

prof. dr hab. inż. Władysław Gardziejczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-9130-3773

dr inż. Marek Motylewicz^{1)*}

ORCID: 0000-0002-2702-9829

mgr inż. Mariusz Sakowski²⁾

Ocena właściwości akustycznych warstwy ścieralnej z asfaltu porowatego nawierzchni drogowych w warunkach laboratoryjnych

Evaluation of acoustic properties of porous asphalt wearing course of a road pavements under laboratory conditions

DOI: 10.15199/33.2024.06.07

Streszczenie. Zastosowanie asfaltu porowatego w warstwie ścieralnej nawierzchni drogowej istotnie wpływa na obniżenie poziomu hałasu opona/nawierzchnia. Parametrami charakteryzującymi właściwości akustyczne warstwy ścieralnej są współczynnik pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalność. W artykule przedstawiono analizę wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku oraz wodoprzepuszczalności mieszanek z asfaltu porowatego. Stwierdzono istotny wpływ zawartości wolnych przestrzeni w mieszance na wartości badanych parametrów.

Słowa kluczowe: asfalt porowaty; współczynnik pochłaniania; wodoprzepuszczalność; zawartość wolnych przestrzeni.

Abstract. The use of porous asphalt in the wearing course of a road pavement has a significant effect on reducing tyre/road noise levels. The parameters characterising the acoustic properties of the wearing course are sound absorption coefficient and water permeability. This paper presents an analysis of the results of a study of the sound absorption coefficient and water permeability of porous asphalt mixtures. A significant influence of the air voids content of the mixture on the values of the parameters studied was found.

Keywords: porous asphalt; sound absorption coefficient; water permeability; air void content.

Poprawa klimatu akustycznego w otoczeniu tras drogowych wymaga m.in. budowy nawierzchni o obniżonej hałaśliwości. Zastosowanie asfaltu porowatego w warstwie ścieralnej przyczynia się do redukcji poziomu hałasu opona/nawierzchnia nawet o 6 dB (A) [1, 2]. Ważną informacją na etapie doboru konstrukcji nawierzchni mogą być wyniki badań współczynnika pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności jako parametrów decydujących o właściwościach akustycznych mieszanek mineralno-asfaltowych. Współczynnik pochłaniania dźwięku α określa skuteczność pochłaniania przez materiał padającej na niego fali dźwiękowej. Przyjmuje on wartości z przedziału $0 \div 1$, gdzie: 0 – całkowite odbicie fali dźwiękowej, a 1 – całkowite jej pochłanianie.

Nawierzchnie charakteryzujące się dużym współczynnikiem pochłaniania dźwięku istotnie redukują wielkość emi-

sji hałasu toczenia opon po nawierzchni, który jest główną i największą składową całkowitej emisji hałasu samochodowego w przypadku prędkości powyżej 50 km/h. W związku z tym, że największe wartości poziomu hałasu toczenia się opon samochodowych po nawierzchni występują w zakresie częstotliwości środkowych pasm 1/3 oktaowych 630 Hz \div 1250 Hz zaleca się, aby analizować je w takim zakresie [2].

Metody pomiaru

Najbardziej znaną metodą pomiaru i oceny współczynnika pochłaniania dźwięku materiałów budowlanych w warunkach laboratoryjnych jest **metoda wskaźnika fali stojącej z wykorzystaniem rury Kundta** [3]. W badaniu używa się dwóch rur impedancyjnych o średnicy wewnętrznej $\varnothing 100$ mm i $\varnothing 30$ mm, sondy mikrofonowej, generatora akustycznego umożliwiającego uzyskanie fali stojącej oraz dwóch filtrów tercjowo-oktaowych na wyjściu mikrofonu w celu zwiększenia dokładności pomiaru. Badanie polega na umieszczeniu próbki w pojemniku, ustaleniu ciśnienia akustycznego

w strzałkach i węzłach fali stojącej oraz obliczeniu współczynnika pochłaniania dźwięku.

