

dr inż. Jan Radosz¹⁾
ORCID: 0000-0001-8542-7799

Periodic sound scatterers structures with Helmholtz resonators in ventilation ducts

Periodyczne struktury rozpraszaczy dźwięku z rezonatorami Helmholtza w kanałach wentylacyjnych

DOI: 10.15199/33.2025.08.24

Abstract. Increasing demands for noise reduction are driving the search for new sound attenuation methods, particularly in ventilation ducts where airflow must be maintained. In this context, wave-based structures, especially sonic crystals and the integration of Helmholtz resonators, are gaining growing interest. This paper presents a study on noise reduction in ventilation ducts using sound-scattering structures with local resonators. Finite element simulations were carried out to analyze the effects of resonator geometry, slit orientation, and the potential for tuning resonance frequencies. The results showed that integrating resonators significantly improves attenuation in the low and mid-frequency ranges. Experimental measurements of physical models confirmed the effectiveness of the attenuation, while also highlighting the influence of material and geometric imperfections on the accuracy of the results.

Keywords: sonic crystals; noise; Helmholtz resonator; sound attenuation.

In the search for effective methods of passive noise control, sonic crystals (SC) have gained significant attention over the past decades [1 ÷ 4]. Modern challenges related to passive noise reduction in ventilation, air conditioning, and industrial systems require solutions that allow for efficient sound attenuation without disrupting airflow. Traditional sound-absorbing materials, while effective, often involve high aerodynamic resistance or substantial volume. In response to these limitations, there is growing interest in structures based on so-called sonic crystals. These are materials and structures characterized by a periodic arrangement of scattering elements (e.g., cylinders [5]) in a transmission medium. The primary sound attenuation mechanism is based on the Bragg diffraction phenomenon, where coherent scattering of acoustic waves on a periodic lattice leads to destructive interference for certain frequency ranges. This results in the formation of band gaps, within which the propagation of sound waves is significantly attenuated or even blocked [6].

A key area of recent research has been the analysis of interactions between the classical Bragg scattering mechanism and local resonance phenomena [7÷10]. Recent studies indicate

Streszczenie. Rosnące wymagania dotyczące redukcji hałasu sprawiają, że poszukiwane są nowe metody tłumienia dźwięku, szczególnie w kanałach wentylacyjnych, gdzie konieczny jest przepływ powietrza. W tym kontekście coraz większe zainteresowanie budzą struktury bazujące na zjawiskach falowych, w tym przede wszystkim tzw. kryształy dźwiękowe oraz integracja rezonatorów Helmholtza w tych strukturach. W artykule przedstawiono badania nad redukcją hałasu w kanałach wentylacyjnych z wykorzystaniem struktur rozpraszaczy dźwięku z lokalnymi rezonatorami. Symulacje wykonano metodą elementów skończonych, analizując wpływ geometrii rezonatorów, orientacji szczelin i możliwości strojenia częstotliwości rezonansowych. Wyniki wykazały, że integracja rezonatorów znacznie poprawia tłumienie w zakresie niskich i średnich częstotliwości. Pomiary eksperymentalne modeli fizycznych potwierdziły skuteczność tłumienia, wskazując jednocześnie na wpływ niedoskonałości materiałowych i geometrycznych na dokładność wyników.

Słowa kluczowe: kryształy dźwiękowe; hałas; rezonator Helmholtza; tłumienie dźwięku.

W poszukiwaniu skutecznych metod pasywnej kontroli hałasu znaczną uwagę zyskały kryształy dźwiękowe (SC – *Sonic Crystals*) [1 ÷ 4]. Współczesne wyzwania związane z pasywnym ograniczaniem hałasu w systemach wentylacyjnych, klimatyzacyjnych i przemysłowych wymagają rozwiązań, które pozwalają na efektywną redukcję dźwięku bez zakłócania przepływu powietrza. Tradycyjne materiały dźwiękochłonne, choć skuteczne, często wiążą się z dużym oporem aerodynamicznym lub znaczną objętością. W związku z tym zwiększa się zainteresowanie strukturami bazującymi na tzw. kryształach dźwiękowych (ang. *Sonic Crystals*, SC), charakteryzującymi się okresowym rozmieszczeniem elementów rozpraszających (np. cylindrów [5]) w ośrodku transmisyjnym. Podstawą ich działania jest zjawisko dyfrakcji Bragga, gdzie spójne rozpraszanie fal akustycznych na okresowej siatce prowadzi do destruktywnej interferencji w przypadku określonych zakresów częstotliwości. Skutkuje to powstawaniem tzw. przerw pasmowych, w których propagacja fali dźwiękowej jest znacznie utrudniona lub niemożliwa [6].

W ostatnich latach ważnym obszarem badań stała się analiza interakcji pomiędzy klasycznym mechanizmem rozpraszania Bragga a zjawiskami rezonansu lokalnego [7 ÷ 10]. Istotne znaczenie ma nie tylko wzajemne dostrojenie często-

¹⁾ Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy; jarad@ciop.pl

that not only the tuning of the resonant frequency relative to the Bragg band is crucial, but also the orientation of the resonator's opening in relation to the direction of the incoming sound wave [7]. Numerical studies, often employing methods such as FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*), have identified specific configurations in which proper tuning and orientation of the resonators (e.g., opening directed toward the source or perpendicular to it) can lead to a significant (up to 20 dB) increase in sound attenuation within the Bragg band compared to conventional SCs.

Numerous scientific studies have explored the application of SCs for noise attenuation in ventilation, air conditioning, and industrial ducts. Results show that properly designed SC structures, placed inside the duct or at its inlet/outlet, can provide effective noise reduction [11 ÷ 13].

The advantages of SCs include not only their frequency selectivity but also the ease of modifying the geometry and spatial configuration of the scatterers, allowing the design of structures tailored to specific acoustic requirements. In particular, the use of local Helmholtz-type resonators enables shifting the attenuation band toward lower frequencies, which is essential for reducing noise from fans, compressors, or HVAC equipment. As demonstrated by Redondo et al. [4], appropriately selected geometry of the slit and cavity of the resonator can significantly improve attenuation effectiveness in the frequency range below the Bragg band, while preserving the broadband SC effect at higher frequencies.

A notable limitation of most previous numerical studies is their reliance on two-dimensional (2D) models [2, 4, 5, 7, 14, 15]. While these models are extremely useful for understanding fundamental physical mechanisms and conducting broad parametric analyses due to lower computational demands, they do not fully account for complex three-dimensional (3D) phenomena. Effects such as sound wave diffraction at the top and side edges of barriers with finite dimensions, reflections from the ground, or more complex 3D resonant modes inside the scatterers can significantly influence actual noise attenuation effectiveness in real-world conditions.

This study presents an analysis of the acoustic properties of periodic structures based on cylindrical scatterers that simultaneously act as resonators with varied hole geometries. The goal was to determine the impact of the type and shape of the openings (single, multi-hole, slotted) on the sound transmission characteristics within a frequency range covering both the Bragg band and lower frequencies dominated by local resonance effects. Numerical simulations were conducted using the finite element method, and selected configurations were experimentally validated.

Research method

Numerical models. The research methodology was based on numerical modeling of spatial SC structures with local resonators. For this purpose, COMSOL Multiphysics software was used. A geometric model of a sonic crystal was designed, consisting of a 5×5 matrix of cylindrical scatterers with

tlivości rezonansowej względem częstotliwości pasma Bragga, ale również orientacja otworu rezonatora względem kierunku padania fali dźwiękowej [7]. Badania numeryczne, często wykorzystujące metody takie jak FDTD (metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu), pozwoliły zidentyfikować specyficzne konfiguracje, w których odpowiednie zestrojenie i orientacja rezonatorów (np. skierowanie otworu w stronę źródła lub prostopadle do niego) prowadzi do znacznego (nawet o 20 dB) wzrostu tłumienia dźwięku w obrębie pasma Bragga w porównaniu z konwencjonalnymi SC.

Dotychczas w badaniach naukowych odnotowano wiele prób zastosowania SC w celu tłumienia hałasu w kanałach wentylacyjnych, klimatyzacyjnych i przemysłowych. Wyniki wskazują, że odpowiednio zaprojektowane struktury SC, umieszczone wewnątrz kanału lub na jego wlocie/wylocie, mogą zapewnić skuteczne tłumienie dźwięku [11 ÷ 13].

