

mgr inż. arch. Bartłomiej Ziarko^{1*)}

ORCID: 0000-0002-8836-5586

dr inż. arch. Łukasz Łukaszewski¹⁾

ORCID: 0000-0001-7999-0788

dr hab. inż. arch. Andrzej Kłosak²⁾

ORCID: 0000-0001-6326-1652

Application of perforated hollow blocks as sound-absorbing structures in the acoustic design of Polish Television film studios

Pustaki otworowe jako ustrój dźwiękochłonny w projekcie akustyki wnętrz studiów zdjęciowych Telewizji Polskiej

DOI: 10.15199/33.2025.12.02

Abstract. The article presents the concept and results of using hollow blocks as sound-absorbing elements in the acoustic design of the interiors of the newly constructed Polish Television film studios in Warsaw. Due to budget constraints and the need to employ simple, durable, and widely available building materials, hollow blocks were adapted as an alternative to conventional acoustic treatments. The paper discusses the integration of these elements with the interior architecture, their geometric parameters, and their influence on the reverberation time within the room. It also presents the results of reverberation time measurements and sound absorption coefficient analyses, which confirmed the effectiveness of the proposed solution. The use of hollow blocks made it possible to achieve favourable acoustic conditions inside film studios while maintaining low construction costs and simplicity of implementation.

Keywords: architecture; acoustics; room acoustics; reverberation time; sound absorption coefficient; film studio.

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję oraz wyniki zastosowania pustaków otworowych jako elementów dźwiękochłonnych w projekcie akustyki wnętrz nowo powstałych studiów zdjęciowych Telewizji Polskiej w Warszawie. Ze względu na ograniczenia budżetowe oraz konieczność wykorzystania prostych, trwałych i ogólnodostępnych materiałów budowlanych, pustaki otworowe zostały zaadaptowane jako alternatywa konwencjonalnych ustrojów akustycznych. Omówiono sposób integracji tych elementów z architekturą wnętrza, ich parametry geometryczne oraz wpływ na czas pogłosu w pomieszczeniu. Przedstawiono również wyniki pomiarów czasu pogłosu oraz analizy współczynnika pochłaniania dźwięku, które potwierdziły skuteczność zaprojektowanego rozwiązania. Zastosowanie pustaków otworowych umożliwiło uzyskanie korzystnych warunków akustycznych w halach zdjęciowych z zachowaniem niskich kosztów realizacji i prostoty wykonania.

Słowa kluczowe: architektura; akustyka; akustyka wnętrz; czas pogłosu; współczynnik pochłaniania dźwięku; studio filmowe.

Designing interior acoustics of film and television studios is one of the more demanding tasks in the field of acoustic engineering. These rooms must provide not only high quality of recorded sound, but also flexibility in use, durability of materials and compliance with the architectural and budgetary assumptions of the investor. Studio design depends on many factors, of which acoustics is one of the most important criterion. Good acoustic design must be supported by appropriate planning, functional layout, material selection, surface finishes, shape, as well as selection and design of technical systems [1].

The new filming hall of Telewizja Polska S.A. constitutes one of the most modern television facilities in Central Europe. The building was designed and realized in the "Design and Build" formula, by the architectural office PIG Architekci in

Projektowanie akustyki wnętrz studiów filmowych i telewizyjnych jest jednym z bardziej wymagających zadań w dziedzinie inżynierii akustycznej. Pomieszczenia te muszą zapewniać nie tylko bardzo dobrą jakość rejestrowanego dźwięku, ale trwałość materiałów oraz zgodność z założeniami architektonicznymi i budżetowymi inwestora. Projektowanie studia zależy od wielu czynników, z których akustyka jest najistotniejszym kryterium. Dobre projektowanie akustyczne musi być wspierane przez odpowiednie planowanie, układ funkcjonalny, dobór materiałów, wykończenia powierzchni, kształt, a także wybór i projekt systemów technicznych [1].

Nowa hala zdjęciowa Telewizji Polskiej S.A. (TVP) stanowi jeden z najnowocześniejszych obiektów telewizyjnych w Europie Środkowej. Celem inwestycji było stworzenie nowoczesnego kompleksu studyjnego o dużej funkcjonalności oraz ponadstandardowych parametrach akustycznych, umożliwiających realizację różnych produkcji telewizyjnych i filmowych. W budynku mieści się łącznie sześć modułów zdję-

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ archAKUSTIK

^{*)} Correspondence address: bziarko@pk.edu.pl

cooperation with Korporacja Budowlana DORACO as the general contractor. The aim of the investment was to create a studio complex with high functionality, modern technological standard and above-standard acoustic parameters, enabling the realization of various television and film productions. The building houses a total of six filming modules of varied volume and purpose. Two of them constitute large halls with a volume of approximately 23,000 m³ each (dimensions 45/40 × 29 × 20 m/ large modules/), and four – smaller studios with a volume of approximately 5,000 m³ (28 × 21 × 8 m/small modules/). The functional layout is complemented by sound and image control rooms, operator rooms, dressing rooms, make-up rooms, set storage rooms and technical and office facilities. On the roof, a recreational terrace with greenery elements was located, which can serve the function of an outdoor recording studio. In Figure 1 and 2, the floor plan and cross-section of the building are presented with the location of filming modules marked in red color.

The structure of the building is formed by monolithic reinforced concrete walls and floors of high surface mass, providing the necessary stiffness and acoustic insulation. The structural walls around the studios were made of reinforced concrete with a thickness of 30 – 35 cm, while the inter-story floors of the filming modules have the form of prestressed slabs with a thickness of 60 cm, with an additional 20 cm layer of floating floor mounted on elastic elastomers. All elevator shafts in the vicinity of the studios were isolated from the building structure to prevent the transmission of structural vibrations. A system of double acoustic locks (*sound/light locks*) was also applied at the entrances to the studios, which allowed for effective acoustic separation and limitation of light penetration from the outside.

In the case of the new filming studio complex, one of the key challenges was to obtain optimal acoustic parameters of the interiors of the filming module halls. The interiors of the filming modules were designed as universal production spaces, enabling the realization of a wide range of television and film programs – from entertainment recordings to feature productions. Due to their function, these rooms had to be durable, resistant to intensive use and easy to maintain cleanliness and set reconstruction. The applied materials and technological solutions were selected to ensure maximum operational flexibility, while maintaining high acoustic and aesthetic parameters. The project therefore assumed

ciowych o zróżnicowanej kubaturze i przeznaczeniu. Dwa z nich stanowią duże hale o objętości ok. 23 000 m³ każda (wymiary 45/40 × 29 × 20 m/moduły duże/), a cztery – małe studia o kubaturze ok. 5 000 m³ (28 × 21 × 8 m/moduły małe/). Układ funkcjonalny uzupełniają reżyserki dźwięku i obrazu, pomieszczenia operatorskie, garderoby, charakterystycznie, magazyny scenograficzne oraz zaplecze techniczne i biurowe. Na dachu zlokalizowano taras z elementami zieleni, który może pełnić funkcję plenerowego studia nagraniowego. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono rzut oraz przekrój budynku z zaznaczoną kolorem czerwonym lokalizacją modułów filmowych.

