

dr hab. inż. arch. Andrzej K. Kłosak, prof. PK<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-6326-1652

mgr inż. arch. Karolina Warzocha<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-8552-2315

# Cegła klinkierowa jako materiał do budowy elementów rozpraszających dźwięk na przykładzie sali koncertowej

*Glazer brick as building material for sound diffusers in concert hall*

DOI: 10.15199/33.2023.08.10

**Streszczenie.** W artykule omówiono projekt, wykonanie i właściwości akustyczne ściennego ceglano dyfuzora dźwięku wykonanego z tradycyjnej cegły klinkierowej, zastosowanego w Sali Koncertowej im. Krzysztofa Pendereckiego z widownią na 550 miejsc w Radomiu. Omówiono wstępne analizy przy użyciu modeli komputerowych, późniejsze badania na modelach w skali oraz badania na pełnowymiarowych elementach w komorze pogłosowej.

**Słowa kluczowe:** rozproszenie dźwięku; sala koncertowa; cegła klinkierowa.

**Abstract.** This paper discusses the design, realization and acoustical performance of a brick wall diffuser constructed from clinker brick for 550 seats concert hall, located in Radom, Poland opened in 2010. Early designs with computer models as well as later scale model tests and full scale reverberation measurements are described.

**Keywords:** sound diffusion; concert hall; glazed brick.

W czerwcu 2007 r. ogłoszono wyniki konkursu architektonicznego na projekt budynku nowej szkoły muzycznej w Radomiu (Zespół Szkół Muzycznych im. Oskara Kolberga w Radomiu). Obiekt o powierzchni 12000 m<sup>2</sup> miał pomieścić m.in. profesjonalną salę koncertową na 550 miejsc. Zwycięzcą konkursu zostało lokalne radomskie biuro architektoniczne Archi-Rad 2000. Jeden z autorów artykułu, praktycznie pod koniec fazy projektu budowlanego, został poproszony o wykonanie projektu akustycznego sali koncertowej i części innych pomieszczeń. Z powodu zbyt krótkiego czasu na szczegółowe studia większość projektowania wnętrza sali, włącznie z badaniami na modelu jej wnętrza w skali, odbyła się już podczas fazy budowy, która rozpoczęła się w styczniu 2009 r. Sala otworzyła swoje podwoje we wrześniu 2010 r. Całkowity koszt budowy (w tym pomieszczenia szkoły, hala sportowa i sala koncertowa) wyniósł ok. 40 mln zł. Sala koncertowa została nazwana imieniem sławnego polskiego dyrygenta i kompozytora, prof. Krzysztofa Pendereckiego. W artykule omówiono zagadnienia dotyczące projektu, badań i działania ściennego dyfuzora akustycznego, w którym wykorzystano jedynie tradycyjną pełną cegłę klinkierową. Więcej informacji o akustyce sali, w tym wyników pomiarów akustycznych zawarto we wcześniejszych publikacjach [1, 2].

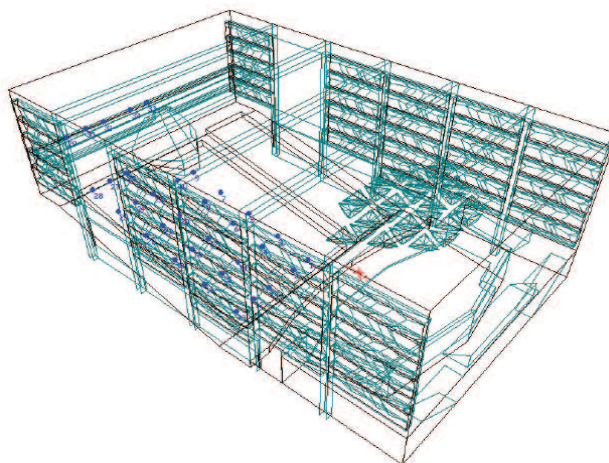
## Projekt akustyczny

Sali koncertowej nadano klasyczną prostopadłościenną formę o kubaturze ok. 7700 m<sup>3</sup> i wymiarach ok. 34 x 21 x 13 m. Pudełkowy kształt sali oraz jej proporcje (stosunek szerokości do długości wynoszący ok. 1,7) powinny wzmacniać wczesną

energię boczną i wrażenia przestrzenności dźwięku w sali [3, 4, 5]. Sala miała służyć trzem głównym funkcjom:

- wykorzystaniu przez uczniów szkoły muzycznej na koncerty orkiestrowe, kameralne, chóralskie i występy solistów oraz próby i egzaminy;
- stać się głównym miejscem koncertów muzyki klasycznej w Radomiu;
- wykorzystaniu na koncerty z nagłośnieniem, wykłady i konferencje.