Zaletą SC jest nie tylko ich selektywność częstotliwościowa, ale również możliwość łatwej modyfikacji geometrii i konfiguracji rozmieszczenia rozpraszaczy, co umożliwia projektowanie struktur dopasowanych do konkretnych wymagań akustycznych. W szczególności, zastosowanie lokalnych rezonatorów typu Helmholtza pozwala przesunąć pasmo tłumienia w kierunku niższych częstotliwości, co jest ważne w kontekście redukcji hałasu pochodzącego od wentylatorów, sprężarek czy urządzeń HVAC. Jak wskazano w [4], odpowiednio dobrana geometria szczeliny i wnęki rezonatora może znacznie zwiększyć skuteczność tłumienia w zakresie częstotliwości poniżej pasma Bragga, przy zachowaniu szerokopasmowego efektu SC w wyższych zakresach.

Istotnym ograniczeniem większości dotychczasowych badań numerycznych jest bazowanie na modelach dwuwymiarowych (2D) [2, 4, 5, 7, 14, 15], które choć niezwykle użyteczne do zrozumienia podstawowych mechanizmów fizycznych i przeprowadzania szeroko zakrojonych analiz parametrycznych, nie uwzględniają w pełni złożonych zjawisk trójwymiarowych (3D). Efekty takie jak dyfrakcja fali dźwiękowej na górnej i bocznych krawędziach bariery o skończonych wymiarach, odbicia od podłoża, czy bardziej złożone, trójwymiarowe mody rezonansowe wewnątrz rozpraszaczy, mogą znacznie wpływać na rzeczywistą skuteczność tłumienia hałasu w warunkach rzeczywistych.

W ramach omawianych badań przeprowadzono analizę właściwości akustycznych periodycznych struktur bazujących na cylindrycznych rozpraszaczach pełniących jednocześnie funkcję rezonatorów o zróżnicowanej geometrii otworów. Celem było określenie wpływu rodzaju i kształtu otworów (pojedyncze, wielootworowe, szczelinowe) na charakterystyki transmisji dźwięku w zakresie częstotliwości obejmującym pasmo Bragga i niższe częstotliwości, gdzie dominują efekty lokalnych rezonansów. Badania numeryczne wykonano metodą elementów skończonych, a wybrane konfiguracje zweryfikowano eksperymentalnie.

Metoda badawcza

Modele obliczeniowe. Bazowano na modelowaniu numerycznym przestrzennych struktur SC z lokalnymi rezonatorami. Do tego celu wykorzystano oprogramowanie COMSOL

dimensions of $130 \times 130 \times 140$ mm, placed inside a rectangular duct measuring $130 \times 140 \times 450$ mm (Figure 1).

The scatterers had an outer diameter of 20 mm and a height of 140 mm. Each cylinder was hollow and could be modified with openings or slits to achieve a Helmholtz resonator effect. For the 5×5 configuration with uniformly spaced cylinders, the lattice constant a was 25 mm.

Based on the relationship between wavelength and the structure's period, the Bragg band gap was expected to occur in the frequency range of approximately 5 kHz to 8 kHz. The models included various resonator configurations, presented in Table 1. The use of different types of resonators – from single-hole designs to multi-hole and slotted resonators – enabled the analysis of multiple aspects of SC performance. The configurations were selected based on the author's previous research and other studies [7, 8, 16, 19]. In particular, the influence of the neck shape and surface area on the resonant frequency, sound attenuation effectiveness in low and mid-frequency ranges, the bandwidth of the resonance, and the effect of excessive resonator opening on the weakening of the resonance effect were evaluated. This allowed for the identification of the most effective configurations for attenuating low-frequency sound. The model maintained symmetrical arrangement of the scatterers and equal spacing between them, ensuring uniform distance from the duct walls.

The 3D models were imported into the COMSOL environment, where acoustic wave propagation was analyzed in the frequency domain. A plane wave propagating along the axis of the duct (Z direction) was assumed as the sound source.

Third-octave bands with center frequencies from 100 Hz to 10 000 Hz were analyzed, covering both Helmholtz resonances and the Bragg band. A sound transmission analysis was performed by defining probes on the inlet and outlet surfaces of the duct. Transmission loss (TL) was calculated by averaging the sound pressure levels (L_p) on both surfaces and determining the difference.

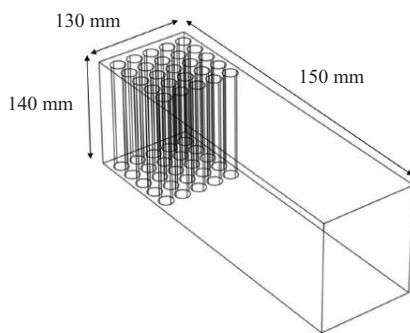


Fig. 1. The numerical model geometry
Rys. 1. Geometria modelu obliczeniowego

Multiphysics. Zaprojektowano model geometryczny SC składający się z macierzy 5×5 cylindrycznych rozpraszaczy o wymiarach $130 \times 130 \times 140$ mm umieszczonych wewnątrz prostokątnego kanału o wymiarach $130 \times 140 \times 450$ mm (rysunek 1).

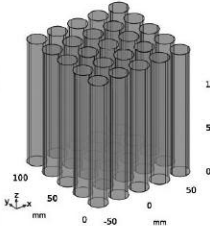
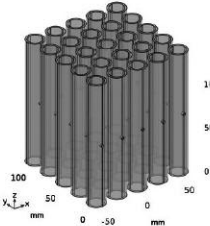
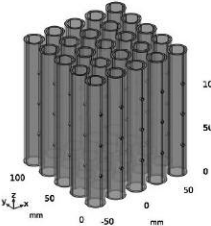
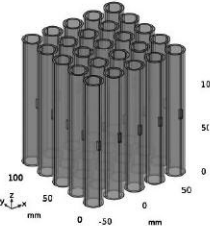
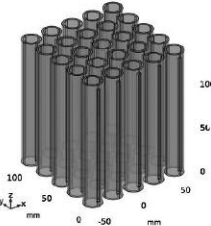
Rozpraszacze miały średnicę zewnętrzną 20 mm i wysokość 140 mm. Każdy cylinder był pusty w środku i mógł być modyfikowany o otwory lub szczeliny w celu uzyskania efektu rezonatora Helmholtza. W przypadku konfiguracji 5×5 z równomiernym rozstawem cylindrów, stała sieci krystalicznej a wynosiła 25 mm. Na podstawie zależności pomiędzy długością fali a okresem struk-

tury, przewidywano występowanie przerwy Bragga w zakresie częstotliwości $5 \div 8$ kHz. Modele uwzględniały różne konfiguracje rezonatorów, które przedstawiono w tabeli 1. Zastosowanie różnych wariantów rezonatorów (od pojedynczych otworów, przez układy wielootworowe, po rezonatory szczelinowe) umożliwiło analizę wielu aspektów działania struktur SC. Wyboru konfiguracji dokonano na podstawie dotychczasowych prac badawczych autora oraz innych [7, 8, 16, 19]. W szczególności oceniono wpływ kształtu i powierzchni szyjki rezonatora na częstotliwość rezonansową, skuteczność tłumienia dźwięku w niskim i średnim zakresie częstotliwości, szerokość pasma rezonansowego, a także wpływ nadmiernego otwarcia rezonatora na osłabienie efektu rezonansu. Pozwoliło to na identyfikację najbardziej efektywnych konfiguracji pod kątem tłumienia dźwięków o niskiej częstotliwości. W modelu zachowano symetryczne rozmieszczenie rozpraszaczy oraz odstęp między nimi, zapewniając równą odległość od ścian kanału. Modele 3D zostały zaimportowane do środowiska COMSOL, gdzie wykonano analizę propagacji fali akustycznej w domenie częstotliwościowej. Przyjęto falę płaską propagującą się wzdłuż osi przewodu (kierunek Z) jako źródło dźwięku.

Analizowano pasma tercjowe o częstotliwościach środkowych $100 \div 10\,000$ Hz, obejmujące rezonanse Helmholtza i pasmo przerwy Bragga. Przeprowadzono analizę transmisji dźwięku przez strukturę, definiując sondy na powierzchni wlotowej i wylotowej kanału. Obliczenia tłumienia przenoszenia TL dokonano przez uśrednienie poziomów ciśnienia akustycznego (L_p) na obu powierzchniach i wyznaczenie różnicy.