Konstrukcję budynku tworzą monolityczne żelbetowe ściany i stropy o dużej masie powierzchniowej, zapewniające niezbędną sztywność i izolacyjność akustyczną. Ściany konstrukcyjne wokół studiów wykonano z betonu zbrojonego o grubości 30 – 35 cm, natomiast stropy międzykondygnacyjne modułów filmowych mają postać płyt sprężonych o grubości 60 cm, z dodatkową 20-cm warstwą podłogi pływającej osadzonej na sprężystych elastomerach. Wszystkie szyby wind w pobliżu studiów zostały oddylatowane od konstrukcji budynku, aby zapobiec przenoszeniu drgań strukturalnych. Zastosowano również system podwójnych śluz akustycznych (*sound/light locks*) przy wejściach do studiów, co pozwoliło na skuteczną separację akustyczną i ograniczenie przenikania światła z zewnątrz.

W przypadku nowego kompleksu studiów zdjęciowych jednym z kluczowych wyzwań było uzyskanie optymalnych parametrów akustycznych wewnątrz hal modułów filmowych. Zostały one zaprojektowane jako uniwersalne przestrzenie produkcyjne, umożliwiające realizację różnych programów telewizyjnych. Ze względu na ich funkcję, pomieszczenia te musiały być trwałe, odporne na intensywną eksploatację oraz łatwe w utrzymaniu czystości i przebudowie scenograficznej. Zastosowane materiały i rozwiązania technologiczne dobrano tak, aby zapewnić maksymalną elastyczność użytkową, przy jednoczesnym zachowaniu bardzo dobrych parametrów akustycznych i estetycznych. Istotne było, aby zastosowany ustrój akustyczny wykończenia ścian pozwolił na możliwość równomiernego nagłośnienia pomieszczeń, odpowiedniej w przypadku danego pomieszczenia wartości i charakterystyki czasu pogłosu zgodnej z wymaganiami zamawiającego [2].



Fig. 1. Plan of the 2nd floor of the TVP film hall building showing the location of the film modules (in red)

Rys. 1. Rzut drugiej kondygnacji budynku hali zdjęciowej TVP wraz z lokalizacją modułów filmowych (kolor czerwony)

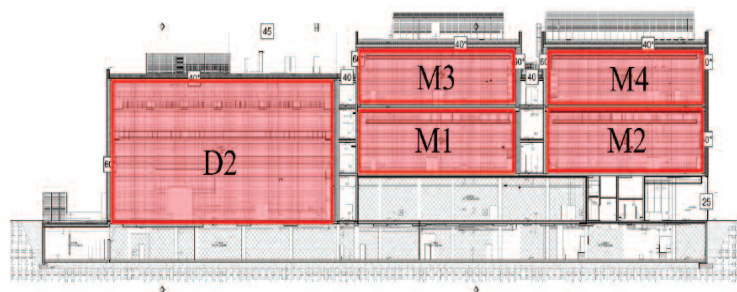


Fig. 2. Cross-section of the TVP film studio building showing the location of the film modules (in red)

Rys. 2. Przekrój budynku hali zdjęciowej TVP wraz z lokalizacją modułów filmowych (kolor czerwony)

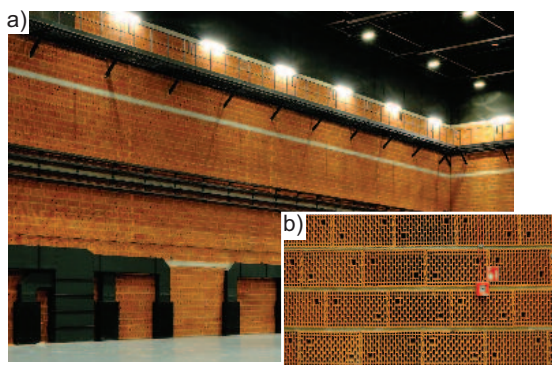
a balance of three key criteria: functionality, durability and simplicity of technical operation, which enables quick adaptation of the space to different production needs, without deterioration of sound or visual conditions. From the acoustic aspects, it was important that the applied acoustic system of wall finishing would allow for the possibility of uniform sound reinforcement of the rooms, the appropriate value and characteristic of reverberation time for a given room in accordance with the requirements of the Client [2].

Traditional sound-absorbing solutions, based on specialized acoustic panels, perforated panels or fabrics, are often expensive, require precise installation and regular maintenance. For this reason, alternative materials were sought that could serve the function of acoustic systems, while at the same time meeting aesthetic requirements and being easy to operate.

In this article the material solution for the walls of the filming modules based on the use of hollow bricks as finishing elements of wall claddings in the sound-absorbing system is presented. This material, commonly used in general construction, was adapted in an unusual way – through appropriate selection of geometry, arrangement and method of construction, effective absorption of sound waves was enabled. The aim of the research was to determine the acoustic efficiency of such a solution and its impact on the acoustic parameters of recording rooms.

Interior Acoustics Design

The interior acoustics design was based on the investor's requirements, according to which the reverberation time (RT60) had to be: for large modules: $0.9 \text{ s} \pm 0.2 \text{ s}$, for small modules: $0.6 \text{ s} \pm 0.2 \text{ s}$. To obtain such a short reverberation time in rooms of large volume, almost every surface had to serve a sound-absorbing function. Due to the large volumes of the rooms and the lack of space for dedicated low-frequency systems, a broadband sound absorption system was designed in the form of claddings made of hollow/perforated bricks serving an aesthetic role and resistant to mechanical impacts, an appropriately selected layer of mineral wool and an air cavity. When selecting the type of bricks, a product with the largest possible perforation and the most asymmetrical arrangement of openings was chosen. Finally, Thermoton 50 – 25 P+W bricks with dimensions of $500 \times 250 \times 235 \text{ mm}$ were used, cut in half of the depth (115 mm), with a high perforation coefficient (approximately 68 – 70%), with openings of varied shape – square or rectangular – with a width from 18 to 40 mm. The bricks were mounted on concrete shelves at a distance of 350 mm from the concrete wall, and behind them 200 mm of glass wool (15 kg/m^3) and 150 mm of air cavity were placed. The upper parts of the walls, in order to reduce construction costs, were made without perforated bricks – they were finished only with a layer of 200 mm of mineral wool with black fleece with 150 mm of air cavity behind the wool. Photograph presents the interior and the wall-finishing detail of the large film module.



Interior of the large film hall (a); detail of the internal wall finish (b)

Wnętrze dużej hali zdjęciowej (a); detal wykończenia ścian wewnętrznych (b)

Tradycyjne rozwiązania dźwiękochłonne, bazujące na specjalistycznych panelach akustycznych, perforowanych płytach lub tkaninach, często są kosztowne, wymagają precyzyjnego montażu oraz regularnej konserwacji. Z tego względu poszukiwano alternatywnych materiałów, które mogłyby pełnić funkcję ustrojów akustycznych, a jednocześnie spełniałyby wymagania estetyczne i były łatwe w eksploatacji.

W artykule zaprezentowano rozwiązanie materiałowe ścian modułów filmowych bazujące na zastosowaniu pustaków otworowych jako elementów okładzin ściennych w ustroju dźwiękochłonnym. Materiał ten, powszechnie stosowany w budownictwie ogólnym, został zaadaptowany w nietypowy sposób – poprzez odpowiedni dobór geometrii, układu i sposobu budowy umożliwiono skuteczne pochłanianie fal dźwiękowych. Celem badań było określenie efektywności akustycznej takiego rozwiązania oraz jego wpływu na parametry akustyczne pomieszczeń nagrań.

