

Załącznik nr 2

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

TOMASZ G. ZIELIŃSKI

Spis treści

1	Imię i Nazwisko	2
2	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	2
3	Informacje o pracy zawodowej	2
3.1	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
3.2	Informacje o pracy w zagranicznych ośrodkach naukowo-badawczych	2
3.3	Informacje o pracy zawodowej niezwiązanej bezpośrednio z pracą badawczą	3
4	Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki	3
4.1	Tematyczny cykl publikacji	3
4.2	Omówienie cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe	4
4.2.1	Wstęp	4
4.2.2	Modele i parametry modelowe dźwiękochłonnych ośrodków porowatych	6
4.2.3	Związek pomiędzy geometrią mikrostruktury ośrodka porowatego, a propagacją i pochłanianiem fal akustycznych	7
4.2.4	Identyfikacja odwrotna parametrów mikrostruktury dźwiękochłonnych materiałów porowatych	12
4.2.5	Propagacja i pochłanianie dźwięku w materiałach i aktywnych kompozytach porospierzystych	15
4.2.6	Podsumowanie	18
5	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	19
5.1	Ewolucja zainteresowań i kompetencji naukowych	19
5.2	Dorobek publikacyjny w czasopismach z bazy JCR, po uzyskaniu stopnia doktora i spoza cyklu habilitacyjnego	20
5.3	Praca dydaktyczna i popularyzatorska	23
5.4	Promotorstwo i opieka naukowa	25
5.5	Recenzowanie i członkostwo w towarzystwach naukowych	25
5.6	Udział w projektach badawczych i badawczo-rozwojowych	25
5.7	Uczestnictwo w konferencjach międzynarodowych	26
5.8	Liczba publikacji w czasopismach z bazy JCR oraz indeksowanych przez <i>Web of Science</i> , sumaryczny <i>Impact Factor</i> i liczba cytowań, sumaryczna punktacja MNiSW	27
6	Publikacje naukowe	28
6.1	Artykuły z listy <i>Web of Science</i>	28
6.1.1	Artykuły w czasopismach z bazy JCR	28
6.1.2	Pozostałe artykuły indeksowane przez <i>Web of Science</i>	29
6.2	Publikacje w książkach i monografiach	30
6.3	Pozostałe wybrane publikacje	30

1 Imię i Nazwisko

TOMASZ G. ZIELIŃSKI

2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

1998: tytuł **magistra inżyniera** budownictwa uzyskany na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w Warszawie, po obronie pracy magisterskiej pt.: *Nosność graniczna żelbetowych zbiorników walcowych*; specjalizacja: Teoria Konstrukcji; promotor: prof. dr hab. inż. Wiesław Wojewódzki.

2004: stopień **doktora nauk technicznych** (dyscyplina budownictwo) uzyskany w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie; tytuł rozprawy doktorskiej: *Metoda Impulsowych Dystorsji Wirtualnych z zastosowaniem do modelowania i identyfikacji defektów w konstrukcjach*; promotor: prof. dr hab. inż. Jan Holnicki-Szulc.

3 Informacje o pracy zawodowej

3.1 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1999–2003: doktorant w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk (IPPT PAN) w Warszawie.

2003–2004: asystent w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

2004–2013: adiunkt w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

od 2014: pracownik na stanowisku główny specjalista w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

3.2 Informacje o pracy w zagranicznych ośrodkach naukowo-badawczych

1999: miesięczny staż w *University of Tennessee* w Knoxville (USA) – w ramach projektu wynikającego ze współpracy pomiędzy polskim Narodowym Centrum Nauki (NCN), a amerykańską *National Science Foundation* (NSF).

2003: dwumiesięczny staż naukowy w Laboratorium Trybologii i Dynamiki Systemów (*Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes*), w *Ecole Centrale de Lyon* w Ecully (k. Lyonu), we Francji.

2004–2006: półtoraroczny staż po-doktorancki i praca naukowa w *Ecole Centrale de Lyon* w Ecully/Lyon, we Francji. Praca badawcza w Centrum Akustycznym Laboratorium Mechaniki Płynów i Akustyki (*Centre Acoustique, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique*). Udział we francuskim projekcie badawczym CAHPAC – *Capotage Acoustique Hybride Passif/Actif*.

2012: czteromiesięczna praca badawcza we Francji jako ekspert/naukowiec wizytujący na zaproszenie *Centre Lyonnais d'Acoustique, Université de Lyon* oraz *Ecole Centrale de Lyon*. Udział we francuskim projekcie badawczym dotyczącym sterowania mikroprzepływami (*Microfluidics*). Temat pracy badawczej: *Surface Acoustic Waves in Piezoelectric Media – an Application to Acoustofluidics*.

2014: pięciomiesięczny pobyt i praca w dziale badawczo-rozwojowym firmy *CEDRAT Technologies* w Meylan (koło Grenoble) we Francji, w ramach współpracy badawczej w projekcie EU SMART-NEST. Zadanie badawcze: opracowanie i implementacja strategii wyciszenia silniczków piezoelektrycznych¹.

2015: czteromiesięczny pobyt i praca w dziale badawczo-rozwojowym firmy *I-Deal Technologies GmbH* w Saarbrücken w Niemczech, w ramach współpracy badawczej w projekcie EU SMART-NEST.

¹Załączam dokument poświadczający wykonanie ekspertyz i opracowanie strategii redukcji hałasu, wystawiony przez *CEDRAT Technologies*.