Table 1. Developed numerical models of SC with various resonator configurations

Tabela 1. Opracowane modele obliczeniowe SC z różną konfiguracją rezonatorów

No openings (solid scatterers) – reference configuration	Single circular hole (ø 3 mm) – classic Helmholtz resonator	Three circular holes (ø 3 mm) – resonator with increased neck surface area	Rectangular slit (10 x 3 mm) – slit-neck variant	Tall slit (10 x 3 mm) – variant with large neck surface area
				

Physical models. Transmission loss (TL) measurements for two selected SC configurations were carried out under controlled conditions using a measurement duct and an acoustic chamber. The analyzed configurations included:

- a reference structure with solid cylindrical scatterers (without openings);
- a structure with a rectangular slit (10×3 mm) acting as the neck of a Helmholtz-type resonator.

The physical models were fabricated using 3D printing technology based on the *Fused Deposition Modeling* method. The components were made using Spectrum PLA Pro filament, which offers good dimensional stability, high stiffness, and suitable mechanical properties necessary to ensure rigid, reflective boundaries in acoustic applications. This material choice allowed for accurate replication of the geometries used in the numerical models and provided appropriate conditions for conducting sound transmission loss measurements.

The measurements were performed in a reverberant acoustic chamber, which served as the source room. The sound source, a loudspeaker, was positioned 50 cm from the inlet of the duct, with its diaphragm aligned coaxially with the duct's axis. Before starting the measurements, the sound pressure level distribution on the inlet plane was analyzed (using a grid of measurement points) to verify the uniformity of the acoustic field. The uniform distribution allowed the assumption of plane wave propagation, ensuring comparability with the conditions assumed in the computational models. Airflow was not considered in the study, and there was no air movement between rooms that could affect the measurement results.

The excitation signal used was pink noise. Measurements were conducted in third-octave bands within the frequency range of 100 Hz to 10,000 Hz using a spatial averaging method to determine the mean sound pressure level on the inlet and outlet planes of the duct. The duration of a single measurement was 30 seconds. For measuring the sound pressure levels, a Class 1 sound level meter – SVANTEK SVAN 979 – was used. The receiving chamber was a standard laboratory room with a reverberation time of approximately 0.5 seconds.

Transmission loss (TL) values were calculated as the difference in sound pressure levels between the inlet ($L_{p,in}$) and outlet ($L_{p,out}$) surfaces of the duct. A schematic of the measurement setup and the view of the measurement duct with the tested models is presented in Figure 2. The measurement setup did not follow a fully standardized measurement path (e. g., according to PN-EN ISO 11820), but was developed as a test stand for the experimental evaluation of the influence of structure geometry and resonator configuration on sound attenuation. This approach allowed for comparison of configurations under controlled and repeatable conditions.

Modele fizyczne. Badania tłumienia przenoszenia TL w przypadku dwóch wybranych konfiguracji SC przeprowadzono w warunkach kontrolowanych, z wykorzystaniem kanału pomiarowego oraz komory akustycznej. Analizowane warianty obejmowały:

- strukturę referencyjną z pełnymi cylindrycznymi rozpraszaczami (bez otworów);
- strukturę z prostokątną szczeliną (10×3 mm) pełniącą funkcję szyjki rezonatora typu Helmholtza.

Modele fizyczne zostały wykonane przy użyciu druku 3D metodą *Fused Deposition Modeling* (FDM). Do wytworzenia elementów zastosowano filament Spectrum PLA Pro, charakteryzujący się dobrą stabilnością wymiarową, dużą sztywnością oraz odpowiednimi właściwościami mechanicznymi niezbędnymi do zapewnienia sztywnych granic odbijających w zastosowaniach akustycznych. Dobór tego materiału pozwolił na wierne odwzorowanie geometrii struktur modelowanych numerycznie oraz zapewnił odpowiednie warunki do przeprowadzenia pomiarów tłumienia przenoszenia dźwięku.

Pomiary wykonano w komorze akustycznej o charakterze pogłosowym, pełniącej funkcję przestrzeni nadawczej. Źródło dźwięku w postaci głośnika umieszczono w odległości 50 cm od wlotu kanału, w taki sposób, aby jego membrana była ustawiona współosiowo względem osi kanału. Przed rozpoczęciem pomiarów przeprowadzono analizę rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego na płaszczyźnie wlotowej (na siatce punktów), w celu weryfikacji jednorodności pola akustycznego. Jednorodność rozkładu umożliwiła założenie propagacji zbliżonej do fali płaskiej, co zapewniło porównywalność z warunkami przyjętymi w modelach obliczeniowych. W badaniach nie uwzględniano przepływów powietrza ani nie występował ruch powietrza między pomieszczeniami, który mógłby wpływać na wynik pomiaru.

Sygnałem wymuszającym był szum różowy. Pomiar przeprowadzono w pasmach tercjowych w zakresie częstotliwości $100 \div 10\,000$ Hz metodą omiatania przestrzennego, w celu uśrednienia poziomu ciśnienia akustycznego na płaszczyznach wlotowej i wylotowej kanału. Czas pojedynczego pomiaru wynosił 30 s. Do pomiarów poziomów ciśnienia akustycznego zastosowano miernik poziomu dźwięku klasy 1 – SVANTEK SVAN 979. Komorę odbiorczą stanowiło standardowe pomieszczenie laboratoryjne z czasem pogłosu ok. 0,5 s.

Wartości tłumienia przenoszenia TL obliczano jako różnicę poziomów ciśnienia akustycznego pomiędzy powierzchniami wlotową ($L_{p,in}$) i wylotową kanału ($L_{p,out}$). Schemat układu pomiarowego oraz kanał pomiarowy wraz z badanymi modelami zaprezentowano na rysunku 2. Zastosowany układ pomiarowy nie miał charakteru w pełni standaryzowanego toru pomiarowego (np. zgodnego z PN-EN ISO 11820), lecz został opracowany jako stanowisko badawcze na potrzeby eksperymentalnej oceny wpływu geometrii struktur i konfiguracji rezonatorów na tłumienie dźwięku. Takie podejście pozwoliło na porównanie konfiguracji w kontrolowanych i powtarzalnych warunkach.

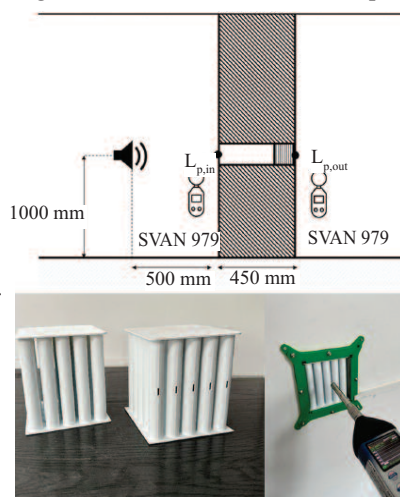


Fig. 2. Schematic of the measurement setup and the developed physical model and the measurement duct for determining the Transmission Loss [TL]

Rys. 2. Schemat układu pomiarowego oraz opracowane modele fizyczne i kanał pomiarowy do wyznaczania tłumienia przenoszenia TL

Results

Numerical model results. The results obtained from the numerical models confirm that Helmholtz resonators introduce local band gaps at significantly lower frequencies than those resulting from the periodicity of the array alone. For the configuration with solid scatterers (without cavities), sound attenuation at low frequencies is minimal. Waves with wavelengths much larger than the scatterer dimensions pass around them. The transmission loss values derived from the numerical models are presented in Figure 3. Additionally, Table 2 presents the distribution of sound pressure levels for the developed SC configurations.

The reference configuration did not exhibit any significant TL increase in the low-frequency range due to the absence of any resonant mechanism. The first substantial attenuation occurs only at higher frequencies, corresponding to the Bragg band gap of the periodic scatterer arrangement. In the 5 – 8 kHz range, a broad TL maximum (Bragg band gap) is observed, resulting from the Bragg effect.