Projekt akustyki wnętrza

Projekt akustyki wnętrza oparto na wymaganiach inwestora, zgodnie z którymi czas pogłosu (RT60) miał wynosić w przypadku: dużych modułów – $0,9 \text{ s} \pm 0,2 \text{ s}$, a małych modułów – $0,6 \text{ s} \pm 0,2 \text{ s}$. W celu uzyskania tak krótkiego czasu pogłosu w pomieszczeniach o dużej kubaturze, niemal każda powierzchnia musiała pełnić funkcję dźwiękochłonną. Ze względu na dużą kubaturę pomieszczeń oraz brak miejsca na dedykowane ustroje niskoczęstotliwościowe, zaprojektowano szerokopasmowy system pochłaniania dźwięku w postaci okładzin z pustaków otworowych/perforowanych (hollow bricks) pełniących rolę estetyczną i odporną na uderzenia mechaniczne, odpowiednio dobranej warstwy wełny mineralnej oraz pustki powietrznej. Wybrano produkt o możliwie dużym otworowaniu i asymetrycznym układzie otworów. Ostatecznie zastosowano pustaki Thermoton 50 – 25 P+W o wymiarach $500 \times 250 \times 235 \text{ mm}$, przecięte w połowie głębokości (115 mm), o wysokim współczynniku perforacji (68 – 70%), przy czym otwory miały różny kształt (kwadratowy lub prostokątny) i szerokość $18 \div 40 \text{ mm}$. Pustaki zamocowano na półkach betonowych w odległości 350 mm

od ściany betonowej, a za nimi umieszczono 200 mm wełny szklanej (15 kg/m^3) oraz 150 mm pustki powietrznej. W celu ograniczenia kosztów budowy górne partie ścian wykonano bez pustaków perforowanych – wykończono je jedynie warstwą 200 mm wełny mineralnej z czarną fizeliną ze 150 mm pustki powietrznej za wełną. Wnętrze oraz detal wykończenia ścian wewnętrznych dużego modułu filmowego przedstawiono na fotografii.

Measurement Methodology

In order to determine the effectiveness of the above-mentioned system in the scope of sound absorption, a series of laboratory tests and computer simulations was conducted. The research began with measurements of the sound absorption coefficient using an impedance tube as a preliminary measurement of the effectiveness of the designed system. Measurements in the impedance tube do not require large financial outlays and are relatively simple to perform, therefore they allowed for quick verification of the validity of the solution. In the next stage of tests, a decision was made to conduct a proper measurement of sound absorption in a reverberation chamber, which is more accurate, and the measurement results are closer to actual values. Based on the obtained values of the sound absorption coefficient, computer simulations of the reverberation time in the Odeon program were conducted for all filming modules. In the final stage of the project implementation, acceptance measurements of the reverberation time in situ were performed in the finished filming modules, in order to verify the design assumptions and confirm the effectiveness of the designed sound-absorbing system.

Sound absorption coefficient measurements using the impedance tube method. The sound absorption coefficient measurements were conducted using an impedance tube with a diameter of 100 mm, in accordance with the standard PN-EN ISO 10534-2 [3], which is based on the transfer-function method. The choice of this method was dictated by its greater accuracy and repeatability of results [4, 5] compared to the standing wave method described in the standard PN-EN ISO 10534-1 [6].

For the tests, ceramic blocks were used (Figure 3), from which a total of six samples with a diameter of 100 mm – matching the inner diameter of the measurement tube – were cut. Due to the varied geometry of openings in the brick, two variants of samples differing in the degree of perforation were prepared:

- sample A – with perforation of approximately 68%, characterized by a smaller share of opening surface and a greater number of ceramic partitions;

- sample B – with perforation of approximately 70%, with a larger share of open surface, which theoretically should result in better flow of acoustic waves and a higher absorption coefficient.

In order to examine the influence of the bricks on the shielding of the sound-absorbing layer (mineral wool), measurements were conducted both for the ceramic bricks alone, for the mineral wool alone, and for systems composed of a brick (A or B) and a layer of 100 mm mineral wool (15 kg/m^3) placed directly behind the brick, fully filling the measurement space of the tube. Due to the geometric limitations of the impedance tube, it was not possible to conduct measurements of the system with the target thickness of the mineral wool layer (200 mm).

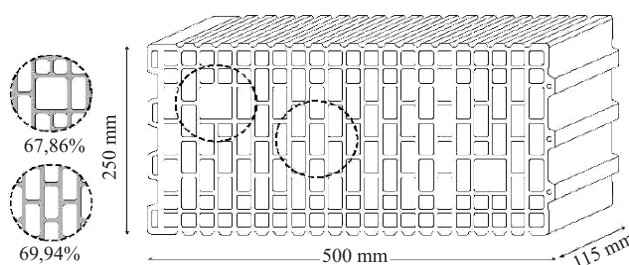


Fig. 3. The ceramic brick showing the location from which the samples for testing were taken

Rys. 3. Pustak ceramiczny z lokalizacją miejsca, z którego wycięto próbki do badań

Badania

W celu określenia skuteczności opisanego ustroju w zakresie pochłaniania dźwięku została przeprowadzona seria badań laboratoryjnych oraz symulacji komputerowych. Rozpoczęto od badań współczynnika pochłaniania dźwięku z wykorzystaniem tuby impedancyjnej (wstępny pomiar skuteczności projektowanego ustroju). Pomiary te nie wymagają dużych nakładów finansowych i są stosunkowo proste do wykonania, dlatego pozwoliły na szybką weryfikację zasadności rozwiązania. W kolejnym etapie zdecydowano się na pomiar pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej, który jest dokładniejszym, a rezultaty pomiarów są bliższe rzeczywistym wartościom. Na podstawie uzyskanych wartości przeprowadzono symulacje komputerowe czasu pogłosu w programie Odeon w przypadku wszystkich modułów filmowych. W końcowym etapie realizacji projektu wykonano odbiorowe pomiary czasu pogłosu in situ w wykończonych modułach filmowych, w celu weryfikacji założeń projektowych oraz potwierdzenia skuteczności zaprojektowanego ustroju dźwiękochłonnego.

Badania współczynnika pochłaniania dźwięku metodą tuby impedancyjnej. W badaniu zastosowano tubę impedancyjną o średnicy 100 mm i przeprowadzono je zgodnie z normą PN-EN ISO 10534-2 [3], bazującą na metodzie funkcji przejścia (*transfer-function method*). Wybór tej metody podyktowany był jej większą dokładnością i powtarzalnością wyników [4, 5] w porównaniu z metodą fal stojących opisaną w PN-EN ISO 10534-1 [6].

Do badań wykorzystano pustaki ceramiczne (rysunek 3), z których wycięto łącznie sześć próbek o średnicy 100 mm, dopasowanej do wewnętrznej średnicy tuby pomiarowej. Z uwagi na różną geometrię otworów w pustaku, przygotowano dwa warianty próbek różniących się stopniem perforacji:

- próbka A – o perforacji ok. 68%, charakteryzująca się mniejszym udziałem powierzchni otworów i większą liczbą przegród ceramicznych;

- próbka B – o perforacji ok. 70%, z większym udziałem otwartej powierzchni, co teoretycznie powinno skutkować lepszym przepływem fal akustycznych i wyższym współczynnikiem pochłaniania.

W celu zbadania wpływu pustaków na przesłonięcie warstwy dźwiękochłonnej (wełna mineralna) pomiary przeprowadzono w przypadku samych pustaków ceramicznych; samej wełny mineralnej, jak i układów złożonych z pustaka

(A lub B) oraz warstwy 100 mm wełny mineralnej (15 kg/m^3) umieszczonej bezpośrednio za pustakiem, w pełni wypełniającej przestrzeń pomiarową tuby. Ze względu na ograniczenia geometryczne rury impedancyjnej, nie było możliwe przeprowadzenie pomiaru ustroju z docelową grubością warstwy wełny mineralnej (200 mm).