3.3 Informacje o pracy zawodowej niezwiązanej bezpośrednio z pracą badawczą

1996–2001: praca jako **inżynier konstrukcji budowlanych** (na stanowisku: **asystent głównego konstruktora**) kolejno w dwóch współpracujących ze sobą przedsiębiorstwach architektoniczno-konstrukcyjnych (*Danprojekt Sp. z o. o.* oraz *TOP Development Sp. z o. o.*), **od roku 1999 na pół etatu** w związku z rozpoczęciem równoległe pracy naukowej w IPPT PAN.

2000–2002: praca dla Oficyny Wydawniczej IPPT PAN. Główne zadania: skład w systemie \LaTeX wydawnictw IPPT PAN, tworzenie klas dokumentowych i pakietów \LaTeX dla czasopism wydawanych przez IPPT PAN, stworzenie i uaktualnianie stron internetowych dla tych czasopism (czasopisma: *Journal of Technical Physics, Engineering Transactions, Archives of Mechanics*).

2001–2004: praca edytorska – jako **asystent redaktora wykonawczego** – przy wydawaniu publikacji naukowych Centrum Doskonałości AMAS – *Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures (AMAS)*. Zadania: skład w systemie \LaTeX , korespondencja z autorami oraz kwestie organizacyjne.

2009–2010: praca dla Oficyny Wydawniczej IPPT PAN: skład w systemie \LaTeX czasopisma *CAMES – Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*.

4 Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

4.1 Tematyczny cykl publikacji

Poniżej przedstawiam cykl 7-miu publikacji² wyłącznie mojego autorstwa składających się na moje osiągnięcie naukowe pod wspólnym tytułem:

„Propagacja i tłumienie fal akustycznych w ośrodkach porowatych, a cechy geometryczne i drgania mikrostruktury”

Cykl publikacji

[H-1] ZIELIŃSKI T.G.: "Fundamentals of multiphysics modelling of piezo-poro-elastic structures". *Archives of Mechanics*, Vol. 62, No. 5, pp. 343-378, 2010.

<http://am.ippt.gov.pl/index.php/am/article/view/376>

IF(5-letni): 0.798, IF: 0.469, MNiSW: 27 pkt. (lista A, *Web of Science*, JCR)

[H-2] ZIELIŃSKI T.G.: "Numerical investigation of active porous composites with enhanced acoustic absorption". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 22, pp. 5292-5308, 2011.

[doi:10.1016/j.jsv.2011.05.029](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.05.029)

IF(5-letni): 2.223, IF: 1.588, MNiSW: 30 pkt. (lista A, *Web of Science*, JCR)

[H-3] ZIELIŃSKI T.G.: "Inverse identification and microscopic estimation of parameters for models of sound absorption in porous ceramics". *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012) / International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2012)*, 17-19 September 2012, Leuven, Belgium, edited by P. Sas, D. Moens, and S. Jonckheere, pp. 95-107, 2012.

(*Web of Science*)

²Wśród publikacji cyklu znajduje się 5 prac opublikowanych przeze mnie w czasopismach z bazy JCR (*Journal Citation Reports*), indeksowanych przez *Web of Science*, zaś pozostałe 2 artykuły to referaty wydane w książkach po-konferencyjnych, również zindeksowanych przez *Web of Science*.

- [H-4] ZIELIŃSKI T.G.: "Microstructure-based calculations and experimental results for sound absorbing porous layers of randomly packed rigid spherical beads". *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 3, pp. 034905-034905-17, 2014.
doi:10.1063/1.4890218
IF(5-letni): 2.276, IF: 2.183, MNiSW: 30 pkt. (lista A, *Web of Science*, JCR)
- [H-5] ZIELIŃSKI T.G.: "A methodology for a robust inverse identification of model parameters for porous sound absorbing materials". *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014) / International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2014)*, 15-17 September 2014, Leuven, Belgium, edited by P. Sas, D. Moens, and H. Denayer, pp. 63-76, 2014.
(*Web of Science*)
- [H-6] ZIELIŃSKI T.G.: "Generation of random microstructures and prediction of sound velocity and absorption for open foams with spherical pores". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 137, No. 4, pp. 1790-1801, 2015.
doi:10.1121/1.4915475
IF(5-letni): 1.736, IF: 1.503, MNiSW: 30 pkt. (lista A, *Web of Science*, JCR)
- [H-7] ZIELIŃSKI T.G.: "Normalized inverse characterization of sound absorbing rigid porous media". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 137, No. 6, pp. 3232-3243, 2015.
doi:10.1121/1.4919806
IF(5-letni): 1.736, IF: 1.503, MNiSW: 30 pkt. (lista A, *Web of Science*, JCR)

4.2 Omówienie cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

4.2.1 Wstęp

Na cykl publikacji pod wspólnym tytułem „**Propagacja i tłumienie fal akustycznych w ośrodkach porowatych, a cechy geometryczne i drgania mikrostruktury**” składa się 7 prac opublikowanych przeze mnie w latach 2010-2015. Wszystkie te prace dotyczą modelowania – wspartego badaniami doświadczalnymi – propagacji fal akustycznych w dźwiękochłonnych ośrodkach porowatych, tj.: materiałach i kompozytach o porowatości otwartej. W celu usystematyzowania zagadnień poruszanych przeze mnie w ramach tej tematyki, można stwierdzić, że mój dorobek naukowy w tym zakresie opiera się na trzech filarach; są nimi:

1. Badania mikrostrukturalne dźwiękochłonnych ośrodków porowatych (do tej grupy należą prace [H-4] i [H-6] oraz w mniejszym zakresie również praca [H-3]);
2. Identyfikacja odwrotna dźwiękochłonnych materiałów porowatych (udokumentowana publikacjami [H-3], [H-5] i [H-7]);
3. Pochłanianie dźwięku przez materiały i aktywne kompozyty porosprężyste (wyniki tych badań przedstawiam w pracach [H-1] i [H-2]).