Pewną modyfikacją metody rury Kundta jest tzw. **metoda dwumikrofonowa** z zastosowaniem funkcji przejścia opisana w normie ISO 10534-2:1998 [4]. Do pomiarów używa się dwóch mikrofonów zamontowanych w ścianie rury impedancyjnej w odległości L i s od badanej próbki. Przez zmianę odległości s pomiędzy dwoma mikrofonami pomiarowymi i/lub zmianę średnicy rury można wpływać na zakres częstotliwości, w jakich wykonuje się pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku [5]. Podobnie jak w metodzie wskaźnika fali stojącej należy zwrócić uwagę na dopasowanie i uszczelnienie badanej próbki do wnętrza rury impedancyjnej [6]. Zaletą tej metody jest szybkość oraz łatwość wykonania badań i dlatego znalazła ona zastosowanie również w pomiarach *in situ* współczynnika absorpcji dźwięku nawierzchni drogowych wg ISO 13472-2:2010 [7].

W związku z prowadzeniem pomiaru w pozycji pionowej, ustalonym zakresem częstotliwości w przypadku na-

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

²⁾ Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Handlowe „MELIOREX” Sp. z o.o.

* Adres do korespondencji: m.motylewicz@pb.edu.pl

wierzchni drogowych 250 ÷ 1600 Hz oraz wymaganiem dotyczącym wytworzenia fali płaskiej w ruchu, wprowadzono stałe wymiary urządzenia: średnica rury 100 mm, a odległość pomiędzy parą mikrofonów $s = 81 \pm 4$ mm. Mikrofon położony bliżej nawierzchni drogi powinien znajdować się od niej w odległości $L \geq 100$ mm, a referencyjny – w odległości większej od trzech średnic rury (300 mm). Metoda *in situ* jest przeznaczona do badania gładkich nawierzchni głównie o współczynniku absorpcji dźwięku nieprzekraczającym 0,15 i zgodnie z normą ISO 10844 [8].

Na fotografii 1 pokazano pomiary na nawierzchni w warunkach *in situ*. System składa się z rury ACUPAVE z uchwytami, źródła dźwięku JBL 2426K z gwintowaną płytą montażową, mikrofonów 1/2 cala i uchwytów, elementów mocujących do podłoża, modułu DT9837A akwizycji i przetwarzania danych oraz oprogramowania ACUPAVE [9]. Spec-



Fot. 1. Spectronics ACUPAVE System – pomiar na nawierzchni drogowej
Photo 1. Spectronics ACUPAVE System – measurement on the road surface

tronics ACUPAVE System może być stosowany również w badaniach laboratoryjnych próbek [6, 10 ÷ 12]. W Politechnice Białostockiej wykonano przystawkę do rury cylindrycznej Systemu ACUPAVE umożliwiającą badania współczynnika dźwięku w zakresie częstotliwości 315 ÷ 1600 Hz w warunkach laboratoryjnych wg metody dwumikrofonowej [4]. Stanowisko pomiarowe składało się z urządzenia Spectronics ACUPAVE System połączonego z przystawką, którą stanowi rura pozioma o średnicy 100 mm, wewnątrz której umieszcza się badaną próbkę (fotografia 2). Na zewnątrz rury znajduje się podziałka milimetrowa, która ustala położenie metalowego tłka zależnie od wysokości badanej próbki. Pozycja



Fot. 2. Spectronics ACUPAVE System z przystawką – pomiar w laboratorium

Photo 2. Spectronics ACUPAVE System with attachment – measurement in the laboratory

„0” tłka oznacza, że pomiędzy badaną powierzchnią próbki a mikrofonem nr 2 odległość L wynosi 107,95 mm zgodnie z normą ISO 10534-2:1998 [4].

W celu oceny poprawności działania zestawu pomiarowego oraz wiarygodności prowadzonych badań przetestowano system w warunkach laboratoryjnych, zgodnie z zaleceniami [13]. Wykonano pomiar hipotetycznej impedancji rury zamkniętej o długości L_0 i porównano ją z wynikami obliczeń. Na rysunku 1 przedstawiono zmierzone i obliczone wartości impedancji rury stosowanej podczas pomiarów w przypadku $L_0 = 15$ cm. Potwierdzono dobrą zgodność, co oznacza, że system pomiarowy został dobrze skonfigurowany.

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych przeprowadzono analizę porównawczą wyników współczynnika pochłaniania dźwięku próbek walcowych z asfaltu porowatego o wysokości $h = 3$ cm (W1 i W2) oraz $h = 5$ cm (W3 i W4) uzyskanych w Spectronics ACUPAVE System z przystawką (SA; Politechnika Białostocka) i w ruchu Kundta (RK; Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława

Staszica w Krakowie). Wyniki przedstawione w tabeli 1 i na rysunku 2 potwierdziły dobrą zgodność. Stanowiło to podstawę do badania współczynnika pochłaniania dźwięku na próbkach z asfaltu porowatego w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem Spectronics ACUPAVE System z przystawką.