Introducing a small cylindrical opening in each scatterer creates a Helmholtz resonator, which results in an additional TL peak in the low-frequency range. Spectral analysis shows a distinct TL increase in the one-third octave band centered at 400 Hz, which is close to the predicted resonance frequency (~324 Hz). This confirms the effectiveness of the designed resonator – the cavity-neck system forms a low-frequency band gap due to local resonance. The TL increase is significant within a narrow frequency band, indicating strong attenuation at resonance. As is typical for Helmholtz resonators, the attenuation band is relatively narrow, with peak attenuation centered at the resonant frequency and rapid decline outside this range. Importantly, the addition of a small opening does not degrade the high-frequency Bragg band of the structure. The TL spectrum still shows wideband attenuation in the 5 – 8 kHz range, similar to the reference configuration.

The configuration with three cylindrical openings per scatterer continues to function as a Helmholtz resonator but with a larger total neck area. The TL spectrum for this configuration shows an attenuation peak

Wyniki

Wyniki modeli obliczeniowych. Uzyskane wyniki potwierdzają, że rezonanse Helmholtza wprowadzają lokalne przerwy pasmowe w zakresie częstotliwości znacznie niższym, niż wynika to z periodyczności układu. W przypadku układu rozpraszaczy bez wnęk, tłumienie akustyczne w niskich częstotliwościach jest niewielkie. Fale o długości znacznie większej od wymiarów rozpraszaczy swobodnie je omijają. Wyniki tłumienia przenoszenia TL modeli obliczeniowych przedstawiono na rysunku 3. W tabeli 2 zaprezentowano wyniki rozkładu poziomów ciśnienia akustycznego opracowanych konfiguracji SC.

Konfiguracja referencyjna nie wykazała wyraźnych wzrostów tłumienia przenoszenia TL w zakresie niskich częstotliwości, gdyż brak jest jakiegokolwiek mechanizmu rezonansowego. Pierwsze znaczące tłumienie pojawia się dopiero przy wyższych częstotliwościach, odpowiadając przerwie Bragga periodycznego układu rozpraszaczy. W zakresie 5 – 8 kHz obserwowano szerokopasmowe maksimum TL (pasmo Bragga), wynikające z efektu Bragga.

Wprowadzenie niewielkiego, cylindrycznego otworu w każdym rozpraszaczu tworzy rezonator Helmholtza, powodując pojawienie się dodatkowego TL w zakresie niskich częstotliwości. Analiza widmowa wykazuje wyraźny wzrost TL w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej 400 Hz, co jest zbliżone do przewidywanej częstotliwości rezonansowej (~324 Hz). Potwierdza to skuteczność zaprojektowanego rezonatora – układ wnęki – szyjka tworzy niskoczęstotliwościową szczelinę pasmową wynikającą z lokalnego rezonansu. Wzrost TL w tym

zakresie jest znaczący, wskazując na silne tłumienie w wąskim paśmie częstotliwości. Pasmo tłumienia jest stosunkowo wąskie, co jest typowe dla rezonatorów Helmholtza. Maksymalne tłumienie dźwięku skupia się wokół częstotliwości rezonansowej, natomiast efektywność szybko maleje poza tym zakresem. Istotne jest, że dodanie niewielkiego otworu nie osłabia wysokoczęstotliwościowego pasma Bragga struktury. Widmo TL nadal wykazuje szerokopasmowe tłumienie dźwięku w zakresie 5 – 8 kHz, podobnie jak w przypadku konfiguracji referencyjnej.

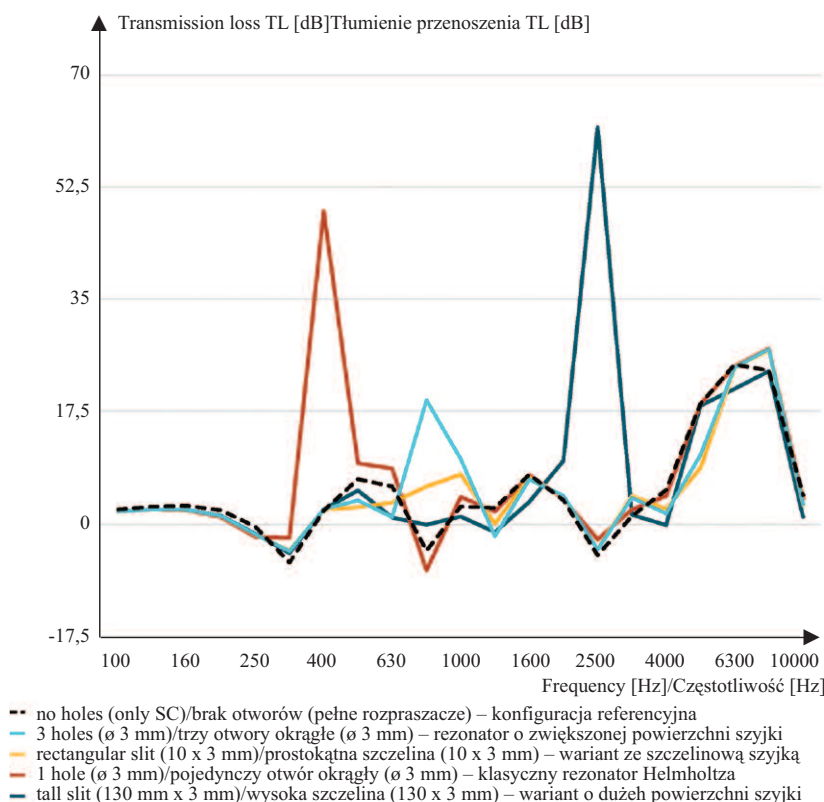
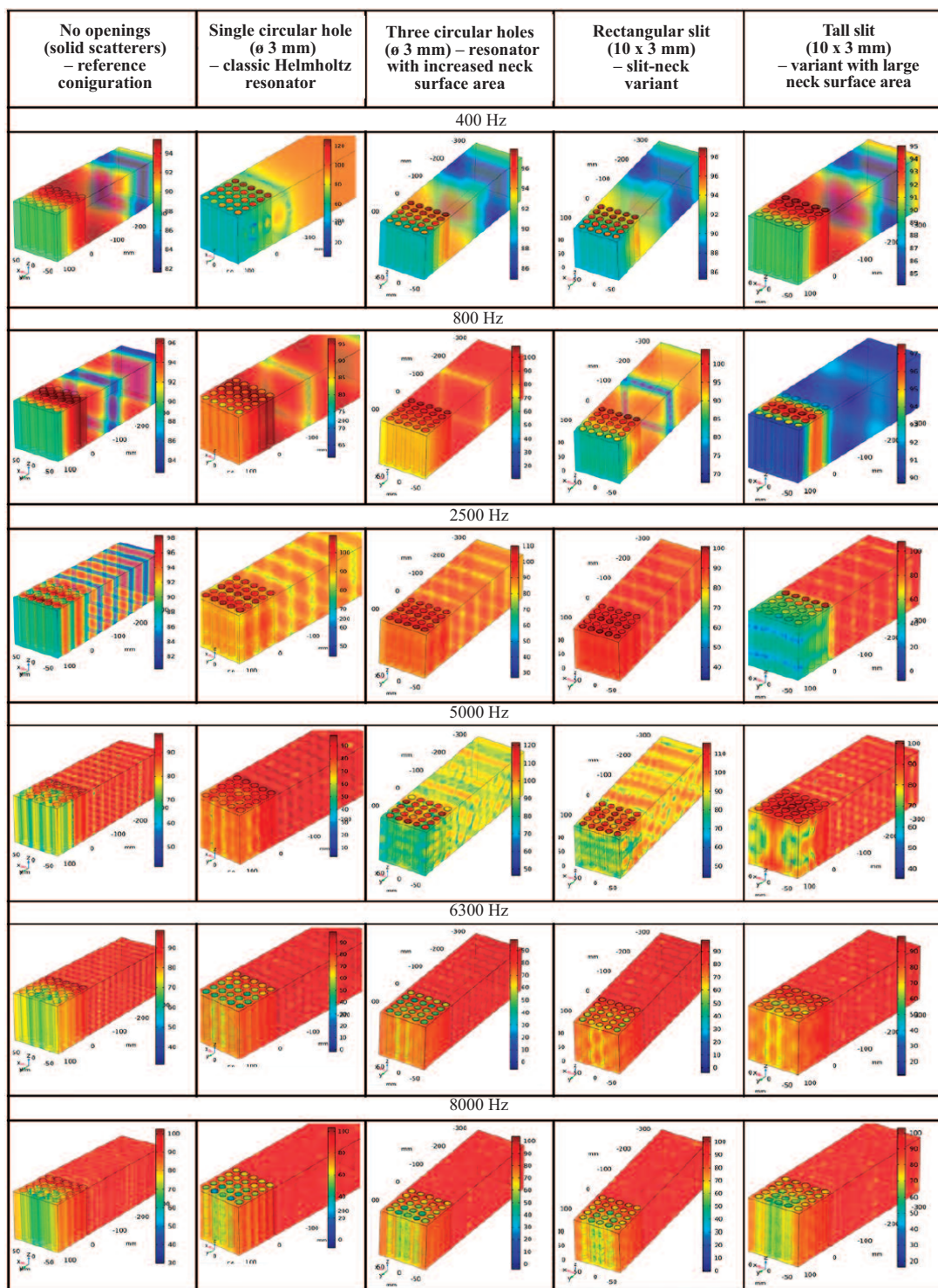