Chronologicznie rzecz ujmując, prace dotyczące trzeciego „filaru badawczego” są wcześniejsze niż prace z dwóch pierwszych grup. Moje zainteresowanie akustyką ośrodków porowatych rozpoczęło się właśnie od modelowania zagadnień materiałów i kompozytów porosprężystych, a więc takich, w których szkielet materiału porowatego bierze aktywny udział w propagacji fal akustycznych, w tym sensie, że jest ich nośnikiem w podobnym stopniu jak płyn wypełniający pory tych materiałów. W ramach tych badań zaproponowałem oryginalną koncepcję aktywnego dźwiękochłonnego kompozytu porosprężystego, w którym dyssypacja energii fal akustycznych jest wzmocniona poprzez aktywne wpływanie na drgania samego szkieletu. Koncepcję tę przedstawiłem na bazie numerycznego modelowania zjawisk na poziomie makroskopowym; ewentualnie należałoby tutaj mówić o poziomach *mezo-* i makroskali, ze względu na udział drobnych aktywnych struktur sprężystych zatopionych w warstwie materiału porosprężystego, a więc na „poziomie mezoskopowym”, podczas gdy pochłanianie dźwięku estymowane było w sposób uśredniony dla całej warstwy kompozytu, a więc

na poziomie makroskopowym. W trakcie tych badań doszedłem do wniosku, że ich kontynuacja wymaga lepszego rozpoznania wpływu jaki na propagację dźwięku w ośrodku porowatym ma jego mikrostruktura, a więc wpływu geometrii szkieletu. To zwróciło mnie w stronę modelowania wielo-skalowego, czyli rozpatrywania istotnych zjawisk fizycznych – związanych z dyssypacją fal w ośrodku porowatym – na poziomie mikroskali, a następnie przenoszenia otrzymanych rozwiązań mikrostrukturalnych na poziom makroskopowy (za pomocą technik uśredniania, homogenizacji), gdzie uzyskane rezultaty mogłem porównać z wynikami moich badań eksperymentalnych.

Badania wieloskalowe dźwiękochłonnych materiałów porowatych doprowadziły mnie do zupełnie nowych analiz niż te opisujące propagację fal akustycznych na poziomie makroskopowym, a mianowicie do zagadnień przepływów lepkich przez mikrostruktury otwartych porów, problemów rozchodzenia się ciepła w tego typu obszarach, a nawet zagadnień przewodnictwa elektrycznego przez przewodzący płyn uwięziony w izolującej mikrostrukturze materiału o porowatości otwartej. Pomimo stosowania modeli liniowych oraz przyjęcia założenia o tzw. sztywnym szkielecie, analizy tych zjawisk na poziomie mikrostruktur ośrodków porowatych są dosyć kosztowne numerycznie ze względu na konieczność wykonywania obliczeń w – z reguły bardzo skomplikowanych geometrycznie – obszarach reprezentatywnych dla tego typu ośrodków.

Założenie o sztywnym i nieruchomym szkielecie, które stosowałem w wieloskalowych badaniach akustyki materiałów porowatych w oparciu o ich mikrostrukturę, w zasadniczy sposób upraszcza opis *makroskopowy* ośrodka porowatego – można bowiem stosować model tzw. *plynu ekwiwalentnego*; jednakże większość istotnych parametrów modelowych jest wspólna dla obu przypadków (tj. zarówno dla szkieletu sztywnego jak i sprężystego), tak samo jak propagacja w zakresie wyższych częstotliwości, gdzie następuje pewne „usztynwienie” szkieletu, nawet bardzo wiotkiego/sprężystego przy niższych częstotliwościach. Krótką dyskusję na temat modeli akustyki materiałów porowatych oraz zależności pomiędzy modelem poro-sprężystym, a modelem zakładającym sztywność szkieletu przedstawię w punkcie następnym. Teraz uściślę tylko, że modelowanie uwzględniające drgania sprężyste szkieletu należy stosować w dwóch zasadniczych przypadkach, mianowicie:

1. gdy szkielet jest wystarczająco wiotki/sprężysty, tak że penetrujące ośrodek porowaty fale akustyczne powodują drgania szkieletu o amplitudach porównywalnych z amplitudami drgań cząsteczek płynu (powietrza) wypełniającego pory; dotyczy to przede wszystkim miękkich pianek poliuretanowych i różnych materiałów włóknistych w zakresie niższych częstotliwości, kiedy to mogą pojawić się również rezonanse szkieletu sprężystego bardzo istotnie zmieniające propagację fal (natomiast wraz ze wzrostem częstotliwości następuje wspomniane „usztynwienie” szkieletu);
2. nawet w przypadku materiałów o dosyć sztywnym szkielecie, gdy jego drgania są spowodowane przez inne czynniki niż penetrujące dany materiał fale akustyczne; typowym przykładem są tutaj zagadnienia wibroakustyczne, gdy drgania szkieletu pojawiają się np. w wyniku (wzbudzonych w dowolny sposób) sprężystych drgań powłoki panelu lub poszycia, którego fragment (rdzeń, okładzinę itp.) stanowi materiał porowaty, który musi być wtedy traktowany stosując opis poro-sprężysty; inny przypadek to, wspomniana już, zaproponowana przeze mnie w pracy [H-2] koncepcja aktywnego korygowania lub wywoływania drgań szkieletu za pomocą materiałów piezoelektrycznych, w celu zoptymalizowania dyssypacji fal akustycznych w jak najszerszym lub ewentualnie w wybranym zakresie częstotliwości.