Podczas wstępnej fazy projektowania stworzono komputerowe modele wnętrza sali w programie Odeon (rysunek 1), które pokazały, że do projektu sali należy wprowadzić wiele rozwiązań istotnych z akustycznego punktu widzenia. Spośród wprowadzonych zmian, opisanych szczegółowo w [1, 2], najbardziej istotna dla estetyki sali dotyczyła projektu ścian bocznych i polegała na wpro-

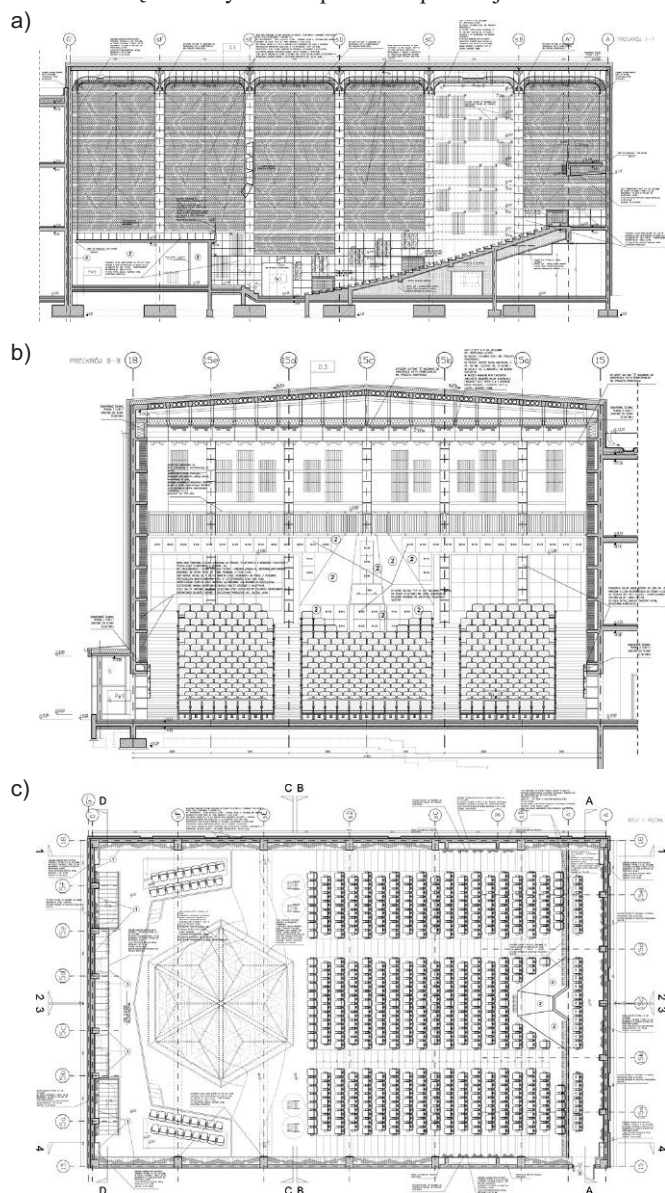


Rys. 1. Model wnętrza Sali Koncertowej im. K. Pendereckiego  
Fig. 1. Odeon model of the Penderecki Concert Hall

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: andrzej.klosak@pk.edu.pl

wadzeniu dyfuzorów dźwięku na pierwotnie płaskie ściany żelbetonowe, których celem było zwiększenie stopnia rozproszenia dźwięku w sali. Ze względu na ograniczony budżet i dostępność materiałów, dyfuzory zaprojektowano, stosując tradycyjną pełną cegłę klinkierową. Takie rozwiązanie miało również zapobiegać intensywnemu pochłanianiu dźwięków małych częstotliwości przez lekkie okładziny drewniane, stosowane typowo do wykończenia wnętrz. Na rysunku 2 pokazano przekrój sali oraz rzut.