Fig. 3. Transmission Loss (TL) of the developed numerical models

Rys. 3. Tłumienie przenoszenia TL opracowanych modeli obliczeniowych

Table 2. Results of the sound pressure level distribution in the developed numerical models

Tabela 2. Wyniki rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego opracowanych modeli obliczeniowych



around 800 Hz, which slightly deviates from the expected resonance near 562 Hz. This confirms that multiple openings also produce low-frequency attenuation, although shifted to higher frequencies compared to a single opening. The increased neck area (three openings) raises the Helmholtz resonance frequency. While the TL increase around 800 Hz remains relatively narrow, some differences

Trzy otwory cylindryczne w każdym rozpraszaczu nadal pełnią funkcję rezonatorów Helmholtza, lecz z większą łączną powierzchnią szyjki. Widmo TL dla tej konfiguracji wykazuje wzrost tłumienia w okolicy 800 Hz, co nieznacznie odbiega od przewidywanego rezonansu w okolicach 562 Hz. Potwierdza to, że wielokrotne otwory również wprowadzają niskoczęstotliwościowe tłumienie, jednak przesunięte ku wyższym czę-

in bandwidth and TL level are observed compared to the single-opening resonator. Enlarging the neck area may broaden the resonance band (lower Q factor) but reduce the peak TL values. As with the single-opening configuration, the Bragg gap in the 5 – 8 kHz range remains clearly visible. The three small openings do not significantly alter the external geometry of the scatterers, preserving high-frequency Bragg scattering.

Using a rectangular slit with dimensions 10×3 mm introduces another Helmholtz-type resonance. An increase in TL is observed in the 800 – 1000 Hz range, confirming the presence of a Helmholtz resonance consistent with theoretical predictions based on the neck dimensions and cavity volume. The TL values and narrow attenuation band indicate a high Q factor, typical for configurations with a narrow neck and large cavity volume, as well as limited material and environmental losses. The Bragg band gap (5 – 8 kHz) remains intact, with only minor potential variations in TL level compared to the reference configuration.

A large rectangular slit with dimensions $130 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ significantly affects the Helmholtz resonance characteristics and the acoustic wave scattering. In the lower frequency range, TL values are very low. This behavior indicates that such a wide slit no longer effectively serves as a Helmholtz neck and the opening is too large to build sufficient pressure in the resonator cavity. Unlike the 10×3 mm slit configuration (which exhibited resonance around 800 – 1000 Hz), no distinct resonant character is observed in this model. TL values between 800 and 1250 Hz are low or even negative, clearly indicating a lack of effective resonance. An interesting phenomenon is observed at 2500 Hz, where TL suddenly increases to 61.8 dB. This strong attenuation may be due to an internal geometric resonance, such as a higher-order transverse or longitudinal mode within the resonator cavity, rather than a classic Helmholtz resonance. This effect may result from wavelength matching with the cavity's geometric dimensions (e.g., its height). From 5000 Hz onwards, classical Bragg attenuation is observed. The large slit slightly weakens the Bragg band, making this configuration the least effective in attenuating sound within the 5 – 8 kHz range.

Physical model results. A comparison between the numerical models (COMSOL) and the physical models showed a similar trend in the transmission loss characteristics over a wide frequency range for both analyzed configurations (Figure 4 and Figure 5). In both sonic crystal (SC) configurations, sound attenuation increased with frequency; however, the slit resonator exhibited distinct TL peaks in specific frequency ranges, whereas the solid scatterer provided more moderate attenuation, mainly at higher frequencies.

Notably, the slit resonator demonstrated a pronounced TL peak around 800 Hz, attributed to local acoustic resonance. In the case of the solid scatterer (without a slit), TL at low frequencies (below approx. 500 Hz) was minimal in both models, as expected, due to the wavelength being much longer than the dimensions of the scatterer, effective interference

stotliwościom niż pojedynczy otwór. Zwiększenie powierzchni szyjki (trzy otwory) powoduje wzrost częstotliwości występowania rezonansu Helmholtza. Wzrost tłumienia wokół 800 Hz jest nadal stosunkowo wąski, ale widoczne są różnice w szerokości i poziomie TL w porównaniu z rezonatorami jednootworowymi. Zwiększenie powierzchni otworów może poszerzyć pasmo rezonansu (niższa dobroć Q), lecz obniżyć maksymalne wartości TL. Podobnie jak w konfiguracji jednootworowej, wyraźnie widoczna pozostaje przerwa Bragga w zakresie 5 – 8 kHz. Trzy niewielkie otwory nie wprowadzają znacznych zmian w geometrii zewnętrznej rozpraszaczy, dzięki czemu zachowane jest interferencyjne tłumienie wysokoczęstotliwościowe.

Zastosowanie szczeliny prostokątnej o wymiarach 10×3 mm powoduje kolejny rezonans typu Helmholtza. W przypadku częstotliwości 800 – 1000 Hz następuje wzrost wartości TL, co potwierdza obecność rezonansu typu Helmholtza, zgodnego z przewidywaniami teoretycznymi dla przyjętych wymiarów szyjki i objętości wnęki. Wartości TL i wąskie pasmo tłumienia potwierdzają wysoką dobroć Q rezonatora – typową dla konfiguracji z wąską szyjką i dużą objętością wnęki, a także ograniczoną stratnością materiału i otoczenia. Pasma Bragga (5 – 8 kHz) jest w pełni zachowane, z minimalnymi ewentualnymi różnicami w poziomie tłumienia w porównaniu z konfiguracją referencyjną.

Duża powierzchnia otwarcia (szyjki rezonatora) ma znaczny wpływ na parametry rezonansu Helmholtza, a także efekty rozpraszania fali akustycznej. W dolnym zakresie pasma obserwuje się bardzo niskie wartości TL. Takie zachowanie potwierdza, że szczelina o wymiarach 130×3 mm nie spełnia już efektywnie roli szyjki w klasycznym sensie rezonatora Helmholtza – szyjka staje się zbyt otwarta, przez co nie powstaje wystarczające ciśnienie w objętości rezonatora. W odróżnieniu od konfiguracji ze szczeliną 10×3 mm (gdzie zaobserwowano rezonans w okolicy 800 – 1000 Hz), w tym modelu nie widać wyraźnego rezonansowego charakteru TL. Wartości w zakresie 800–1250 Hz są niskie, a nawet ujemne, co jednoznacznie wskazuje na brak efektywnego rezonansu. Interesujące zjawisko zaobserwowano przy 2500 Hz, gdzie TL gwałtownie zwiększa się do 61,8 dB. Taki silny wzrost tłumienia może świadczyć o wewnętrznym rezonansie geometrycznym, np. wyższym modem poprzecznym lub podłużnym wewnątrz wnęki rezonatora, a nie typowym rezonansie Helmholtza. To zjawisko może wynikać z dopasowania długości fali do wymiarów geometrycznych (np. wysokości rezonatora). Od 5000 Hz obserwuje się klasyczny wzrost tłumienia wynikający z pasma zaporowego Bragga. Wysoka szczelina nieznacznie osłabia pasmo Bragga, czyniąc tę konfigurację najmniej skuteczną w tłumieniu dźwięku w tym zakresie częstotliwości (5 – 8 kHz).