Jak już wspomniałem moje badania wieloskalowe (z pierwszego „filaru badawczego”) dotyczące akustyki ośrodków porowatych, oparte o analizy mikrostrukturalne, dotyczą przypadków *pasywnych* izolatorów i absorberów akustycznych, o wystarczająco sztywnej strukturze, w konfiguracjach nie powodujących istotnych drgań tej struktury.

To samo założenie bezruchu szkieletu, przyjmowałem również w przypadku prac z drugiego „filaru badawczego”, dotyczącego tzw. charakteryzacji odwrotnej materiałów porowatych w oparciu o wyniki eksperymentalne uzyskane na drodze bezpośrednich pomiarów akustycznych próbki materiału porowatego, opisujących własności akustyczne warstwy takiego materiału o określonej (znanej) grubości, a więc na poziomie makroskopowym. Zajmowałem się więc tutaj identyfikacją odwrotną parametrów modelowych ośrodków porowatych, wynikających z ich mikrogeometrii i wykorzystywanych jednak zarówno przez modele dla ośrodków porowatych (bądź włóknistych) o sztywnym szkielecie, jak i dla materiałów poro-sprężystych! Poniżej prezentuję pokrótce opis tych modeli oraz ich współzależności parametryczne. W kolejnych punktach referuję wyniki mo-

ich prac badawczych składających się na prezentowany cykl publikacji, a na zakończenie podsumowują główne osiągnięcia i oryginalne wyniki moich badań naukowych.

4.2.2 Modele i parametry modelowe dźwiękochłonnych ośrodków porowatych

Energia fal akustycznych penetrujących otwarty ośrodek porowaty wypełniony powietrzem (lub innym płynem) jest zwykle bardzo dobrze rozpraszana dzięki efektom lepkiemu i termicznemu, zachodzącym podczas interakcji płynu w porach ze strukturą stałego szkieletu. Dla wielu materiałów o porowatości otwartej i wystarczająco sztywnym szkielecie, w celu modelowania tego zjawiska wystarczy tylko rozpatrzyć propagację w płynie. Wtedy, jak już wspomniano, typowa metoda modelowania polega na zastąpieniu takiego sztywnego ośrodka porowatego przez akustycznie mu ekwiwalentny płyn o własnościach dyspersyjnych, charakteryzowany przez zespolone i zależne od częstotliwości funkcje dynamicznego modułu ściśliwości i dynamicznej gęstości. Istnieje wiele modeli tego typu, które proponowano dla różnych materiałów. Najprostsze z nich to zwykle bardzo ograniczone, czysto empiryczne modele, które posługują się niewielką liczbą parametrów, takich jak na przykład opór przepływu powietrza przez materiał porowaty, wykorzystywany w modelach Delany–Bazley³ stosowanych zwykle wraz z istotnymi uogólnieniami zaproponowanymi przez Miki'ego⁴ – są to właściwie tylko modele dźwiękochłonnych materiałów włóknistych o bardzo wysokiej porowatości (w wersji oryginalnej przyjmowano, że porowatość jest bliska jedności). Bardziej skomplikowane modelowanie jest mniej ograniczone, ale wymaga większej liczby parametrów, wynikających z typowych cech geometrii strukturalnej ośrodków porowatych. Przykładowo, Attenborough⁵ zaproponował model dla sztywnych materiałów włóknistych lub granulowanych oparty o pięć parametrów, mianowicie: porowatość, opór przepływu, krętość mikrostruktury, współczynnik kształtu dla przepływu ustalonego oraz dynamiczny współczynnik kształtu. Nowe modele empiryczne nadal są proponowane dla różnego typu ośrodków (np. model Voroniny i Horoshenkova⁶).

Bardzo ogólny semi-fenomenologiczny model dla dźwiękochłonnych ośrodków porowatych o sztywnym szkielecie został opracowany w latach 90-tych ubiegłego wieku, na podstawie rezultatów badań naukowych wielu autorów, co wynikało z tego, że łączy on w sobie zaawansowane modelowanie niezależne kilku istotnych zjawisk cząstkowych. W swojej pierwotnej postaci model ten jest zwykle nazywany modelem Johnson–Champoux–Allard⁷ (JCA) i zawiera on: (1) modelowanie wpływu efektów lepko-inercyjnych przez Johnsona, Koplika oraz Dashea, którzy w roku 1987 zaproponowali semi-fenomenologiczny model opisujący tzw. funkcję gęstość dynamicznej porowatego ośrodka akustycznego o sztywnym szkielecie⁸, jak również (2) modelowanie wpływu efektów termicznych przez Champoux i Allarda, którzy w 1991 podali wyrażenie na tzw. dynamiczny moduł ściśliwości dla takiego ośrodka⁹. Wzory Champoux i Allarda zostały jednak później nieco zmodyfikowane przez Lafarge'a i współpracowników¹⁰ (1997): wprowadzono nową koncepcję – wraz z dodatkowym, nowym parametrem tzw. statycznej przepuszczalności termicznej – służącą poprawnemu opisowi wpływu efektów termicznych na propagację fal w niższym zakresie częstotliwości. Poprawiona wersja modelu nazywana jest modelem Johnson–Champoux–Allard–Lafarge (JCAL). Inne ulepszenia wprowadzone do modelu to poprawki dotyczące efektów lepko-inercyjnych w niższych częstotliwościach, oparte o rozwiązania zaproponowane przez Pride'a i współpracowników¹¹; w związku z tym, najbardziej rozbudowana wersja modelu nazywana jest modelem Johnson–Champoux–Allard–Pride–Lafarge (JCAPL).