Wodoprzepuszczalność pionową i poziomą określa się wg normy PN-EN 12697-19:2020-07 [14]. Badanie polega na obciążeniu cylindrycznych próbek walcowych słupem wody o stałej wysokości 300 ± 1 mm oraz zmierzeniu ilości wody, która przesączy się przez próbkę w kierunku pionowym lub poziomym w odmierzonej czasie.

Wodoprzepuszczalność pionową K_v (m/s) oblicza się zgodnie ze wzorem Darcy:

$$K_v = \frac{4 \cdot Q_v \cdot l}{h \cdot \pi \cdot D^2} \quad [\text{m/s}]$$

gdzie:

Q_v – pionowy przepływ wody przez próbkę [m^3/s];
 l – grubość próbki [m]; D – średnica próbki [m];
 h – bieżąca wysokość słupa wody (w badaniu wodoprzepuszczalności pionowej) [m].

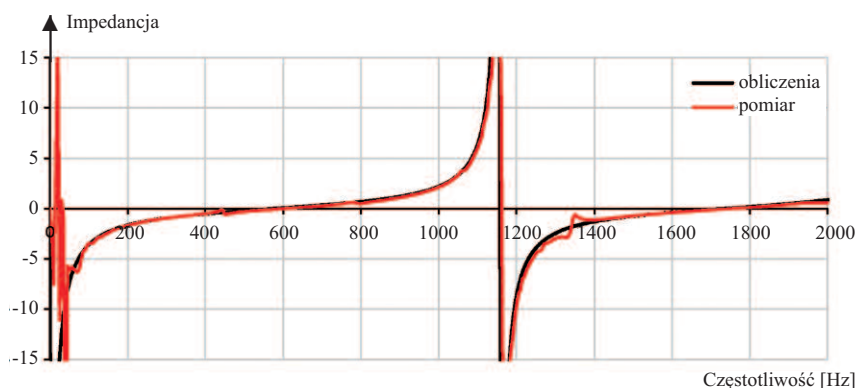
Wodoprzepuszczalność poziomą K_h próbki określa się wg zmodyfikowanego wzoru Darcy:

$$K_h = \frac{Q_h \cdot l}{0,3 \cdot (\pi \cdot D \cdot l)} \quad [\text{m/s}]$$

gdzie:

Q_h – poziomy przepływ wody przez próbkę [m^3/s];
 l – grubość próbki [m]; D – średnica próbki [m].

Wodoprzepuszczalność pionowa nawierzchni porowatych wg [14] wynosi $0,5 \cdot 10^{-3} \div 3,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

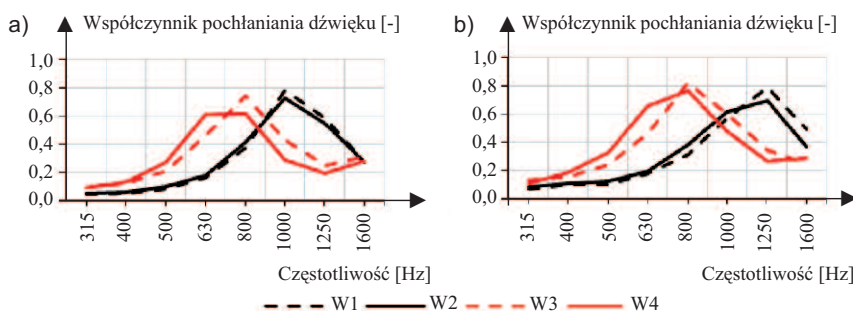


Rys. 1. Wyniki testu potwierdzającego poprawność działania zestawu pomiarowego
Fig. 1. Results of the validation test of the measuring set

Tabela 1. Wartości współczynnika pochłaniania dźwięku w badaniach rurą Kundta (RK) i Spectronics ACUPAVE System (SA)

Table 1. Sound absorption coefficient values according to Kundttube (RK) and Spectronics ACUPAVE System (SA) tests