Wyniki modeli fizycznych. Porównanie wyników modeli obliczeniowych (COMSOL) z modelami fizycznymi wykazało zbliżony przebieg charakterystyk tłumienia przenoszenia TL w szerokim zakresie częstotliwości w przypadku obu analizowanych przypadków (rysunki 4 i 5). W obu konfiguracjach SC tłumienie dźwięku rośnie wraz z częstotliwością, jednak rezonator ze szczeliną wykazuje wyraźne wzrosty tłumienia w określonych zakresach częstotliwości, podczas gdy pełny rozpraszacz zapewnia bardziej umiarkowane tłumienie, głównie

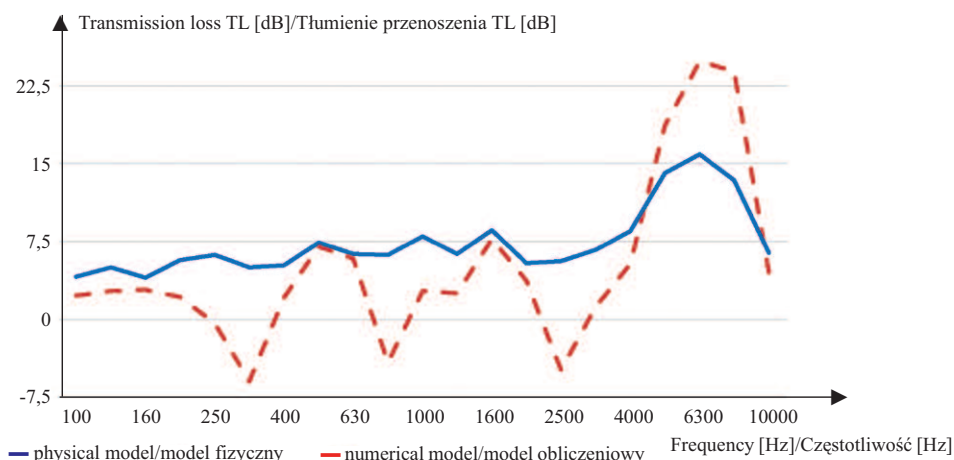


Fig 4. Transmission Loss (TL) of the physical model and the numerical model – no openings (solid scatterers) – reference configuration
Rys. 4. Tłumienie przenoszenia TL modelu fizycznego oraz modelu obliczeniowego – brak otworów (pełne rozpraszacze) – konfiguracja referencyjna

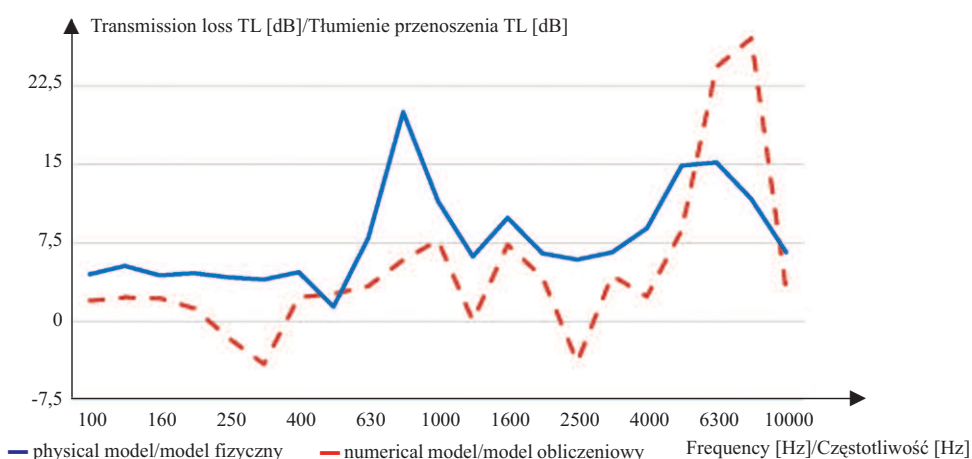


Fig 5. Transmission Loss (TL) of the physical model and the numerical model – variant with a slotted neck
Rys. 5. Tłumienie przenoszenia TL modelu fizycznego oraz modelu obliczeniowego – wariant ze szczelinową szyjką

could not occur. At higher frequencies, both physical models began to exhibit attenuation associated with the formation of a Bragg band gap, resulting from the periodic arrangement of the scatterers. The numerical simulations accurately reproduced this phenomenon, predicting broadband TL increases for the solid scatterers within the expected bandgap region.

Despite the overall agreement in TL trends, discrepancies were observed between the physical and numerical models in certain frequency ranges, particularly around the primary resonance near 800 Hz. Similarly, some deviations were found in the higher frequency range, where the measured TL was slightly lower than the simulated values. These differences may be attributed to measurement limitations (e.g., diffraction at sample edges) or modeling imperfections (e.g., incomplete replication of experimental conditions in the simulations).

Nevertheless, it should be emphasized that the overall TL trends and magnitudes were well captured by the COMSOL model in both cases, confirming its reliability for analyzing this type of resonator.

w wyższych zakresach częstotliwości. W szczególności, rezonator szczelinowy wykazuje silny wzrost TL ok. 800 Hz, związany z lokalnym rezonansem akustycznym. W przypadku pełnego rozpraszacza (bez szczeliny) w paśmie niskich częstotliwości (poniżej ok. 500 Hz) tłumienie było niewielkie w obu modelach, zgodnie z oczekiwaniem, gdyż długości fal akustycznych znacznie przewyższają wymiary rozpraszacza, co uniemożliwia efektywną interferencję. Natomiast przy wyższych częstotliwościach oba modele fizyczne zaczynały wykazywać tłumienie związane z uformowaniem się pasma Bragga (wynikającego z periodycznego rozmieszczenia rozpraszaczy). Symulacje numeryczne poprawnie odzwierciedliły to zjawisko, przewidując szerokopasmowy wzrost TL dla pełnych rozpraszaczy w zakresie tzw. przerwy pasmowej.

Mimo ogólnej zbieżności kształtu charakterystyk wystąpiły rozbieżności między modelami fizycznymi a obliczeniowymi w pewnych zakresach częstotliwości – zwłaszcza w okolicach głównego rezonansu (ok. 800 Hz). Analogicznie, w zakresie wyższych częstotliwości zaobserwowano pewne odchylenia – pomiary wykazały nieco mniejsze TL niż obliczenia, co może wynikać z ograniczeń pomiarowych (np. dyfrakcja na krawędziach).

Discussion

The identified differences in transmission loss, particularly in the one-third octave band centered around 800 Hz, can be attributed to several physical and technological factors. First, material and manufacturing imperfections of the 3D-printed resonators may influence their acoustic behavior. The printed PLA material is neither perfectly rigid nor homogeneous. It may exhibit internal damping and slight wall deformation under acoustic pressure. In the simulations, the resonator walls are typically assumed to be ideally rigid and lossless, which can lead to overestimated TL values. In reality, a portion of the acoustic energy is lost due to structural vibrations of the resonator and material damping, resulting in lower measured TL compared to the numerical model. Additionally, viscous and thermal losses of air inside the narrow resonator slit contribute to further energy dissipation.

Another important factor involves boundary conditions and the measurement setup. Simulations often assume ideal boundary conditions, for instance, perfectly rigid measurement channel walls, flawless sample sealing, and plane wave excitation. In real experiments, these assumptions are only approximately met. Minor air leaks during sample mounting or slightly uneven resonator faces may introduce undesirable acoustic effects, lowering the measured TL. The slit resonator, in particular, is highly sensitive to small geometric deviations. If the printed 10×3 mm slit has rough edges, rounded corners, or dimensions differing by tenths of a millimeter from the design, this alters the effective stiffness and mass of air in the slit (Helmholtz's so-called inlet correction). As a result, the actual resonance frequency may shift relative to the theoretical prediction. Furthermore, any small deformations from 3D printing may cause sound waves to scatter differently than in the idealized numerical model. All these imperfections in printing and assembly accumulate. Consequently, discrepancies between simulation and experiment typically result from unaccounted physical losses and minor deviations in geometry and boundary conditions, as noted in the literature [7]. Nonetheless, the overall agreement in TL trends confirms that the causes of these discrepancies are secondary in nature and may be addressed through improved modeling e.g., by incorporating material damping and more accurate boundary condition definitions.