**Rys. 2. Przekrój podłużny (a) i poprzeczny (b) oraz rzut (c) Sali Koncertowej im. K. Pendereckiego**

*Fig. 2. Longitudinal section (a), cross-section (b) and plan (c) of the Penderecki Concert Hall*

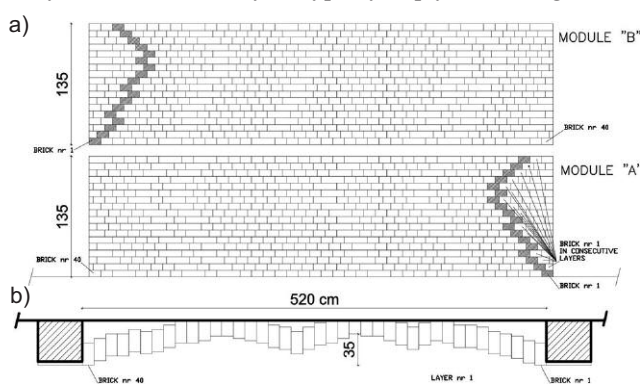
## Badania na modelach w skali

W czasie budowy sali przeprowadzono szeroki program badań na modelach w skali, w celu zweryfikowania cech akustycznych najważniejszych elementów wykończenia wnętrza. W ramach tych prac wykonano trzy modele: dyfuzora ceglany w skali 1 : 6,25; dyfuzora ceglany w skali 1:20; wnętrza sali koncertowej w skali 1:20.

Jednym z głównych elementów wnętrza sali jest ciężki ceglany dyfuzor. W nawiązaniu do raportów o pozytywnej korelacji między rozproszeniem dźwięku sali a jej jakością akustyczną [6], wstępny projekt zakładał konieczność wprowadzenia bardzo dużej liczby elementów rozpraszających na ścianach i suficie. Okładzina drewniana to typowy materiał, z którego łatwo można zbudować elementy rozpraszające, ale ze względu na niewielką masę takiej okładziny powoduje ona silne pochłanianie dźwięku o małej częstotliwości. Jest to często przyczyną zbyt krótkiego czasu pogłosu w tych pasmach częstotliwości oraz słabego odczuwania basów w salach koncertowych [7]. Wielowarstwowe ciężkie okładziny drewniane były omawiane z architektem, ale ostatecznie zdecydowano się na użycie typowych drobnowymiarowych szklwionych cegieł klinkierowych do stworzenia głębokiego powtarzającego się falistego wzoru na obu ścianach bocznych. Projekt ceglany dyfuzora pokazano na rysunku 3, a ścianę ceglana w sali na fotografii 1. Jak widać, głębokość modulacji kształtu dyfuzora wynosi ok. 35 cm, co powinno zapewnić rozproszenie dźwięku o częstotliwości równej mniej więcej długości fali (ok. 1000 Hz), a zapewne nieco mniejszej. Przesunięcie poszczególnych warstw cegieł o 1/2 szerokości główki cegły pozwoliło na stworzenie bardziej skomplikowanego trójwymiarowego kształtu dyfuzora z zachowaniem takiego samego układu cegieł w każdej warstwie i na wprowadzenie rozproszenia dźwięku nie tylko w płaszczyźnie poziomej, ale również pionowej.

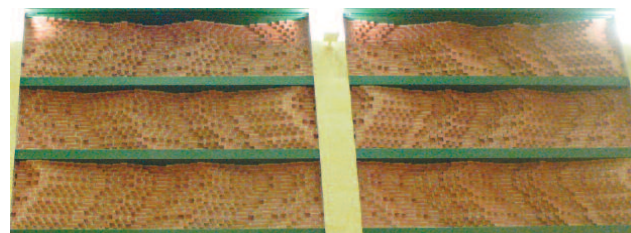
Do oceny właściwości rozproszenia dźwięku dyfuzora wykonano model dwóch modułów ceglanej ściany w skali 1 : 6,25, a następnie przetestowano go w komorze bezchodowej uniwersytetu DTU w Danii (fotografia 2).

Model dyfuzora został wykonany z płyt MDF ciętych laserem. Wybór skali (1 : 6,25 zamiast typowej skali 1 : 5) był związany z możliwością użycia typowych płyt MDF o grubości



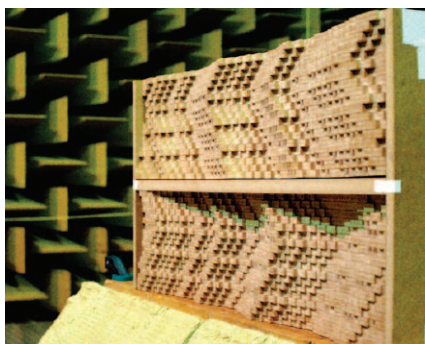
**Rys. 3. Ceglany dyfuzor ścienny: widok (a) i rzut (b)**