³M. E. Delany and E. N. Bazley. "Acoustical properties of fibrous absorbent materials". In: *Appl. Acoust.* 3 (1970), pp. 105–116.

⁴Yasushi Miki. "Acoustical properties of porous materials". In: *J. Acoust. Soc. Jpn.* 11.1 (1990), pp. 19–28.

⁵Keith Attenborough. "Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials". In: *J. Acoust. Soc. Am.* 73.3 (1983), pp. 785–799.

⁶N. N. Voronina and K. V. Horoshenkov. "A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media". In: *Appl. Acoust.* 64.4 (2003), pp. 415–435.

⁷Jean F. Allard and Nouredine Atalla. *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, Second Edition*. Wiley, 2009.

⁸David Linton Johnson, Joel Koplik, and Roger Dashen. "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media". In: *J. Fluid Mech.* 176 (1987), pp. 379–402.

⁹Y. Champoux and J.-F. Allard. "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media". In: *J. Appl. Phys.* 70 (1991), pp. 1975–1979.

¹⁰Denis Lafarge et al. "Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies". In: *J. Acoust. Soc. Am.* 102.4 (1997), pp. 1995–2006.

¹¹Steven R. Pride, Frank Dale Morgan, and Anthony F. Gangi. "Drag forces of porous-medium acoustics". In: *Phys. Rev. B* 47.9 (1993), pp. 4964–4978.

Rodzina modeli Johnsona–Allarda (tj. modele JCA, JCAL JCAPL itp.) pozwala na bardzo wszechstronne modelowanie akustyczne, tzn. stosowalne dla sztywnych ośrodków porowatych dowolnego rodzaju: pianek o porowatości otwartej, materiałów włóknistych, ośrodków granulowanych itp. Ceną za to jest duża liczba parametrów modelowych. Zasadniczo, parametry te należy rozdzielić na dwie grupy: (1) parametry opisujące własności rzeczywistego płynu (zwykle powietrza) wypełniającego ośrodek porowaty (chodzi tu o: gęstość właściwą, lepkość, stosunek ciepł właściwych, liczbę Prandtla), (2) tzw. parametry transportu, które zależą tylko od czysto geometrycznych cech mikrostruktury (stałego szkieletu) ośrodka porowatego. Liczba parametrów geometrycznych zależy od wersji modelu: podstawowy model JCA wykorzystuje 5 parametrów, mianowicie, porowatość otwartą, tzw. inercyjną krętość porów, przepuszczalność lepka, oraz dwie długości charakterystyczne (dla sił lepkich i efektów termicznych); 6-parametrowy model JCAL stosuje dodatkowo termiczny odpowiednik przepuszczalności, natomiast 8-parametrowy model JCAPL wykorzystuje jeszcze tzw. krętości statyczne, lepka i termiczną.

Ważność modelowania akustycznego typu Johnson–Allard jest potwierdzona tym, że formuły tego modelu, wraz z parametrami, obecne są również w tzw. poro-sprężystym modelu Biota–Allarda¹², który opiera się w zasadzie na równaniach teorii poro-sprężystości Biota¹³, a nie na równaniu Helmholtza akustyki. Jak wspomniano na wstępie, model poro-sprężysty musi być stosowany wtedy, kiedy nie można zaniedbać wibracji stałego szkieletu (przykładowo: w przypadku miękkich materiałów porowatych, albo gdy ośrodek porowaty stanowi fragment systemu wibroakustycznego lub aktywnego). Teoria poro-sprężystości Biota jest starsza niż modele z grupy Johnsona–Allarda. Oryginalna postać oraz wiele wariacji teorii Biota nie wykorzystują formuł Johnsona–Allarda, ani większości z geometrycznych parametrów tych modeli. Równania różniczkowe cząstkowe teorii poro-sprężystości opisują ośrodek dwufazowy: sprzęgają tzw. fazę stałą „rozmytego” szkieletu sprężystego z tzw. fazą płynną związaną z płynem wypełniającym przestrzeń porów. W modelu Biota–Allarda faza płynna to ekwiwalenty płyn w porach opisany przez dynamiczną gęstość i dynamiczny moduł ściśliwości zdefiniowane według jednego z modeli Johnsona–Allarda (JCA, JCAL lub JCAPL). Zatem, wykorzystywane są te same dwie grupy parametrów, a wszystkie dodatkowe parametry poro-sprężystego modelu Biota–Allarda są związane ze stałym materiałem szkieletu; są nimi: gęstość właściwa i moduł ścinania tego materiału oraz liczba Poissona dla szkieletu.

Parametry rzeczywistego płynu (zwykle jest to powietrze) wypełniającego pory są zazwyczaj bardzo dobrze znane i/lub mogą być łatwo i dokładnie wyznaczone dla znanych warunków otoczenia (takich jak ciśnienie atmosferyczne, temperatura, wilgotność). Często to samo można powiedzieć o parametrach dotyczących materiału szkieletu. Zatem istotnie charakterystyczne parametry modeli Johnsona–Allarda (JCA, JCAL lub JCAPL) i Biota–Allarda wynikają właściwie z mikro-geometrii stałego szkieletu i są one pewnymi makroskopowymi uśrednieniami geometrycznych cech ośrodka porowatego, definiowalnymi zgodnie z techniką homogenizacji. Są one mierzalne bezpośrednio, wymaga to jednak specjalistycznego sprzętu, innego dla każdego z parametrów. Jest to ważna przyczyna dla rozwoju metod odwrotnej identyfikacji tych parametrów na bazie pomiarów akustycznych wykonywanych za pomocą sprzętu jednego rodzaju.