At the current stage of research, airflow behavior has not been considered, particularly the aerodynamic resistance generated by the resonator structures placed inside the duct. The primary focus has been on evaluating acoustic performance and sound attenuation effectiveness. The influence of these structures on free airflow, relevant for applications in ventilation and HVAC systems, is the subject of planned future work, including experimental studies addressing flow resistance and potential turbulence effects.

Summary

Previous studies on sound attenuation in SC structures have been based primarily on two-dimensional models which, although useful, do not capture the full complexity of acoustic

dziach próbek) lub modelowania (np. niedoskonałe odwzorowanie symulacji). Mimo tych różnic, należy podkreślić, że ogólny trend i wielkość tłumienia przenoszenia w obu przypadkach zostały przez model COMSOL odwzorowane poprawnie, co potwierdza jego wiarygodność w analizie tego typu rezonatorów.

Dyskusja

Zidentyfikowane różnice w tłumieniu przenoszenia (szczególnie w okolicy pasma tercjowego o częstotliwości środkowej 800 Hz) można wyjaśnić kilkoma czynnikami fizycznymi i technologicznymi. Po pierwsze, niedoskonałości materiałowe i wykonawcze 3D drukowanych rezonatorów mogą wpływać na ich zachowanie akustyczne. Wydrukowany materiał PLA nie jest idealnie sztywny ani jednorodny, może wykazywać wewnętrzne tłumienie drgań i lekko ugięte ścianki pod wpływem ciśnienia akustycznego. W symulacji przyjęto zapewne ściany jako idealnie sztywne i niepochłaniające energii, co prowadzi do przeszacowania tłumienia. W rzeczywistości część energii akustycznej jest tracona na drgania własne struktury rezonatora oraz na straty materiałowe, przez co zmierzone TL jest niższe niż modelu obliczeniowego. Straty lepkości i straty termiczne w powietrzu wewnątrz wąskiej szczeliny rezonatora skutkują dodatkowymi stratami energii.

Kolejnym czynnikiem są warunki brzegowe i układ pomiarowy. W obliczeniach zakłada się zwykle idealne warunki brzegowe, np. doskonale sztywne ściany kanału pomiarowego, idealne uszczelnienie próbek, czyste wymuszenie falą płaską. W realnym eksperymencie te założenia są spełnione tylko w przybliżeniu. Możliwe mikroszczeliny przy montażu próbek w kanale lub nieidealnie płaskie czoła rezonatorów mogą powodować dodatkowe negatywne efekty akustyczne, obniżając zmierzone TL w porównaniu z obliczeniami. Szczególnie rezonator ze szczeliną jest wrażliwy na drobne zmiany geometrii otworu. Jeśli wydrukowany otwór 10×3 mm ma chropowate krawędzie, zaokrąglone naroża lub wymiary odbiegające o dziesiąte części milimetra od założonych, zmienia to efektywną sztywność i masę powietrza w szczelinie (tzw. korekcja wlotowa Helmholtza). Wskutek tego rzeczywista częstotliwość rezonansu może się przesunąć względem teoretycznej. Ponadto, jeśli druk 3D spowodował niewielkie deformacje, fale akustyczne rozpraszają się nieco inaczej niż w modelu obliczeniowym. Wszystkie te niedoskonałości druku i montażu sumują się. Rozbieżności między symulacją a eksperymentem wynikają zatem najczęściej z braku pełnego odwzorowania wszystkich strat fizycznych oraz z drobnych odchyleń geometrii i warunków brzegowych, co jest zgodne z [7]. Mimo to, ogólna zgodność trendów potwierdza, że przyczyny rozbieżności mają charakter drugorzędny i mogą być korygowane poprzez ulepszenie modelowania.

Na obecnym etapie badań nie uwzględniono aspektu przepływu powietrza, w szczególności oporu aerodynamicznego generowanego przez struktury z rezonatorami umieszczone w kanale. Główny nacisk położono na ocenę właściwości akustycznych i skuteczności tłumienia dźwięku. Analiza wpływu tych struktur na swobodny przepływ powietrza, istotna z punktu widzenia zastosowań w systemach wentylacyjnych i HVAC, stanowi przedmiot planowanych prac.

phenomena occurring in real three-dimensional configurations. Therefore, in this study, advanced numerical models were developed to include the complete 3D geometry of SC structures with integrated resonators. The conducted analyses enabled a more accurate assessment of how resonator geometry influences sound attenuation performance, particularly in the low- and mid-frequency ranges. The simulation results confirmed that spatial models allow for more precise prediction of resonant and interference effects than the traditionally used 2D approaches.

The numerical results demonstrated that configurations incorporating openings effectively generate additional band gaps at low frequencies as a result of local resonance. All tested configurations, regardless of resonator presence, showed attenuation in the 5 – 8 kHz frequency range, which aligns with Bragg theory, due to the periodicity of the structure and the adopted lattice constant of 25 mm. This broad Bragg band remained intact even with the addition of resonator openings, confirming the effectiveness of such configurations in extending the range of effective sound attenuation without compromising Bragg-related behavior. The simulations also highlighted the high sensitivity of the resonant effect to the shape, size, and number of openings, which should be taken into account when designing efficient SC-based structures.

The comparison between physical and numerical models clearly indicates the high effectiveness of the rectangular slit resonator in real-world conditions, as well as the experimentally confirmed accuracy of the numerical model. The slit resonator functions as a local Helmholtz-type resonator, enabling significant noise attenuation in the low-frequency range (around 800 Hz), which is typically poorly attenuated by conventional acoustic barriers. Measurements showed that even under non-ideal conditions (with material losses and imperfect fabrication), this resonator provided a clear TL increase compared to the solid scatterer making it a promising solution for practical applications such as duct silencers. Moreover, its effectiveness is not limited to a narrow resonance band. The presence of higher-order modes (though weaker) and interaction with the periodic array of scatterers enhances attenuation across a broader frequency range.

By contrast, the solid scatterer without openings operates mainly in the higher-frequency range, relying on Bragg scattering. Its effectiveness at low frequencies is limited, which supports the rationale for introducing resonant openings in designs targeting attenuation of longer-wavelength sounds. The conducted analysis also demonstrated that numerical modeling in COMSOL accurately replicates the acoustic behavior of the discussed resonator, especially in key frequency ranges.

Most previous studies on SCs relied on 2D models, which, while useful for understanding basic mechanisms, fall short in capturing the full complexity of real-world spatial structures. Effects such as edge diffraction and complex 3D modal behavior significantly influence the final performance of the barrier. The 3D modeling carried out in this study, together with

Podsumowanie

Dotychczasowe badania dotyczące tłumienia dźwięku w strukturach SC bazowały głównie na modelach dwuwymiarowych, które, choć użyteczne, nie oddawały pełni złożoności zjawisk akustycznych występujących w rzeczywistych strukturach przestrzennych. Dlatego w ramach omawianych badań opracowano zaawansowane modele obliczeniowe uwzględniające pełną geometrię 3D struktur SC z rezonatorami. Przeprowadzone analizy umożliwiły dokładną ocenę wpływu parametrów geometrycznych rezonatorów na efektywność tłumienia dźwięku, szczególnie w zakresie niskich i średnich częstotliwości. Wyniki symulacji potwierdziły, że modele przestrzenne pozwalają na bardziej precyzyjne przewidywanie zjawisk rezonansowych oraz efektów interferencyjnych niż dotychczas stosowane modele 2D.

Wyniki badań numerycznych wykazały, że konfiguracje zawierające otwory skutecznie generują dodatkowe przerwy pasmowe w zakresie niskich częstotliwości, co jest efektem lokalnego rezonansu (tabela 2). Wszystkie konfiguracje niezależnie od obecności rezonatora – wykazywały tłumienie w zakresie częstotliwości 5 – 8 kHz, co jest zgodne z teorią Bragga wynikającą z periodyczności układu i przyjętej stałej sieci krystalicznej równej 25 mm. Szeroka przerwa pasmowa w tym zakresie została zachowana nawet przy obecności otworów rezonatorowych, co potwierdza skuteczność tych konfiguracji w rozszerzaniu pasma efektywnego tłumienia dźwięku, bez degradacji efektu Bragga. Wyniki symulacji potwierdziły dużą wrażliwość efektu rezonansowego na zmianę kształtu, wielkości i liczby otworów, co należy uwzględnić w projektowaniu efektywnych struktur typu SC.