Próbka	Aparatura badawcza	Współczynnik pochłaniania dźwięku w przypadku częstotliwości:							
		315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
W1 h = 3 cm	SA	0,04	0,05	0,08	0,16	0,37	0,78	0,58	0,27
	RK	0,07	0,10	0,10	0,18	0,31	0,57	0,79	0,49
W2 h = 3 cm	SA	0,05	0,06	0,10	0,18	0,41	0,73	0,55	0,27
	RK	0,08	0,10	0,12	0,19	0,38	0,62	0,70	0,37
W3 h = 5 cm	SA	0,09	0,12	0,21	0,46	0,74	0,43	0,25	0,31
	RK	0,13	0,15	0,24	0,46	0,82	0,60	0,34	0,25
W4 h = 5 cm	SA	0,09	0,13	0,27	0,61	0,62	0,29	0,19	0,28
	RK	0,11	0,19	0,33	0,66	0,77	0,48	0,27	0,29



Rys. 2. Współczynniki pochłaniania dźwięku: a) SA; b) RK; (kolor czarny: h = 3 cm, kolor czerwony: h = 5 cm)

Fig. 2. Sound absorption coefficients: a) SA; b) RK; (black colour: h = 3 cm, red colour: h = 5 cm)

Badania i ich analiza

Badania współczynnika pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności pionowej wykonano na mieszankach mineralno-asfaltowych typu asfalt porowaty PA5 i PA8 w laboratorium drogowym w Politechnice Białostockiej. W przypadku asfaltu porowatego PA5 badano mieszanki o następującej zawartości wolnych przestrzeni: 26,3% (PA5a); 24,4% (PA5b); 21,2% (PA5c) i 15,8% (PA5d), a w przypadku PA8: 29,1% (PA8a); 25,4% (PA8b); 20,9% (PA8c) i 16,8% (PA8d). Badane mieszanki zawierały asfalt PBM45/80-65 w ilości 5,7% ÷ 6,4% oraz środek stabilizujący na bazie włókien celulozowych w ilości 0,5% masy całego zarobu.

Badania współczynnika pochłaniania dźwięku wykonano z wykorzystaniem Spectronics ACUPAVE System z przystawką. Po kalibracji zestawu pomiarowego próbkę umieszczano w rurze impedancyjnej, odpowiednio uszczelniano i wykonywano pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku. W przypadku każdej mieszanki pomiaru współczynnika dokonywano na 3 próbkach walco-

wych o średnicy D = 100 mm i wysokości h = 4 cm. Wyniki analizy wartości współczynnika pochłaniania dźwięku w zależności od częstotliwości pasma dźwięku i typu mieszanki mineralno-asfaltowej pokazano w tabeli 2.

Tabela 2. Średnie wartości współczynnika pochłaniania dźwięku poszczególnych typów mieszanek PA5 i PA8

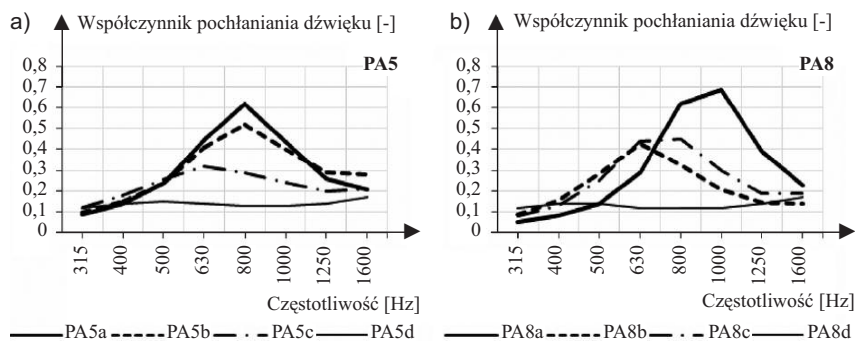
Table 2. Average sound absorption coefficient values of individual PA5 and PA8 mix types