4.2.3 Związek pomiędzy geometrią mikrostruktury ośrodka porowatego, a propagacją i pochłanianiem fal akustycznych


PUBLIKACJE CYKLU: [H-4], [H-6].

W pracach tych rozpatruję zagadnienia związane z modelowaniem wieloskalowym akustyki ośrodków porowatych, a w szczególności z doбором reprezentatywnych elementów objętościowych odpowiedzialnych za uwzględnienie zasadniczego wpływu mikrostruktury danego ośrodka na propagację i pochłanianie fal akustycznych. Prezentuję w nich zarówno podstawy teoretyczne, jak i wyniki analiz numerycznych (a tam, gdzie jest to możliwe, również oszacowań analitycznych), skonfrontowane z rezultatami doświadczalnymi.

Publikacje te są wyłącznie mojego autorstwa: zarówno prace programistyczne, jak i wszystkie analizy numeryczne oraz eksperymenty wykonałem samodzielnie.

¹²Allard and Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, Second Edition*.

¹³M. A. Biot. “The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid”. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 28.2 (1956), pp. 168–191; M. A. Biot. “Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media”. In: *J. Appl. Phys.* 33.4 (1962), pp. 1482–1498.

 **PUBLIKACJA [H-4]: "Microstructure-based calculations and experimental results for sound absorbing porous layers of randomly packed rigid spherical beads"**. Praca prezentuje badania doświadczalne oraz modelowanie wieloskalowe dotyczące pochłaniania i prędkości propagacji fal dźwiękowych w ośrodku granulowanym składającym się ze swobodnie upakowanych sztywnych kulek. Wszystkie kulki są identyczne, co pozwoliło na zaproponowanie stosunkowo prostych konstrukcji reprezentatywnych elementów objętościowych, a nawet na skorzystanie z analitycznych oszacowań parametrów mikrostrukturalnych.

W pierwszej części pracy opisane są eksperymenty, które polegały na zbadaniu pochłaniania dźwięku przez warstwy sztywnych, plastikowych kulek o takiej samej średnicy, równej 5.9 mm. Kulki były wsypywane do rury impedancyjnej, służącej do pomiarów własności akustycznych materiałów porowatych (właściwie do trzech takich rur o różnych średnicach). Zbadano w ten sposób pochłanianie dźwięku przez warstwy kulek o różnej grubości. Znając masę pojedynczej kulki oraz masę i objętość każdej z warstw można było oszacować ich porowatość, która wynosiła 40-42% (w zależności od średnicy rury). W dalszych rozważaniach rozpatrywano już tylko wyniki dla rury o najmniejszej średnicy (29 mm), dla której zakres częstotliwości był największy pomiarowych. W tym przypadku porowatość wynosiła około 42% ze względu na nieco gorsze upakowanie kulek o rozmiarze już tylko około 5 razy mniejszym niż średnica rury.

Następnie przystąpiono do konstrukcji, w miarę prostych i periodycznych, geometrycznych reprezentacji dla mikrostruktury warstw kulek. W tym celu wykorzystano dobrze znane regularne, periodyczne upakowania kul: typu SC (*simple cubic*) z jedną kompletną kulą zawartą w sześciennym elemencie objętościowym, typu BCC (*body centered cubic*) z dwiema kulami, oraz typu FCC (*face centered cubic*) z czterema kulami. Porowatości upakowań kul wynoszą odpowiednio: 47.6% (SC), 32% (BCC) oraz 26% (FCC), są zatem znacząco różne od znalezionej doświadczalnie wartości 42%. W celu dostosowania porowatości elementów objętościowych do eksperymentalnych 42%, zdecydowano się na niewielkie, odpowiednio dobrane, nasunięcie kul w przypadku upakowania SC, oraz odpowiednie rozsuniecie kul w przypadkach upakowań BCC i FCC. W ten sposób stworzono regularne, periodyczne elementy objętościowe SC_{42%}, BCC_{42%}, FCC_{42%}, które w różnym stopniu mogą być reprezentatywne dla przebadanych warstw identycznych kulek plastikowych.