Przeprowadzone porównanie modeli fizycznych i obliczeniowych jednoznacznie wskazuje na dużą skuteczność rezonatora z prostokątną szczeliną w warunkach rzeczywistych, jak i na potwierdzoną doświadczalnie poprawność modelu numerycznego. Rezonator ze szczeliną pełni funkcję lokalnego rezonatora Helmholtza, co pozwala na uzyskanie istotnego tłumienia hałasu w zakresie niskich częstotliwości (ok. 800 Hz), które zwykle są najsłabiej tłumione przez klasyczne bariery akustyczne. Pomiar wykazały, że nawet w warunkach rzeczywistych rezonator ten zapewnia wyraźny wzrost tłumienia dźwięku względem pełnego rozpraszacza, jest więc obiecującym rozwiązaniem praktycznym do zastosowania, np. w tłumikach kanałowych. Skuteczność ta nie jest ograniczona jedynie do wąskiego rezonansu. Dzięki istnieniu również wyższych modów (choć słabszych) oraz interakcji z układem wielu rozpraszaczy, rezonator szczelinowy poprawia tłumienie także w szerszym zakresie. Z kolei pełny rozpraszacz bez otworów spełnia swoją rolę głównie w wyższych częstotliwościach, wykorzystując zjawisko Bragga. Jego skuteczność w zakresie niskich częstotliwości jest niewielka, co potwierdza zasadność wprowadzania otworów rezonansowych do projektów wymagających tłumienia dźwięków o dłuższej fali. Przeprowadzona analiza wykazała również, że modelowanie komputerowe w środowisku COMSOL dobrze odwzorowuje zachowanie omawianego rezonatora, zwłaszcza w kluczowych zakresach częstotliwości.

its experimental validation, provides a more precise basis for design and optimization. Recent research increasingly emphasizes the need for full-dimensional simulations in order to obtain reliable and practical results [17]. The results of this study also have important practical implications. They confirm that sonic crystal barriers incorporating Helmholtz resonators represent a promising solution for low-frequency noise control, particularly in industrial, transportation, and HVAC system applications [12, 18, 19, 20].

This task was completed on the basis of results of a research task supported from the resources of the Ministry of Science, subsided from funds intended for the maintenance and progress of the research and didactic potential. Task No.: II-42 Optimization of sonic crystal scatterer arrays to enhance the acoustic insulation performance of noise barriers based on sonic crystals. The Central Institute for Labour Protection – National Research Institute is the Programme's main coordinator.

Received: 27.03.2025

Revised: 13.05.2025

Published: 21.08.2025

Większość dotychczasowych prac nad SC bazowała na modelach dwuwymiarowych, które, choć użyteczne do zrozumienia podstawowych mechanizmów, nie oddają w pełni złożoności zjawisk w rzeczywistych strukturach przestrzennych. Efekty takie jak dyfrakcja na krawędziach czy złożone mody 3D mają istotny wpływ na ostateczną skuteczność bariery. Zrealizowane w tej pracy modelowanie 3D w środowisku COMSOL oraz jego eksperymentalna walidacja pozwalają na dosyć precyzyjne projektowanie i optymalizację. Ostatnie badania coraz częściej podkreślają konieczność prowadzenia symulacji w pełnym wymiarze, aby uzyskać wiarygodne wyniki [17]. Wyniki prezentowanych badań potwierdzają, że bariery bazujące na kryształach sonicznych z wbudowanymi rezonatorami Helmholtza są obiecującym rozwiązaniem problemu hałasu niskoczęstotliwościowego [12, 18, 19, 20].

Zrealizowano na podstawie wyników zadania badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki z subwencji ze środków finansowych na utrzymanie i rozwój potencjału dydaktycznego i badawczego. Zadanie nr: II-42 pt. „Optymalizacja sieci krystalicznych rozpraszaczy dźwięku w celu zwiększenia izolacyjności akustycznej barier akustycznych opartych o kryształy soniczne”. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Artykuł wpłynął do redakcji: 27.03.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 13.05.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Radosz J. Sound Insulation of an Acoustic Barrier with Layered Structures of Sonic Crystals – Comparative Studies of Physical and Theoretical Models. Archives of Acoustics. 2024. DOI: 10.24425/aoa.2024.148810.
- [2] Qin X, Ni A, Chen Z, Fang M, Li Y. Numerical modeling and field test of sonic crystal acoustic barriers. Environ Sci Pollut Res Int. 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-23109-2.
- [3] Ni A, Shi Z. Broadband wave attenuation and topological transport in novel periodic pile barriers. Engineering Structures. 2022. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114378.
- [4] Montiel F, Chung H, Karimi M, Kessissoglou N. An analytical and numerical investigation of acoustic attenuation by a finite sonic crystal. Wave Motion. 2017. DOI: 10.1016/j.wavemoti.2016.12.002.
- [5] Sánchez-Pérez JV i in. Sound Attenuation by a Two-Dimensional Array of Rigid Cylinders. Phys. Rev. Lett. 1998. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.5325.
- [6] Sigalas MM, Economou EN. Elastic and acoustic wave band structure. Journal of Sound and Vibration. 1992. DOI: 10.1016/0022-460X(92)90059-7.
- [7] Redondo J, Ramírez-Solana D, Picó R. Increasing the Insertion Loss of Sonic Crystal Noise Barriers with Helmholtz Resonators. Applied Sciences. 2023. DOI: 10.3390/app13063662.
- [8] Goodini J, Younesian D. A new Helmholtz type sonic crystal for wide-band sound attenuation. Sound & Vibration. 2025. DOI: 10.59400/sv2315.
- [9] Lim K-M, Lee HP. Sound absorption using sonic crystals with coupled Helmholtz resonators. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 2023. DOI: 10.3397/IN_2023_0404.
- [10] Cenedese M, Belloni E, Braghini F. Interaction of Bragg scattering bandgaps and local resonators in mono-coupled periodic structures. Journal of Applied Physics. 2021. DOI: 10.1063/5.0038438.
- [11] Plé J, Kone TC, Lehocine AB, Panneton R. Sonic Crystal Acoustic Attenuation Applied to Exhaust Air Systems. Canadian Acoustics. 2023; t. 51, nr 3, Art. nr 3, paź. 2023.
- [12] Czwielong F, Hruška V, Bednařík M, Becker S. On the acoustic effects of sonic crystals in heat exchanger arrangements. Applied Acoustics. 2021. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108253.
- [13] Lee HM, Wang Z, Lim KM, Xie J, Lee HP. Novel plenum window with sonic crystals for indoor noise control. Applied Acoustics. 2020. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107390.
- [14] Radosz J. Acoustic performance of noise barrier based on sonic crystals with resonant elements. Applied Acoustics. 2019. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.06.003.
- [15] D'Orazio T, Asdrubali F, Godinho L, Veloso M, Amado-Mendes P. Experimental and Numerical Analysis of Wooden Sonic Crystals Applied as Noise Barriers. Environments. 2023. DOI: 10.3390/environments10070116.
- [16] Lee HM, Hua Y, Xie J, Lee HP. Parametric Optimization of Local Resonant Sonic Crystals Window on Noise Attenuation by Using Taguchi Method and ANOVA Analysis. Crystals. 2022. DOI: 10.3390/cryst12020160.
- [17] Szczepański G, Podleśna M, Łada K, Włodarczyk A. Sprawdzenie przydatności metamateriału akustycznego do redukcji hałasu średnio- i wysokoczęstotliwościowego – symulacje numeryczne. Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka. 2023. DOI: 10.54215/BP.2023.04.9. Szczepański.
- [18] Fredianelli L, Del Pizzo LG, Licitra G. Recent Developments in Sonic Crystals as Barriers for Road Traffic Noise Mitigation. Environments. 2019. DOI: 10.3390/environments6020014.
- [19] Gupta A. A review on sonic crystal, its applications and numerical analysis techniques. Acoust. Phys. 2014. DOI: 10.1134/S1063771014020080.
- [20] Ang LYL, Cui F, Lim K-M, Lee HP. A Systematic Review of Emerging Ventilated Acoustic Metamaterials for Noise Control. Sustainability. 2023. DOI: 10.3390/su15054113.