The measurement of the sound absorption coefficient α_0 was performed independently in two frequency ranges, which were then combined to obtain the full characteristic in the band from 80 Hz to 1600 Hz. To ensure repeatability and reliability of the results, each measurement was performed three times for each sample and each system variant, which in total gave 240 measurement cycles (± 5 measurements). The obtained data were used to determine the frequency characteristics of the sound absorption coefficient for the angle of incidence of the sound wave perpendicular to the sample, for the wool alone, for both types of brick samples and their combinations with the mineral wool layer.

Sound absorption coefficient measurements in the reverberation chamber were conducted in the reverberation chamber with a volume of 200 m³, compliant with the requirements of the standard PN-EN ISO 354 [6]. The tested sample was mounted in a mounting frame with a height corresponding to the total thickness of the acoustic system. Type E-465 mounting was used, in accordance with standard guidelines. The depth of the tested sample (465 mm) corresponded to the mounting depth provided in the wall construction of the TVP filming halls. Two measurement variants were performed, differing in the thickness of the applied absorbing material layer:

- measurement 1: mineral wool thickness 200 mm (target planned thickness in the design);
- measurement 2: mineral wool thickness 100 mm (thickness corresponding to measurements in the impedance tube),

The tests were performed for the following layer arrangement of the acoustic system (counting from the visible side):

- ceramic brick Termoton 25-50 P+W, with dimensions of 250 × 500 mm and thickness of 115 mm (original brick cut in half of the depth, with visible perforation),
- rock wool, with a density of approximately 15 kg/m³ with black fleece; layer thickness: 2 × 100 mm (measurement 1) and 1 × 100 mm (measurement 2),
- air cavity: 150 mm (measurement 1) and 250 mm (measurement 2),
- floor of the reverberation chamber.

The ceramic bricks were laid on a lightweight, openwork substructure made of sanded wooden battens at 50 cm spacing, supporting only the edges of the elements. The mineral wool was mounted directly behind the bricks.

Reverberation time measurements in the filming halls were performed for fully finished interiors for a combination of 4 microphone locations and 3 source locations. The reverberation time measurements were conducted in accordance with the standard PN EN 3382 [7] using an impulse signal and integration of the room impulse response. For recording the room impulse response, class 1 sound level meters (compliant with IEC 60651 and IEC 60804) manufactured by 01dB, type Fusion, were used, recording the signal as a .wav file and then determining the reverberation time in the Dirac program (v.6.0).

Pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku α_0 wykonano niezależnie w dwóch zakresach częstotliwości, które następnie połączono w celu uzyskania pełnej charakterystyki w paśmie 80 ÷ 1600 Hz. W celu zapewnienia powtarzalności i wiarygodności wyników, każdy pomiar wykonano trzykrotnie dla każdej próbki oraz każdego wariantu układu, co łącznie dało 240 cykli pomiarowych (± 5 pomiarów). Uzyskane dane posłużyły do wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych współczynnika pochłaniania dźwięku w przypadku prostopadłego do próbki kąta padania fali dźwiękowej; samej wełny; obu typów próbek pustaków oraz ich kombinacji z warstwą wełny mineralnej.

Badania współczynnika pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej przeprowadzono w komorze pogłosowej o objętości 200 m³, zgodnej z wymaganiami normy PN-EN ISO 354 [6]. Badana próbka została zamocowana w ramie montażowej o wysokości odpowiadającej całkowitej grubości ustroju akustycznego. Zastosowano montaż typu E-465, zgodnie z wytycznymi normowymi. Głębokość badanej próbki (465 mm) odpowiadała głębokości montażowej przewidzianej w konstrukcji ścian budynku hal zdjęciowych TVP. Pomiary przeprowadzono w dwóch rozwiązaniach, różniących się grubością zastosowanej warstwy materiału chłonnego:

- pomiar 1 – grubość wełny mineralnej 200 mm (docelowa planowana grubość w projekcie);
- pomiar 2 – grubość wełny mineralnej 100 mm (grubość odpowiadająca pomiarom w rurze impedancyjnej).

Badania wykonano dla następującego układu warstw ustroju akustycznego (licząc od strony widocznej):

- pustak ceramiczny Termoton 25-50 P+W, o wymiarach 250 × 500 mm i grubości 115 mm (pustak oryginalny przecięty w połowie głębokości, z widoczną perforacją);
- wełna mineralna skalna, o gęstości ok. 15 kg/m³ z czarną fizełiną; grubość warstwy: 2 × 100 mm (pomiar 1) oraz 1 × 100 mm (pomiar 2);
- pustka powietrzna: 150 mm (pomiar 1) oraz 250 mm (pomiar 2);
- podłoga komory pogłosowej.

Pustaki ceramiczne ułożono na lekkiej, ażurowej podkonstrukcji wykonanej z cyklinowanych listew drewnianych w rozstawie co 50 cm, podpierającej jedynie krawędzie elementów. Wełna mineralna została zamocowana bezpośrednio za pustakami.

Badania czasu pogłosu w halach zdjęciowych wykonano w pełni wykończonych wnętrzach w przypadku kombinacji czterech lokalizacji mikrofonu i trzech lokalizacji źródeł. Pomiary czasu pogłosu przeprowadzono zgodnie z normą PN EN 3382 [7] z wykorzystaniem sygnału impulsowego i całkowania odpowiedzi impulsowej pomieszczenia. Do rejestracji odpowiedzi impulsowej pomieszczenia wykorzystano mierniki poziomu dźwięku klasy 1 (zgodne z IEC 60651 i IEC 60804), rejestrując sygnał jako plik .wav, a następnie wyznaczając czas pogłosu w programie Dirac (v.6.0).

Measurement Results

Results of sound absorption coefficient measurements – impedance tube. In Figure 4, a compilation of sound absorption coefficients α_0 as a function of frequency for various configurations of acoustic systems made of ceramic bricks and rock wool layer is presented. The analysis covers two types of samples with different degrees of perforation (Sample A – 68%, Sample B – 70%). Each sample was tested in two variants: the brick alone and the brick with a layer of rock wool placed behind it with a thickness of 10 cm. For comparison, the characteristic of rock wool alone is also presented.

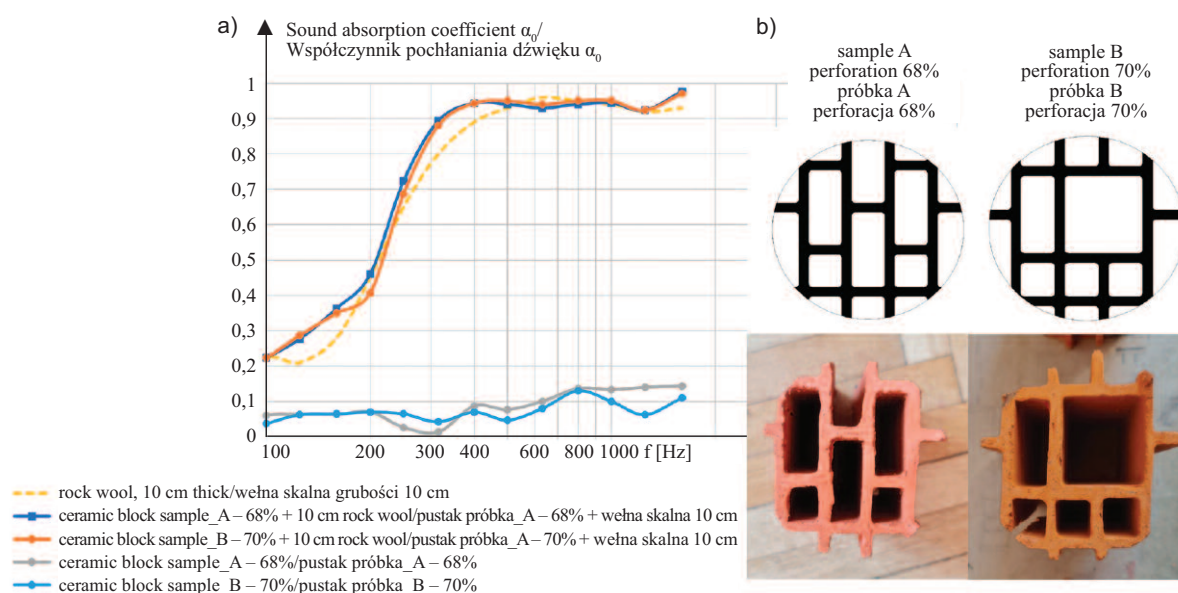


Fig. 4. Results of impedance tube measurements (a), view and perforation degree of the test samples (b)