Typ MMA	Współczynnik pochłaniania dźwięku ± odchylenie standardowe [-] (współczynnik zmienności) w przypadku częstotliwości:							
	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
PA5a	0,09±0,00 (5,1%)	0,14±0,01 (6,9%)	0,24±0,02 (10,0%)	0,45±0,02 (4,8%)	0,62±0,05 (8,8%)	0,44±0,06 (14,7%)	0,26±0,02 (9,0%)	0,21±0,00 (2,2%)
PA5b	0,10±0,01 (9,8%)	0,15±0,01 (9,4%)	0,24±0,00 (0,0%)	0,41±0,05 (13,4%)	0,52±0,12 (22,8%)	0,40±0,05 (12,7%)	0,29±0,03 (8,9%)	0,28±0,09 (32,9%)
PA5c	0,12±0,02 (17,6%)	0,18±0,02 (12,0%)	0,26±0,02 (6,3%)	0,32±0,05 (17,2%)	0,29±0,06 (20,1%)	0,24±0,03 (13,9%)	0,20±0,02 (9,6%)	0,21±0,01 (5,8%)
PA5d	0,12±0,04 (36,0%)	0,14±0,06 (40,4%)	0,15±0,06 (38,1%)	0,14±0,05 (36,4%)	0,13±0,05 (35,0%)	0,13±0,03 (25,1%)	0,13±0,03 (24,7%)	0,14±0,05 (38,2%)
PA8a	0,05±0,00 (0,0%)	0,08±0,01 (10,2%)	0,14±0,02 (12,4%)	0,29±0,03 (10,8%)	0,62±0,00 (0,8%)	0,69±0,07 (10,4%)	0,39±0,03 (7,5%)	0,23±0,01 (5,3%)
PA8b	0,09±0,02 (19,6%)	0,16±0,03 (21,1%)	0,29±0,04 (14,0%)	0,43±0,09 (20,1%)	0,33±0,11 (33,3%)	0,21±0,06 (27,7%)	0,15±0,02 (11,1%)	0,14±0,02 (11,7%)
PA8c	0,08±0,00 (6,1%)	0,13±0,01 (9,8%)	0,25±0,03 (13,8%)	0,44±0,04 (8,7%)	0,45±0,00 (1,0%)	0,30±0,03 (10,9%)	0,19±0,02 (8,8%)	0,19±0,02 (11,0%)
PA8d	0,12±0,02 (18,0%)	0,14±0,04 (32,9%)	0,14±0,06 (42,0%)	0,12±0,04 (29,9%)	0,12±0,02 (13,6%)	0,12±0,02 (20,2%)	0,14±0,03 (21,0%)	0,17±0,03 (18,5%)

Na rysunku 3 porównano wartości współczynników pochłaniania dźwięku określonych na mieszankach PA5 i PA8 w zależności od zawartości wolnych przestrzeni i częstotliwości dźwięku.

Wyniki przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 3 potwierdziły, że zdolność mieszanek do tłumienia hałasu jest tym większa, im większa jest zawartość wolnych przestrzeni. Mieszaną o największej zdolności absorpcji dźwięku w zakresie częstotliwości 630 ÷ 1000 Hz okazała się oznaczona jako PA8a charakteryzująca się największą zawartością wolnych przestrzeni (29,1%), a kolejną mieszaną PA5a (26,3%). Z mieszanek o zbliżonej zawartości wolnych przestrzeni (PA5a, PA5b i PA8b) większy współczynnik pochłaniania dźwięku wykazały mieszanki PA5. W przypadku mieszanek PA5 i PA8 o zawartości wolnych przestrzeni odpowiednio 15,8 i 16,8% uzyskano zdecydowanie najmniejsze współczynniki pochłaniania dźwięku (< 0,2). Oznacza to, że zawartość wolnych przestrzeni w mieszance ma istotny wpływ na wartość współczynnika pochłaniania dźwięku. Nie wykazano jednoznacznego wpływu maksymalnego uziarnienia kruszywa na ten współczynnik.

Wodoprzepuszczalność pionową mieszanek z asfaltu porowatego badano na próbkach poddanych wcześniej ocenie współczynnika pochłaniania dźwięku.



Rys. 3. Współczynniki pochłaniania dźwięku ustalone na mieszankach: a) PA5; b) PA8
 Fig. 3. Sound absorption coefficients determined for: a) PA5; b) PA8 mix types

W tabeli 3 podano wartości współczynnika K_v . Wyróżniono mieszanki, których wyniki są zbliżone do wartości granicznych nawierzchni o dobrych właściwościach drenażowych.