*Fig. 3. Brick wall diffuser design: front (a) and plan view (b)*



**Fot. 1. Ceglany dyfuzor ścienny w wykonanej sali**

*Photo 1. Brick wall diffusers in the finished hall*



**Fot. 2. Model ceglano-pleksowego dyfuzora w skali 1 : 6,25 podczas testów w komorze bezekowej (DTU, Lyngby, Dania)**  
 Photo 2. Scale model 1 : 6,25 of brick wall diffuser during tests in anechoic chamber (DTU, Lyngby, Denmark)

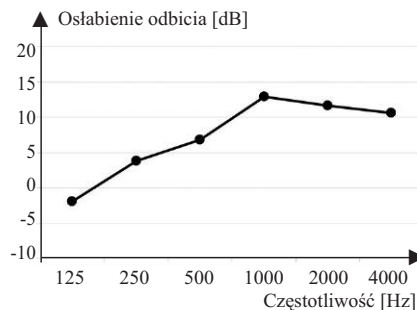
12 mm w celu odzwierciedlenia pojedynczej warstwy cegieł klinkierowych, której grubość wraz ze spoiną wynosi ok. 75 mm (6,25 x 12 mm = 75 mm). Ze względu na fabrycznie gładką powierzchnię lica, zastosowanie płyt MDF nie wymagało konieczności ich lakierowania, co ograniczyło koszty budowy modelu. Model uwzględniał dwa moduły ceglano-pleksowe o wymiarach 520 x 135 cm każdy wykonane w skali 1 : 6,25 z odzwierciedleniem poziomej półki pomiędzy modułami.

**Pomiar** stopnia rozproszenia dźwięku polegał na porównaniu poziomu dźwięku odbitego od dyfuzora do poziomu dźwięku odbitego od płaskiej ściany o takich samych wymiarach jak dyfuzor. Pomiar odbywał się przez emisję sygnału impulsowego ze źródła punkowego (iskrownik), umieszczonego w odległości 4 m od środka próbki, oraz rejestrację odpowiedzi impulsowej przez wstępnie polaryzowany mikrofon wszechkierunkowy ¼ cala wraz z przedwzmacniaczem, umieszczony również w odległości 4 m od środka próbki, podłączony do karty dźwiękowej USB próbkowanej częstotliwością 192 kHz. Po przetworzeniu sygnałów do skali rzeczywistej wyznaczano wartość parametru STearly [11, załącznik C] w poszczególnych pasmach oktaowych (125 – 4000 Hz) w przypadku obu sytuacji pomiarowych (płaska ściana oraz dyfuzor). Następnie wyznaczano różnicę pomiędzy wartościami STearly dotyczącymi obu sytuacji, wyrażoną w dB. Analiza została wykonana przy kilku, z góry zdefiniowanych, kątach padania i odbicia dźwięku (symetryczne 15°, 30°, 45°, 60°, 75° oraz asymetryczne 45°-15°, 45°-30°, 45°-60°, 45°-75°). Im większe jest tłumienie dźwięku odbitego od dyfuzora w porównaniu z odbiciem od płaskiej ściany, tym lepsze właściwości rozpraszające ma badany model dyfuzora.

Wszystkie pomiary zostały wykonane przy użyciu oprogramowania Dirac [8] w zakresie częstotliwości 125 – 4000 Hz (w skali 1 : 1), ale ze względu na rozmiar próbki (520 x 300 cm w skali 1 : 1) można było przypuszczać, że wyniki pasma 125 Hz nie będą bardzo wiarygodne. Wyniki przedstawione na rysunku 4 wykazały silne rozproszenie dźwięku w przypadku częstotliwości pasma oktaowego 500 Hz i wyższej. Podczas oceny nagranych sygnałów audio nie wykryto żadnych słyszalnych zabarwień dźwięku, co pozwoliło na akceptację kształtu dyfuzora.