Reprezentatywne elementy objętościowe posłużyły wieloskalowemu modelowaniu zagadnienia pochłaniania dźwięku przez pomierzone warstwy granularne zbudowane ze *sztywnych* kulek. Na poziomie makroskopowym zastosowano zatem zaawansowany model płynu ekwiwalentnego Johnson–Champoux–Allard–Pride–Lafarge (JCAPL), posługujący się ośmioma parametrami związanymi z geometrią mikrostruktury ośrodka porowatego. W modelu tym dynamiczna gęstość efektywna jest zależną od częstotliwości funkcją zespoloną, która zależy od stałej gęstości rzeczywistego płynu (powietrza) wypełniającego pory oraz od tzw. dynamicznej (lepkiej) krętości mikrostruktury, która jest bezwymiarową zespoloną funkcją częstotliwości o części rzeczywistej zawsze większej od jedności, co oznacza, że płyn efektywny jest cięższy od płynu rzeczywistego (powietrza) ze względu na inercyjno-lepką interakcję ze szkieletem ośrodka. Podobnie dynamiczny moduł ściśliwości jest odniesiony do stałej materiałowej adiabatycznego modułu ściśliwości dla powietrza, natomiast efekty dysypacji i dyspersji są zawarte w tzw. dynamicznej funkcji krętości termicznej (bezwymiarowej, zespolonej i zależnej od częstotliwości). Obie dynamiczne funkcje krętości zależą od kinematycznej lepkości i liczby Prandtla powietrza (tj. płynu wypełniającego pory) oraz od ośmiu geometrycznych parametrów mikrostruktury. Są nimi: porowatość (otwarta), klasyczna („inercyjna”) krętość mikrostruktury, przepuszczalności lepka i termiczna, statyczne krętości lepka i termiczna, oraz długości charakterystyczne lepka i termiczna. Te osiem parametrów wyznaczono korzystając z reprezentatywnych elementów objętościowych, między innymi uśredniając wyniki problemów brzegowych, opisanych poniżej, odnoszących się do efektów inercyjno-lepkich i termicznych w obszarze płynu wypełniającego pory, a więc na poziomie mikroskopowym. Następnie zastosowano formuły modelu JCAPL, a wreszcie rozwiązania analityczne dla warstw akustycznego ośrodka efektywnego na poziomie makroskopowym.

Dynamiczna funkcja krętości mikrostruktury zależy od częstotliwości i opisuje opór przepływu płynu nieściśliwego przez otwartą mikrostrukturę ośrodka porowatego, wymuszony lokalnie stałym, harmonicznie zmiennym w czasie, gradientem ciśnienia. Dla bardzo wysokich częstotliwości lepkość przepływu może być zaniedbana, tak jak w przypadku płynu doskonałego, a opór przepływu jest czysto inercyjny. Ten opór jest definiowany przez klasyczny parametr krętości mikrostruktury, który jest zarazem graniczną wartością (tzn. przy częstotliwości dążącej do nieskończoności) części rzeczywistej funkcji krętości dynamicznej. Oczywiście w przypadku anizotropowym pojawia się tensor krętości mikrostruktury. Można pokazać, że jest on odwrotnie proporcjonalny do efektywnego tensora przewodnictwa elektrycznego przez ośrodek porowaty o otwartej

mikrostrukturze, wypełniony płynem przewodzącym, przy założeniu, że materiał sztywnego szkieletu jest izolatorem elektrycznym (jest to zresztą jedna z metod bezpośredniego pomiaru parametru krętości).

Dysponując zatem reprezentatywną, periodyczną geometrią ośrodka porowatego parametr krętości (względnie składowe tensora krętości) wyznacza się z wzoru zależnego od – uśrednionego po obszarze płynu w mikrostrukturze – elektrycznego pola wektorowego. Jest to właściwie przeskalowane pole elektryczne, wywołane w płynie przewodzącym, wypełniającym otwartą mikrostrukturę, przez jednorodne *jednostkowe* pole zewnętrzne działające w danym kierunku (np. na kierunku propagacji fal). Pole elektryczne jest polem potencjalnym (bezwirowym) i ma zerową składową normalną na styku z elektrycznie izolującą powierzchnią szkieletu ośrodka porowatego. Zależy ono zatem od skalarnego pola (przeskalowanego) potencjału elektrycznego i w zasadzie zadanie przewodnictwa sprowadza się do zagadnienia Laplace’a na ten potencjał. Znajdując ten potencjał, można wyznaczyć pole elektryczne, a w końcu parametr krętości. Pole elektryczne służy również do obliczenia długości charakterystycznej lepkiej, natomiast długość charakterystyczną dla efektów termicznych oblicza się bezpośrednio z geometrii mikrostrukturalnej jako podwojoną objętość obszaru płynu w porach do ograniczającej go powierzchni szkieletu.

Efekty lepkie w zakresie częstotliwości bliskich zeru związane są z tzw. przepływem Stokes’a, czyli lepkiem, nieściśliwym przepływem płynu przez otwartą mikrostrukturę ośrodka porowatego. Pole prędkości takiego przepływu wywołane jednorodnym w całym obszarze płynu gradientem ciśnienia działającym w ustalonym kierunku (np. na kierunku propagacji fal) jest liniowo proporcjonalne do tego gradientu, a tensor proporcjonalności opisuje lokalne pole przepuszczalności lepkiej, pomnożone przez $-1/\mu$, gdzie μ jest lepkością dynamiczną płynu, a minus oznacza, że przepływ jest w kierunku malejącego ciśnienia. Jest to więc lokalna (tj. na poziomie mikroskali) wersja prawa Darcy’ego, a uśrednienie tensorowego pola przepuszczalności po całej komórce reprezentatywnej daje w efekcie makroskopowy tensor przepuszczalności, który w przypadku izotropii lub dla wybranego kierunku sprowadza się do znanego dobrze parametru przepuszczalności (Darcy’ego) ośrodka porowatego. Rzut tensorowego pola przepuszczalności lepkiej na określony kierunek (np. kierunek gradientu ciśnienia lub propagacji fali) jest przeskalowanym polem prędkości przepływu. Pole przepuszczalności lepkiej wyznacza się zatem z przeskalowanego zagadnienia Stokes’a, gdzie wymuszeniem przepływu jest jednostkowy wektor gradientu, jednorodny w całym obszarze przepływu. Oprócz klasycznego parametru przepuszczalności ośrodka porowatego służy ono również do obliczenia statycznego parametru krętości lepkiej, czyli granicznej wartości rzeczywistej dla dynamicznej funkcji krętości lepkiej przy częstotliwości zbiegającej do zera.