Uzyskane współczynniki wodoprzepuszczalności pionowej K_v potwierdziły istotny wpływ zawartości wolnych

Tabela 3. Wodoprzepuszczalność mieszanek z asfaltu porowatego

Table 3. Water permeability of porous asphalt mixtures

Typ MMA	Nr próbki	KV [m/s]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni ± odchylenie standardowe [%]
Próbki 5A5			
PA5a	1	1,16E-03	26,3±0,1
	2	1,30E-03	
	3	0,88E-03	
PA5b	1	0,96E-03	24,4±0,2
	2	0,95E-03	
	3	0,60E-03	
PA5c	1	3,57E-04	21,2±0,1
	2	3,42E-04	
	3	1,75E-04	
PA5d	1	4,68E-05	15,8±0,0
	2	9,07E-05	
	3	1,02E-05	
Próbki 5A8			
PA8a	1	2,98E-03	29,1±0,4
	2	3,27E-03	
	3	2,13E-03	
PA8b	1	1,44E-03	25,4±0,7
	2	7,36E-04	
	3	1,09E-03	
PA8c	1	1,06E-03	20,9±0,8
	2	1,09E-03	
	3	1,01E-03	
PA8d	1	3,23E-04	16,8±0,5
	2	9,68E-05	
	3	1,83E-04	

przestrzeni w mieszance z asfaltu porowatego na jego wartość. Korzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia wodoprzepuszczalności okazały się mieszanki typu PA8, które przy zawartości wolnych przestrzeni powyżej 20% można uznać za dobre pod względem właściwości drenażowych. W przypadku mieszanki PA5 korzystnymi właściwościami drenażowymi charakteryzowały się te o zawartości wolnych przestrzeni powyżej 24%.

Podsumowanie

Wybór warstwy ścieralnej konstrukcji nawierzchni ma duże znaczenie z punktu widzenia obniżenia poziomu dźwięków emitowanych od ruchu samochodowego. Ocena współczynnika pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych pozwoli ocenić ich właściwości akustyczne. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły istotny wpływ zawartości wolnych przestrzeni na współczynnik pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalność mieszanki z asfaltu porowatego.

W przypadku mieszanek PA5 i PA8 o zbliżonej zawartości wolnych przestrzeni większe wartości współczynnika pochłaniania dźwięku zanotowano w przypadku mieszanki PA5. Wyniki badań potwierdziły, że przy zawartości wolnych przestrzeni w mieszankach poniżej 20% współczynniki pochłaniania dźwięku przyjmowały wartości poniżej 0,20.

Ustalono, że korzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia wodoprzepuszczalności są mieszanki typu PA8 w porównaniu z PA5, ponieważ przy zawartości wolnych przestrzeni powy-

żej 20% charakteryzują się dobrymi właściwościami drenażowymi. Dobre właściwości drenażowe mieszanki PA5 uzyskano w przypadku zawartości wolnych przestrzeni powyżej 24%.

Literatura

[1] Sandberg U, Ejsmont JA. Tyre/noise reference book. Sveden:Informex; 2002.
 [2] Gardziejczyk W. Hałaśliwość nawierzchni drogowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. Białystok; 2018.
 [3] ISO 10534-1:1996. Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio.
 [4] ISO 10534-2:1998. Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method.
 [5] Knabben RM, Trichês G, Gerges SNY, Vergara EF. Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures. Appl. Acoust. 2016; https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.008.
 [6] Vissamraju K. Measurement of absorption coefficient of road surfaces using impedance tube method. Masters Thesis. Alabama: Auburn University; 2005.
 [7] ISO 13472-2:2010. Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 2: Spot method for reflective surfaces.
 [8] ISO 10844:2021. Acoustics. Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres.
 [9] ACUPAVE user’s manual. Measurement of sound absorption of pavements. Spectronics Inc.; 2013.
 [10] Li M, van Keulen W, Tijs E, van de Ven M, Molenaar A. Sound absorption measurement of road surface with in situ technology. Appl. Acoust. 2015; https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.009.
 [11] Wolkesson M. Evaluation of impedance tube methods – A two microphone in-situ method for road surfaces and the three microphone transfer function method for porous materials. Masters Thesis. Göteborg: Chalmers University of Technology; 2013.
 [12] Gardziejczyk W, Jaskula P, Ejsmont JA, Motylewicz M, Stienss M, Mioduszewski P, Gierasimiuk P, Zawadzki M. Investigation of Acoustic Properties of Poroelastic Asphalt Mixtures in Laboratory and Field Conditions. Materials. 2021; https://doi.org/10.3390/ma14102649.
 [13] Seybert AF. Notes on absorption and impedance measurements. Lexington: University of Kentucky; 2010.
 [14] PN-EN 12697-19:2020-07. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań. Część 19: Wodoprzepuszczalność próbek.

Badania i analizy wykonano w ramach realizacji pracy własnej zespołowej nr WZ/WB-III/7/2023 prowadzonej w Politechnice Białostockiej.

Przyjęto do druku: 15.05.2024 r.