W ramach dalszych prac sprawdzono parametry dźwiękochłonne dyfuzora. W tym celu najpierw zbadano współczynnik pochłaniania dźwięku modelu dyfuzora wykonanego z gładkiego plexi w skali 1 : 20. Model zbadano w komorze pogłosowej do badań w skali, znajdującej się w Katedrze Fizyki Budowli i Budownictwa Ogólnego Politechniki Krakowskiej (fotografia 3). Zmierzone współczynniki pochłaniania dyfu-

zora w skali 1 : 20 (tabela, wiersz 1) pokazały ryzyko wystąpienia zbyt dużej wartości współczynników pochłaniania dźwięku w pasmach 500 – 2000 Hz, co było niewskazane z punktu widzenia akustyki sali. W związku z tym, że model dyfuzora w skali 1 : 20 wyko-



**Rys. 4. Średnia wartość osłabienia odbicia dźwięku w przypadku kątów padania/odbicia 15/30/45/60/75°**

Fig. 4. Average reflection attenuation for incidence/reflection angles 15/30/45/60/75°



**Fot. 3. Komora pogłosowa do badań modelu w skali 1 : 20 z próbką modelu widowni sali, przygotowaną do badania współczynnika pochłaniania dźwięku**

Photo 3. Scale model reverberation chamber 1 : 20 with audience sample prepared for sound abs. test.

### Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku ceglano-pleksowego dyfuzora

Results of measurements of sound absorption coefficient of brick diffuser

Opis dyfuzora	Częstotliwość					
	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1 [kHz]	2 [kHz]	4 [kHz]
Dyfuzor wykonany w skali 1:20 (2 moduły wykonane z plexi, laboratorium PK)	0,12	0,20	0,32	0,41	0,30	–
Dyfuzor ceglany (wymiar rzeczywisty, 1 moduł, laboratorium ITB)	0,25	0,27	0,30	0,31	0,32	0,24
Dyfuzor ceglany, malowany (wymiar rzeczywisty, 1 moduł, laboratorium ITB)	0,16	0,33	0,27	0,28	0,30	0,31

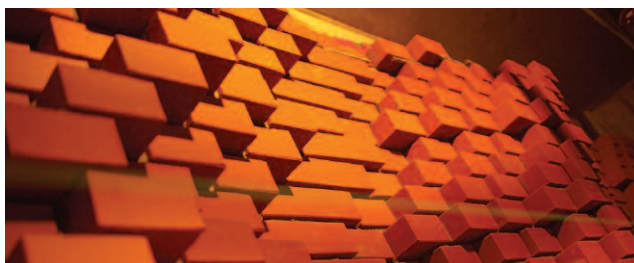
nano z gładkiego i twardego materiału (plexi), takie pochłanianie nie mogło być efektem porowatości próbki. Przypuszczamy, że pochłanianie jest efektem zjawisk rezonansowych, które mogą występować pomiędzy wystającymi elementami dyfuzora (wystające cegły), czemu sprzyjać może dodatkowo powtarzalność kształtu i wymiarów pojedynczej cegły oraz fakt, że wszystkie ścianki cegły są do siebie wzajemnie równoległe. Zagadnienie to wymaga dalszych badań. Ponadmiarowe pochłanianie w przypadku średnich częstotliwości potwierdzono również w badaniach na modelu wnętrza całej sali w skali 1 : 20, gdzie pokrycie ścian bocznych ceglano-pleksowymi dyfuzorami wyraźnie skracało czas pogłosu w pasmach 500 – 2000 Hz [2].

Następnie zbudowano prototyp jednego modułu dyfuzora w rzeczywistych rozmiarach 520 x 135 cm (fotografia 4). Ze względu na dużą powierzchnię nieszkliwionych powierzchni cegieł (dół i góra), co obrazuje fotografia 5, oraz możliwe duże pochłanianie elementów ceramicznych, połączonych typową chropowatą zaprawą cementową, przy dużej częstotliwości, prototyp ceglanej ściany w skali 1 : 1 ze spoinami wypełnionymi zaprawą cementową został przebadany w zakresie pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej w Instytucie Techniki Budowlanej (ITB) [9]. Przygotowanie próbki i dostarczenie jej do laboratorium było dość trudne ze względu na wagę i wymiary. Ostatecznie, próbkę przygotowano w pięciu indywidualnych sekcjach ważących ponad 1,7 tony każda, z indywidualnymi punktami do podwieszania i transportu. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania (tabela, wiersze 2 i 3) potwierdziły duże – jak na cegłę pełną – pochłanianie na poziomie 0,25 – 0,3 w zakresie pasm 1 – 4 kHz. Próba lakierowania powierzchni pokrytych zaprawą nie przyniosła jednak potwierdzenia wyników badań dotyczących redukcji współczynników pochłaniania. W związku z tym, wszystkie spoiny pomiędzy ceglami w istniejącej sali zostały wykończone jedynie gęstą i gładką zaprawą, bez dodatkowego ich lakierowania.