Rys. 4. Wyniki pomiarów w tubie impedancyjnej (a), widok i stopień perforacji próbek pomiarowych (b)

All tested configurations show low sound absorption values ($\alpha_0 < 0,3$) at low frequencies (100 – 250 Hz), which is typical for thin porous systems. The brick alone has very low effectiveness, while adding a layer of wool significantly improves absorption – the effect of α_0 increase is observed already from approximately 160 Hz.

In the range of medium frequencies (250 – 1000 Hz), a sharp increase in the absorption coefficient is observed for samples with rock wool – α_0 values reach 0.8 – 1.0, which indicates very good absorption. Both samples (A and B) with wool behave very similarly, while the sample with greater perforation (B) shows slightly better parameters in the vicinity of 500 Hz.

At high frequencies (1000 ÷ 1600 Hz), high absorption efficiency is maintained for all samples with wool ($\alpha_0 \approx 0,9 - 1,0$). The bricks alone (without wool) in this range have low effectiveness ($\alpha_0 < 0,2$), which confirms that rock wool is the main absorbing element of the acoustic system. The brick alone does not show high absorbing properties, however its application allows for an increase in the value of the sound absorption coefficient relative to rock wool alone at low (100 ÷ 200 Hz), as well as at medium frequencies (250 ÷ 500 Hz).

Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku – tuba impedancyjna. Na rysunku 4 przedstawiono zestawienie współczynników pochłaniania dźwięku α_0 w funkcji częstotliwości w przypadku różnych konfiguracji ustrojów akustycznych z pustaków ceramicznych oraz warstwy wełny skalnej. Analiza obejmuje dwa typy próbek o różnym stopniu perforacji (próbka A – 68%, próbka B – 70%). Każdą z próbek badano w dwóch wariantach: sam pustak oraz pustak z umieszczoną za nim warstwą wełny skalnej o grubości 10 cm. Dla porównania przedstawiono również charakterystykę samej wełny skalnej.

We wszystkich przebadanych konfiguracjach uzyskano małe wartości pochłaniania dźwięku ($\alpha_0 < 0,3$) w niskich częstotliwościach (100 ÷ 250 Hz), co jest typowe w przypadku cienkich ustrojów porowatych. Sam pustak ma bardzo małą skuteczność, natomiast dodanie warstwy wełny znacznie poprawia pochłanianie – efekt zwiększenia α_0 obserwowany jest już od ok. 160 Hz.

W zakresie średnich częstotliwości (250 ÷ 1000 Hz) obserwuje się gwałtowne zwiększenie współczynnika pochłaniania w przypadku próbek z wełną skalną – wartości α_0 osiągają 0,8 – 1,0, co wskazuje na bardzo dobre pochłanianie. Obie próbki (A i B) z wełną zachowują się bardzo podobnie, przy czym próbka o większej perforacji (B) wykazuje nieznacznie lepsze parametry w okolicy 500 Hz.

W wysokich częstotliwościach (1000 ÷ 1600 Hz) w przypadku wszystkich próbek z wełną utrzymuje się bardzo duża efektywność pochłaniania ($\alpha_0 \approx 0,9 - 1,0$). Same pustaki natomiast (bez wełny) w tym zakresie mają małą skuteczność ($\alpha_0 < 0,2$), co potwierdza, że wełna skalna jest głównym elementem pochłaniającym ustroju akustycznego. Sam pustak nie wykazuje dobrych właściwości pochłaniających, jednak jego zastosowanie pozwala na przyrost wartości współczynnika pochłaniania dźwięku względem wełny skalnej w niskich (100 ÷ 200 Hz), a także w średnich częstotliwościach (250 ÷ 500 Hz).

Results of sound absorption coefficient measurements – reverberation chamber. In Figure 5, the results of sound absorption coefficient measurements performed in the reverberation chamber in accordance with the standard PN-EN ISO 354 [6] for the acoustic system with ceramic brick in two variants of rock wool thickness: 100 mm and 200 mm are presented. For both cases, the frequency characteristic of the absorption coefficient shows the highest values in the range of low frequencies ($125 \div 250$ Hz), gradually decreasing with increasing frequency. Increasing the

thickness of the rock wool layer to 200 mm, correspondingly reducing the thickness of the air cavity from 250 to 150 mm, causes a noticeable increase in absorption, particularly in the range of low and medium frequencies, which confirms the improvement of the system effectiveness in this band. In the band above 1000 Hz, the differences between both variants are small, and the absorption coefficient stabilizes at a level of approximately 0.75–0.8. For both variants, the weighted sound absorption index determined for the frequency range $125 \text{ Hz} \div 4000 \text{ Hz}$ was $\alpha_w = 0.85$ (L), which allowed to obtain absorption class B.

The values of the sound absorption coefficient greater than one obtained in the measurements result from edge effects and wave diffraction at the sample edge, and from the fact that in the methodology for determining the sound absorption coefficient, only the projection surface of the sample is assumed, while the actual absorbing surface, due to its thickness, is much larger.

Results of reverberation time measurements – in-situ. In Figure 6 and Figure 7, a comparison of the results of computer simulation of reverberation time T_{30} performed using the Odeon program with measurements conducted in situ in the finished filming modules is presented. Field measurements were performed in one large module (D1) and two smaller ones (M1 and M2). In both cases, measurements were performed in accordance with the standard PN-EN ISO 3382-1 [7]. The results were referenced to the investor's requirement values, defined as $T_{30} = 0.9 \pm 0.2$ s (for the large module D1) and $T_{30} = 0.6 \pm 0.2$ s (for the smaller modules M1 and M2) in the range of octave bands $125 \div 4000$ Hz.

Module D1 – large module. In the case of the large module, the reverberation time falls within the investor's requirements and is maintained in the range of approximately 1.0 s with a clear reduction to a value of approximately 0.8 seconds for frequencies $125 \div 250$ Hz. The frequency characteristic of the reverberation time is flat in the range $125 \div 8000$ Hz, and only in the range of the lowest frequencies the reverberation time increases to approximately 1.45 seconds.

Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku – komora pogłosowa. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonane w komorze pogłosowej zgodnie z normą PN-EN ISO 354 [6] dla ustroju akustycznego z pustaka ceramicznego w dwóch wariantach grubości wełny skalnej: 100 oraz 200 mm. W obu przypadkach charakterystyka częstotliwościowa współczynnika pochłaniania wykazuje największe wartości w zakresie niskich częstotliwości ($125 \div 250$ Hz), stopniowo zmniejszające się

wraz ze wzrostem częstotliwości. Zwiększenie grubości warstwy wełny skalnej do 200 mm, zmniejszając odpowiednio grubość pustki powietrznej z 250 do 150 mm, powoduje zauważalny wzrost pochłaniania, szczególnie w zakresie niskich i średnich częstotliwości, co potwierdza poprawę skuteczności ustroju w tym paśmie. W paśmie powyżej 1000 Hz różnice między obydwoma wariantami są niewielkie, a współczynnik pochłaniania stabilizuje się i wynosi 0,75–0,8. W obu wariantach ważony wskaźniki pochłaniania dźwięku wyznaczony dla częstotliwości $125 \div 4000$ Hz wyniósł $\alpha_w = 0,85$ (L), co pozwoliło na uzyskanie klasy pochłaniania B.

Uzyskane w pomiarach wartości współczynnika pochłaniania dźwięku większe od jedności wynikają z efektów brzegowych i ugięcia fali na krawędzi próbki oraz faktu, że w metodzie wyznaczania współczynnika pochłaniania dźwięku przyjmuje się tylko powierzchnie rzutu próbki, natomiast rzeczywista powierzchnia pochłaniająca, ze względu na jej grubość, jest dużo większa.

Wyniki pomiarów czasu pogłosu – in situ. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono porównanie wyników symulacji komputerowej czasu pogłosu T_{30} wykonanej za pomocą programu Odeon z pomiarami przeprowadzonymi in situ w wykończonych modułach filmowych. Pomiary terenowe przeprowadzono w jednym dużym studiu (D1) oraz dwóch małych (M1 i M2). W obu przypadkach pomiary wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 3382-1 [7]. Wyniki odniesiono do wartości wymagań inwestora, określonych jako $T_{30} = 0,9 \pm 0,2$ s (w przypadku dużego modułu studia D1) oraz $T_{30} = 0,6 \pm 0,2$ s (dla mniejszych modułów M1 i M2) w zakresie pasm oktawowych $125 \div 4000$ Hz.

Moduł D1 – moduł duży. W przypadku dużego modułu czas pogłosu mieści się w granicach wymagań inwestora i utrzymuje się w zakresie ok 1,0 s z wyraźnym obniżeniem do wartości ok. 0,8 s w przypadku częstotliwości $125 \div 250$ Hz. Charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu jest płaska w zakresie $125 \div 8000$ Hz, a jedynie w zakresie najniższej częstotliwości czas pogłosu zwiększa się do ok. 1,45 s.

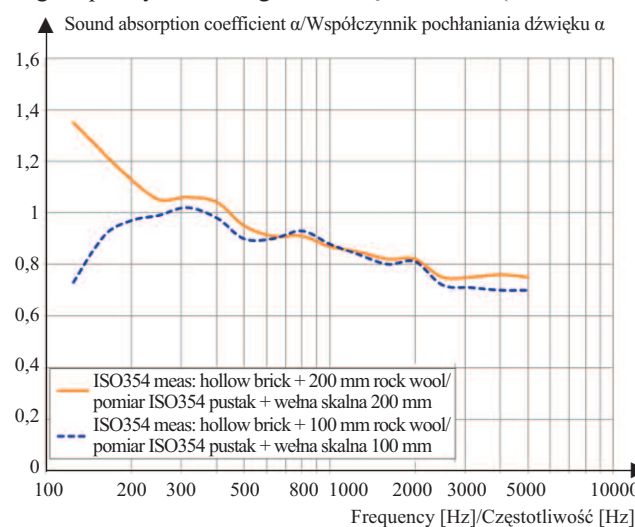


Fig. 5. Results of sound absorption coefficient measurements in the reverberation chamber for the acoustic system with two variants of mineral wool thickness (1/3 octave bands)

Rys. 5. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej w przypadku ustroju akustycznego w dwóch wariantach grubości wełny mineralnej (pasma tercjowe)

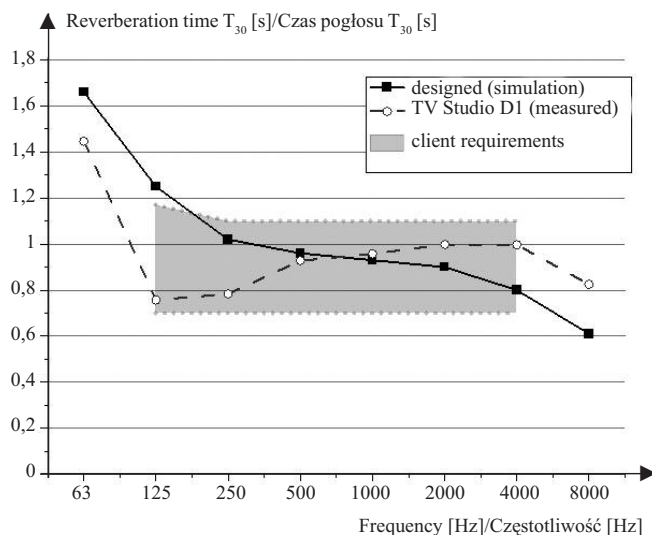


Fig. 6. In-situ measurements of reverberation time (T_{30}) conducted in the completed large film module D1, compared with the simulation results obtained using Odeon software (octave bands)
 Rys. 6. Wyniki pomiarów czasu pogłosu T_{30} in situ wykonane w ukończonym dużym module filmowym D1 wraz z symulacją w programie Odeon (pasma oktaawowe)

Modules M1 and M2 – small module. In the case of small modules, the reverberation time falls within the investor's requirements and is maintained in the range of approximately 0.45 s with a gradual reduction to a value of approximately 0.4 seconds for frequencies 125 ÷ 250 Hz. The frequency characteristic of the reverberation time is flat in the range of 125 to 8000 Hz, and only in the range of the lowest frequencies the reverberation time increases to approximately 0.70 seconds.

Discussion

The results of sample measurements in the impedance tube confirmed that the applied type of bricks does not worsen the sound absorption coefficient of the sound-absorbing layer (mineral wool) alone. The measurement results also confirmed that there are no significant differences in absorption between samples A and B, differing in the degree of perforation (68% and 70% respectively) and slightly in the arrangement and dimensions of openings.

The results of measurements in the reverberation chamber indicate that increasing the thickness of the sound-absorbing layer (from 100 mm to 200 mm) while maintaining the total distance of the system face from the wall (465 mm) has the greatest impact on the acoustic efficiency of the system in the range of low frequencies (below 500 Hz). This is significant because obtaining high absorption coefficients at the lowest frequencies together with effective absorption of medium and high bands is difficult. For absorption of low frequencies, narrow-band acoustic systems (e.g., resonant or panel) tuned most often to a narrow band of low frequencies are typically used. The sound-absorbing system presented in this article is equally effective (as lightweight panel systems) at low frequencies while maintaining strong absorption of medium and high bands, while being a very cheap and simple execution solution.

