middle Ear as a Possible Source of Subharmonics”. *JASA* 35 (5): 679–681. <https://doi.org/10.1121/1.1918585>.

ILO. 1977. „Protection of Workers against Noise and Vibration in the Working Environment”.

Radosz, J. 2015. „Procedura pomiaru hałasu ultradźwiękowego”. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 4 (86): 169–190.

Radosz, J., & D. Pleban. 2018. „Ultrasonic Noise Measurements in the Work Environment”. *JASA* 144 (4): 2532.

Rahko, A. A., P. H. Karma, K. T. Rahko, & M. J. Kataja. 1988. „High-frequency hearing of dental personnel”. *Community Dentistry and Oral Epidemiology* 16: 268–270. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0528.1988.tb01771.x>.

„Health Effect of Exposure to Ultrasound and Infrasound: Report of the Independent Advisory Group on Non-Ionising Radiation”. (HPA/IAGNIRN report; zapis w ResearchGate).

Riesco-MacClure, J. S., H. Davis, B. E. Gernandt, & W. P. Covell. 1949. „Ante-Mortem Failure of the Aural Microphonic in the Guinea Pig”. PSEBM 71 (1): 158–160. <https://doi.org/10.3181/00379727-71-17116>.

Rodríguez Valiente, A., A. Trinidad, J. R. García Berrocal, C. Górriz, & R. Ramírez Camacho. 2014. „Extended high-frequency (9–20 kHz) audiometry reference thresholds in 645 healthy subjects”. International Journal of Audiology 53 (8): 531–545. <https://doi.org/10.3109/14992027.2014.893375>.

Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z 12 czerwca 2018 r. w sprawie NDS/NDN; Dz.U. 2018 poz. 1286.

Ruggero, M. A., & A. N. Temchin. 2002. „The Roles of the External, Middle, and Inner Ears in Determining the Bandwidth of Hearing”. PNAS 99 (20): 13206–13210. <https://doi.org/10.1073/pnas.202492699>.

Scholkmann, F. 2019. „Exposure to High-Frequency Sound and Ultrasound in Public Places: Examples from Zurich, Switzerland”. Acoustics 1 (4): 816–824. <https://doi.org/10.3390/acoustics1040048>.

Schöneweiß, R., C. Kling, & C. Koch. 2020. „A Laboratory Study for Occupational Safety and Health on the Structure of Airborne Ultrasound Fields”. Acta Acustica 4: 12. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020013>.

Skilern, C. P. 1965. „Human response to measured sound pressure levels from ultrasonic devices”. AIHA Journal 26 (2): 132–136. <https://doi.org/10.1080/00028896509342712>.

Smagowska, B. 2013. „An objective and subjective study of noise exposure within 10–40 kHz”. Archives of Acoustics 38 (4): 559–563. <https://doi.org/10.2478/aoa-2013-0066>.

Smagowska, B. 2013. „Ultrasonic noise sources in a work environment”. Archives of Acoustics 38 (2): 169–176. <https://doi.org/10.2478/aoa-2013-0019>.

Smagowska, B., & M. Pawlaczyk-Łuszczczyńska. 2013. „Effects of Ultrasonic Noise on the Human Body – a Bibliographic Review”. JOSE 19 (2): 195–202. <https://doi.org/10.1080/10803548.2013.11076978>.

Smith, S. D., C. W. Nixon, & H. E. von Gierke. 1992. „Damage risk criteria for hearing and human body vibration”. W: Vér & Beranek (red.), Noise and Vibration Control Engineering. Wiley.

Somma, G., A. Pietroiusti, A. Magrini, et al. 2008. „Extended high frequency audiometry and NIHL in cement workers”. American Journal of Industrial Medicine 51 (6): 452–462. <https://doi.org/10.1002/ajim.20580>.

Szłapa, P., & W. Marczak. 2020. „Arc welding noise assessment from the measured ultrasound pressure levels. Part I: MAG welding”. Ultrasonics 100: 105976. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.105976>.

Toivo, T., P. Orreveteläinen, S. Kännälä, & T. Toivonen. 2017. „Selvitys ultraäänialtistumisen rajoittamisesta”.

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

Ueda, M., K. Ashihara, & H. Takahashi. 2015. „How High-Frequency Do Children Hear?” INCE Proceedings 250 (2).

Ullisch-Nelken, C., A. Wolff, R. Schöneweiß, & C. Kling. 2018. „A MEASUREMENT PROCEDURE FOR THE ASSESSMENT OF INDUSTRIAL ULTRASONIC NOISE”.

Van Wieringen, A., & C. Glorieux. 2018. „Assessment of short-term exposure to an ultrasonic rodent repellent device”. JASA 144: 2501. <https://doi.org/10.1121/1.5063987>.

Weichenberger, M., M. U. Bug, R. Brühl, B. Ittermann, C. Koch, & S. Kühn. 2022. „Air-Conducted Ultrasound below the Hearing Threshold Elicits Functional Changes in the Cognitive Control Network”. PLoS ONE 17 (12): e0277727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277727>.

Wilson, J. D., M. L. Darby, S. L. Tolle, & S. J. C. Sever Jr. 2002. „Effects of occupational ultrasonic noise exposure on hearing of dental hygienists: a pilot study”. Journal of Dental Hygiene 76 (4): 262–269.

WHO. 1982. Environmental Health Criteria 22: Ultrasound. World Health Organization.