**Fot. 4. Prototyp pojedynczego modułu ceglano dyfuzora (520 x 135 cm) podczas przygotowywania do badań współczynnika pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej w ITB**

*Photo 4. Brick wall diffuser single module prototype (520 x 135 cm) during preparation for sound absorption tests in reverberation chamber in ITB*



**Fot. 5. Detal ceglano dyfuzora podczas montażu w sali**

*Photo 5. Detail of brick wall diffuser during construction in hall*

Należy podkreślić, że zmierzone w komorze pogłosowej ITB duże współczynniki pochłaniania dźwięku w małych częstotliwościach wynikają zapewne z geometrii próbki i jej wymiarów oraz metody pomiarowej [10]. Wstawienie tak dużej próbki oraz ustawienie jej w pionie (nie było innej możliwości) wprowadziło zapewne zbyt mocne rozproszenie dźwięku w zakresie ma-

łych częstotliwości w dolnej części komory w stosunku do komory pustej. Na wyniki pochłaniania dźwięku należy więc patrzeć ostrożnie i uwzględniać wpływ warunków pomiaru.

### Podsumowanie

1. Analizy wnętrza sal koncertowych wykonane na modelach w skali, jak i na modelach komputerowych są nieodzownymi narzędziami w pracy projektanta akustyki, gdyż wzajemnie się uzupełniają. Analizy komputerowe pozwalają na ocenę wpływu chłonności materiałów na czas pogłosu i inne parametry jakości akustycznej sali, podczas gdy analizy na modelach w skali pozwalają na ocenę wpływu zjawisk falowych (rozproszenie dźwięku, ugięcie fali, rezonans), które nie są w pełni uwzględnione w modelach komputerowych.

2. Duża liczba dyfuzorów efektywnie rozpraszających dźwięk może silnie wpływać na czas pogłosu skracając go, pomimo że dyfuzory zbudowano wyłącznie z twardych i odbijających dźwięk materiałów.

3. Powtarzalne elementy geometryczne wykorzystane w dyfuzorach, pomimo ich pozornie płynnego kształtu (jak opisana w artykule ściana z cegły klinkierowej), mogą powodować zjawiska rezonansowe odpowiedzialne za nadmierne pochłanianie dźwięku w wąskich pasmach częstotliwości. Podobne problemy występują przy stosowanych popularnie dyfuzorach Schroedera. Należy mieć ten aspekt na uwadze przy projektowaniu elementów rozpraszających, szczególnie przeznaczonych do sal koncertowych.

Kompozytor i dyrygent, **prof. Krzysztof Penderecki** został zaproszony na koncert inauguracyjny w nowej sali swojego imienia. Po ocenie jakości akustyki pustej i wypełnionej widzami sali oraz po dyrygowaniu na scenie powiedział: *To jest bardzo udana akustyka. Rzadko zdarza się, aby sale koncertowe w Polsce charakteryzowały się od samego początku tak dobrym dźwiękiem. Gratulacje!*

### Literatura

- [1] Klosak AK, Gade AC. The Penderecki Concert Hall in Radom, Poland: Acoustic Design and Performance, Proceedings of the IOA Auditorium Acoustics, Dublin, Ireland, 20-22 may (2011).
- [2] Klosak AK, Gade AC. Acoustic design and performance of 500 seats Penderecki concert hall in Radom, Poland, Proceedings of the 7th Forum Acusticum, Kraków 7-12 September 2014.
- [3] Barron M, Marshall AH. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure, *J. Sound Vib.* 1981; 77 (2): 211 – 232.
- [4] Barron M. Measured early lateral energy fractions in concert halls and opera houses. *J. Sound Vib.* 2000; 232 (1): 79 – 100.
- [5] Gade AC. The influence of basic design variables on the acoustics of concert halls; new results derived from analysing a large number of existing halls, Proc. of IOA Meeting. 1997; Vol. 19, Part 3, 95 – 102. Belfast, Northern Ireland.
- [6] Haan CH. Geometry as a measure of the acoustic quality of auditoria, PhD thesis, Sydney Univ. 1993.
- [7] Maekawa Z, Rindel JH, Lord P. Environmental and Architectural Acoustics, Spon Press, London. 2011.
- [8] Dirac, oprogramowanie, wersja v4, v5, v6; [www.acoustics-engineering.com](http://www.acoustics-engineering.com).
- [9] Raport z badań współczynnika pochłaniania dźwięku ściany ceglanej. 2009; ITB.
- [10] PN EN ISO 3382-1 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 1: Pomieszczenia specjalne. 2009.

*Przyjęto do druku: 07.08.2023 r.*