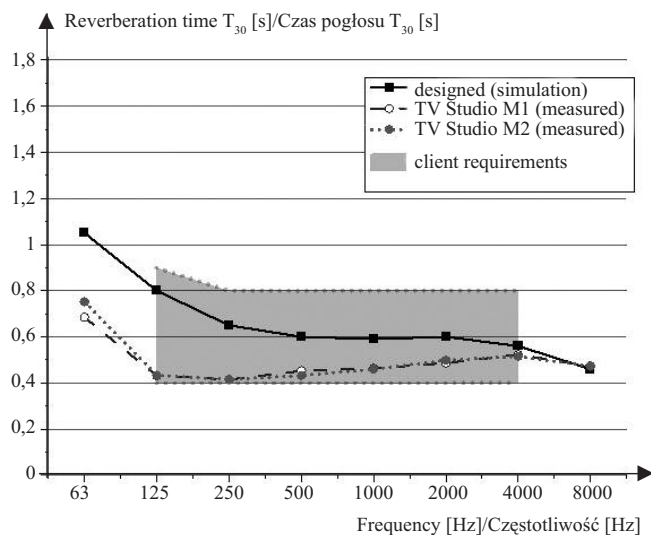


Fig. 7. Results of in-situ (T_{30}) reverberation time measurements in the small film modules M1 and M2, compared with simulation results from Odeon Software (octave bands)
 Rys. 7. Wyniki pomiarów czasu pogłosu T_{30} in situ w przypadku małych modułów filmowych M1 i M2 wraz z symulacją w programie Odeon (pasma oktaawowe)

Moduły M1 i M2 – moduł mały. W przypadku małych modułów czas pogłosu spełnia wymagania inwestora i wynosi 0,45 s ze stopniowym zmniejszeniem do wartości ok. 0,4 s w przypadku częstotliwości 125 ÷ 250 Hz. Charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu jest płaska w zakresie 125 ÷ 8000 Hz, a jedynie w zakresie najniższej częstotliwości czas pogłosu zwiększa się do ok. 0,70 s.

Dyskusja

Wyniki pomiarów próbek w tubie impedancyjnej potwierdziły, że zastosowany rodzaj pustaków nie pogarsza współczynnika pochłaniania dźwięku samej warstwy dźwiękochłonnej (wełny mineralnej). Wyniki pomiarów potwierdziły również, że nie ma istotnych różnic w pochłanianiu pomiędzy próbkami A i B, różniącymi się stopniem perforacji (odpowiednio 68 i 70%) oraz nieznacznie układem i wymiarami otworów.

Wyniki pomiarów w komorze pogłosowej wskazują, że zwiększenie grubości warstwy dźwiękochłonnej (z 100 do 200 mm) przy zachowaniu sumarycznej odległości lica ustroju od ściany (465 mm) ma największy wpływ na efektywność akustyczną ustroju w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 500 Hz). Jest to o tyle istotne, że trudno uzyskać współczynniki pochłaniania o dużej wartości w najniższych częstotliwościach łącznie ze skutecznym pochłanianiem średnich i wysokich pasm. Do pochłaniania w niskich częstotliwościach stosuje się typowo wąskoczęstotliwościowe ustroje akustyczne (np. rezonansowe lub płytowe) strojone najczęściej na wąskie pasmo niskich częstotliwości. Ustrój dźwiękochłonny przedstawiony w artykule jest równie efektywny (co lekkie ustroje płytowe) w niskich częstotliwościach przy równoczesnym zachowaniu mocnego pochłaniania średnich i wysokich pasm, będąc przy tym bardzo tanim i prostym wykonawczo rozwiązaniem.

In Figure 8, a comparison of the results of simulation in the WinFlag program [8] of the sound absorption coefficient of perforated system samples with the degree of perforation and depth of openings corresponding to sample A and measurements of the same systems in the reverberation chamber of ITB is presented. The comparison confirmed the correctness of the simulation results in the range of frequency bands $125 \div 500$ Hz, while it showed a large discrepancy of results above 500 Hz. The simulation results did not show a tendency to stabilize the value of the sound absorption coefficient for frequencies >1000 Hz. In the simulation, the sound absorption coefficient decreased gradually from the maximum value to zero (for 5000 Hz), which indicates a significant influence of the surface roughness of the brick openings (Figure 8b), which roughness is typically omitted in computational models. The discrepancies between simulation and measurement of real samples (especially above 500 Hz) presented in Figure 8 should be a guide for designers to also take into account the influence of sample roughness when basing on simulation results.

The comparison of two realized modules (M1 and M2) indicates that the differences between them do not exceed 0.02 s in individual bands, which confirms the high acoustic repeatability of the applied solution and its low susceptibility to possible execution errors. The comparative analysis of simulation and measurement results for both filming modules showed high compliance with the design assumptions, which proves the correctness of the adopted methodology for selecting types of bricks, type of wool and simulations performed on computer models in the Odeon program. The obtained and measurement-confirmed reverberation times meet the investor's requirements in the range of $125 \div 4000$ Hz, which confirms the effectiveness of the designed acoustic adaptation system. The differences observed in the low frequency band between the simulation results and the measurement result from a number of measures taken by the designers at the stage of author's supervision aimed at maximizing the absorption coefficient in the range of low frequencies (bands 63 – 125 Hz). These measures mainly consisted of optimization of the selection of thickness and flow resistance of mineral wool and maximization of space behind the acoustic systems. The differences in the measured reverberation time in relation to the simulation results, observed in the low frequency band, probably also result from underestimation at the simulation stage of the acoustic absorption of other materials – such as roof, ventilation

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wyników symulacji w programie WinFlag [8] współczynnika pochłaniania dźwięku próbek perforowanych ustrojów o stopniu perforacji i głębokości otworów odpowiadającym próbce A oraz pomiarów tych samych ustrojów w komorze pogłosowej ITB.

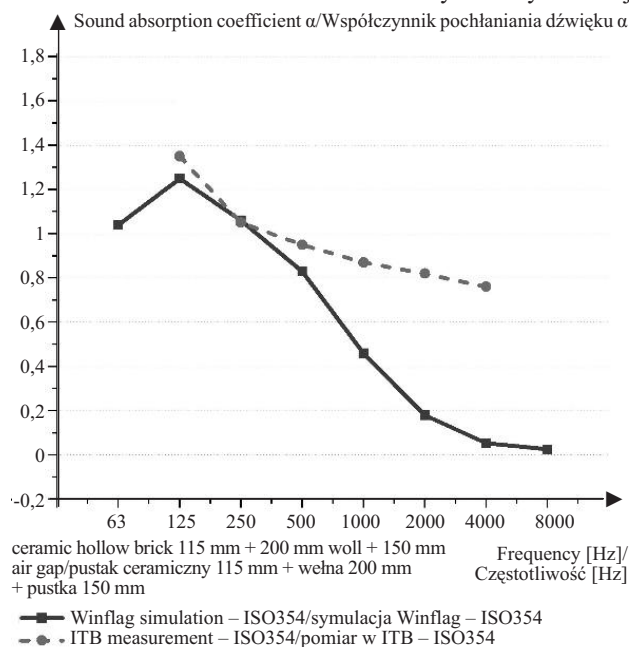


Fig. 8. Comparison of the results of the simulation (Winflag) and the measurements (ITB) of the sound absorption coefficient for the structure made of hollow blocks

Rys. 8. Porównanie wyników symulacji (Winflag) i pomiarów (ITB) współczynnika pochłaniania dźwięku w przypadku ustroju z pustaków

Porównanie potwierdziło poprawność wyników symulacji w zakresie częstotliwości $125 \div 500$ Hz, natomiast pokazało dużą rozbieżność wyników powyżej 500 Hz. Wyniki symulacji nie wykazały tendencji do stabilizacji wartości współczynnika pochłaniania dźwięku w przypadku częstotliwości >1000 Hz. W symulacji współczynnik pochłaniania dźwięku zmniejszał się stopniowo od wartości maksymalnej do zera (dla 5000 Hz), co świadczy o istotnym wpływie chropowatości powierzchni otworów pustaków (rysunek 8), która jest pomijana w modelach obliczeniowych. Rozbieżności między symulacją a pomiarem rzeczywistych próbek (zwłaszcza powyżej 500 Hz) przedstawione na rysunku 8 powinny być wskazówką dla projektantów, aby bazując na wynikach symulacji, uwzględnić również wpływ chropowatości próbek.

Porównanie dwóch zrealizowanych modułów (M1 i M2) wskazuje, że różnice pomiędzy nimi nie przekraczają 0,02 s w poszczególnych pasmach, co potwierdza bardzo dużą powtarzalność akustyczną zastosowanego rozwiązania i jego małą podatność na ewentualne błędy wykonawcze. Analiza porównawcza wyników symulacyjnych i pomiarowych obu modułów filmowych wykazała dużą zgodność z założeniami projektowymi, co dowodzi o prawidłowości przyjętej metody wyboru rodzajów pustaków, typu wełny oraz symulacji wykonanych na modelach komputerowych. Otrzymane i potwierdzone pomiarowo czasy pogłosu spełniają wymagania inwestora w zakresie $125 \div 4000$ Hz, co potwierdza skuteczność zaprojektowanego systemu adaptacji akustycznej. Różnice obserwowane w paśmie niskich częstotliwości pomiędzy wynikami symulacji a pomiarem wynikają z wielu zabiegów podjętych przez projektantów na etapie nadzoru autorskiego zmierzających do maksymalizacji współczynnika pochłaniania w zakresie niskich częstotliwości (pasma 63 – 125 Hz). Zabiegi te polegały głównie na optymalizacji doboru grubości i oporu przepływu wełny mineralnej oraz maksymalizacji przestrzeni za ustrojami akustycznymi. Różnice w zmierzonym czasie pogłosu w stosunku do wyników symulacji, obserwowane w paśmie niskich częstotliwości, wynikają zapewne również z niedoszacowania na etapie symulacji chłonności akustycznej pozostałych materiałów, takich jak dach, ka-

ducts, etc., as well as from the limitations of the simplified method of mapping wave phenomena occurring at low frequencies in computer programs.

The adopted layer arrangement in the discussed acoustic system with the use of perforated ceramic bricks with a thickness of 115 mm, 200 mm layer of mineral wool and an additional 150 mm layer of air cavity effectively absorbs also low frequencies (band 125 Hz), which is particularly important in large studio rooms equipped with sound reinforcement and requiring reverberation time control also in the range of low frequencies ≤ 125 Hz. There are practically no commercial solutions of claddings on the market that are simultaneously resistant to impacts and characterized by high sound absorption coefficients in the entire frequency band. The solution proposed in this work is exactly such a system.

Summary

The conducted analyses and measurements confirmed that hollow bricks can successfully serve the function of an effective sound-absorbing system in rooms of large volume, such as filming and recording studios. Although these are not materials dedicated for acoustic purposes, their appropriate use – through proper placement, orientation of openings, selection of the degree of perforation and application of a sound-absorbing layer and air cavity behind the brick – allows to obtain a sound-absorbing system with very high absorption coefficients.

Advantages of the solution:

- **acoustic efficiency** of the discussed acoustic system – applied in a controlled manner it shows good sound-absorbing properties, which allowed to finally achieve a high sound absorption coefficient $\alpha_w = 0.85$ (L);
- **reverberation time reduction** – the solution enabled effective control and reduction of the reverberation time in the rooms, which significantly improved their acoustic properties and comfort of use;
- **structural and economic values** – hollow bricks are a cheap, easily available and durable material, thanks to which they constitute a favorable alternative to traditional, expensive sound-absorbing systems;
- **architectural application** – thanks to their form and compositional possibilities, bricks can constitute a decorative and structural element of the interior, combining the aesthetic function with the functional one.

The authors would like to thank archAKUSTIK for providing the measurement results.

Received: 11.08.2025
Revised: 02.10.2025
Published: 23.12.2025

nały wentylacyjne itp., jak i z ograniczeń uproszczonego sposobu odwzorowywania zjawisk falowych występujących w niskich częstotliwościach w programach komputerowych.

Przyjęty układ warstw w omawianym ustroju akustycznym z zastosowaniem otworowanych pustaków ceramicznych (grubość 115 mm; warstwy wełny mineralnej 200 mm oraz dodatkowej 150 mm warstwy pustki powietrznej) skutecznie pochłania również niskie częstotliwości (pasmo 125 Hz), co jest szczególnie istotne w dużych pomieszczeniach studyjnych wyposażonych w nagłośnienie i wymagających kontroli czasu pogłosu również w zakresie niskich częstotliwości ≤ 125 Hz. Na rynku brak jest praktycznie komercyjnych rozwiązań okładzin będących równocześnie odpornymi na uderzenia, jak i charakteryzującymi się dużym współczynnikiem pochłaniania dźwięku w całym paśmie częstotliwości. Zaproponowane rozwiązanie jest takim ustrojem.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy i pomiary potwierdziły, że pustaki otworowe mogą z powodzeniem pełnić funkcję skutecznego ustroju dźwiękochłonnego w pomieszczeniach o dużej kubaturze. Pomimo iż nie są to materiały dedykowane do celów akustycznych, ich odpowiednie wykorzystanie poprzez właściwe rozmieszczenie, orientację otworów, dobór stopnia perforacji oraz zastosowanie warstwy dźwiękochłonnej oraz pustki powietrznej za pustakiem pozwala na uzyskanie ustroju dźwiękochłonnego o bardzo dobrym współczynniku pochłaniania.

Zalety rozwiązania:

- **efektywność akustyczna omawianego ustroju akustycznego** – uzyskano współczynnik $\alpha_w = 0,85$ (L);
- **redukcja czasu pogłosu** – rozwiązanie umożliwiło skuteczną kontrolę i obniżenie czasu pogłosu w pomieszczeniach, co znacznie poprawiło ich właściwości akustyczne i komfort użytkowania;
- **walory konstrukcyjne i ekonomiczne** – pustaki otworowe są materiałem tanim, łatwo dostępnym i trwałym, dzięki czemu stanowią dobrą alternatywę dla tradycyjnych, kosztownych ustrojów dźwiękochłonnych;
- **walory architektoniczne** – dzięki formie i możliwościom kompozycyjnym, pustaki mogą stanowić element dekoracyjny i strukturalny wnętrza, łącząc funkcję estetyczną z użytkową.

Autorzy dziękują firmie archAKUSTIK za udostępnienie wyników pomiarów.

Artykuł wpłynął do redakcji: 11.08.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.10.2025 r.
Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Blazo G. Acoustical Design of Broadcasting and Recording Studios: Requirements, Recommendations, Architectural Guidelines. Amazon Digital Services LLC – Kdp, 2022.
- [2] Sadowski J. Akustyka architektoniczna. PWN, Warszawa 1976.
- [3] PN-EN ISO 10534-2: 2003 Akustyka. Określenie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część 2: Metoda funkcji przejścia.
- [4] Setaki, Foteini, Tenpierik, Martin, Timmeren, Turrin. Comparison of standing wave ratio method and transfer function method for measuring sound absorbing properties of 3d-printed samples DAGA 2016 conference paper. 2016.

- [5] Suhanek M, Jambrosic K, Horvat M. A comparison of two methods for measuring the sound absorption coefficient using impedance tubes”, 2008 50th International Symposium ELMAR, Borik Zadar, Croatia, 2008, pp. 321-324.
- [6] PN-EN ISO 10534-1:2004 Akustyka. Określanie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część 1: Metoda wykorzystująca współczynnik fal stojących.
- [7] PN-EN ISO 354:2005 Akustyka. Pomiar pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej.
- [8] PN-EN ISO 3382-1 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń.
- [9] Vigran TE. Manual for Winflag, version 4.0. Trondheim, 2018.