Efekty termiczne zachodzące w obszarze płynu w porach związane są z harmoniczną zmianą ciśnienia wywołaną falami akustycznymi penetrującymi ośrodek porowaty. Harmoniczne fluktuacje ciśnienia powodują fluktuacje temperatury i związany z tym przepływy ciepła. Na poziomie mikroskali proces opisany jest przez równanie przepływu ciepła na nieznaną pole temperatury z izotermicznym warunkiem brzegowym (zerowej temperatury) na ściankach szkieletu, gdyż przyjmuje się, że szkielet jest izolatorem termicznym ze względu na znacznie wyższy współczynnik przewodnictwa cieplnego materiału stałego niż płynu. Zakłada się, że pole temperatury jest proporcjonalne do szybkości harmonicznych zmian ciśnienia: jako współczynnik tej proporcjonalności wprowadza się tzw. termiczny odpowiednik pola przepuszczalności, podzielony przez współczynnik przewodnictwa cieplnego płynu. W efekcie otrzymuje się przeskalowane zagadnienie przepływu ciepła na amplitudę zespoloną skalarnego pola przepuszczalności termicznej z zerowym warunkiem brzegowym na ściankach szkieletu. Przejście graniczne dla częstotliwości dążącej do zera prowadzi do równania Poissona na pole przepuszczalności termicznej, a uśrednienie po całej komórce reprezentatywnej daje parametr przepuszczalności termicznej. Znalezione rozwiązanie na pole przepuszczalności termicznej wykorzystane jest również do obliczenia statycznego parametru krętości termicznej, czyli granicznej wartości rzeczywistej dla funkcji dynamicznej krętości termicznej przy częstotliwości dążącej do zera.

Dla każdej z periodycznych komórek reprezentatywnych przeprowadzono analizy numeryczne Metodą Elementów Skończonych rozwiązując trzy opisane wyżej zagadnienia brzegowe, mianowicie:


- zagadnienie Laplace’a na przeskalowany potencjał pola elektrycznego w obszarze przewodzącego płynu, z warunkiem brzegowym zerowej składowej normalnej pola na styku z izolującym elektrycznie szkieletem;
- przeskalowany przepływ lepki płynu nieściśliwego przez otwartą mikrostrukturę ośrodka porowatego z warunkami brzegowymi braku poślizgu na ściankach szkieletu;

- zagadnienie Poissona na przeskalowane (do wymiaru przepuszczalności) pole temperatury w obszarze płynu wypełniającego pory, z zerowym izotermicznym warunkiem brzegowym na ściankach szkieletu.

Wszystkie poszukiwane pola są oczywiście periodyczne w całym obszarze płynu, czyli spełniają odpowiednie warunki periodyczności na tych fragmentach ścianek danej komórki reprezentatywnej, które łączą obszar płynu pomiędzy komórkami. Następnie całkując (uśredniając) znalezione pola rozwiązań po elemencie reprezentatywnym i stosując odpowiednie formuły, obliczono sześć z ośmiu parametrów mikrostruktury dla modelu JCAPL, gdyż porowatość jest znana *a priori*, a długość charakterystyczna termiczna również wynika bezpośrednio z przyjętej geometrii reprezentatywnej. Oprócz porowatości, oszacowania pozostałych parametrów zostały również wyznaczone z analitycznych wzorów wyprowadzonych¹⁴ z analizy sferycznej komórki bifazowej, w której sferyczna warstwa płynu otacza kulę. Ta super-regularna, prosta geometria pozwala na znalezienie analitycznych oszacowań dla rozwiązań każdego z trzech podstawowych zagadnień zdefiniowanych powyżej. W przypadku parametrów zależnych od rozwiązania zagadnienia przepływu Stokes'a, a więc przepuszczalności (lepkiej) oraz statycznej krętości lepkiej, wzory te zależą od zastosowanego warunku brzegowego na sferycznym brzegu obszaru płynu otaczającego kulę. Podobnie dwie alternatywne formuły wyprowadzone są na długość charakterystyczną lepka. Zaprezentowano zatem wyniki oszacowań trzech typów: P, V i C, które porównano z wynikami otrzymanymi z analiz numerycznych.

Parametry wyznaczone z analiz numerycznych oraz z oszacowań wykorzystano w równaniach modelu JCAPL w celu obliczenia efektywnych makroskopowych charakterystyk ośrodka porowatego: dynamicznej gęstości oraz dynamicznego modułu ściśliwości, a w konsekwencji efektywnej prędkości dźwięku. Wszystkie te charakterystyki są zależnymi od częstotliwości funkcjami zespolonymi.

Wyznaczona efektywna prędkość dźwięku oraz dynamiczna gęstość pozwoliły na rozwiązanie na poziomie makroskopowym zagadnienia pochłaniania dźwięku przez warstwy identycznych, sztywnych kulek (w praktyce przez ekwiwalentne warstwy efektywnego płynu). W tym celu rozwiązano zagadnienie Helmholtza dla propagacji fal akustycznych w takich warstwach o określonej grubości (odpowiednio: 41 mm, 106 mm oraz 200 mm), wyznaczając powierzchniową charakterystykę impedancji akustycznej, a następnie współczynnik pochłaniania dźwięku. Otrzymane krzywe pochłaniania dźwięku porównano z rezultatami pomiarów eksperymentalnych w szerokim zakresie częstotliwości od 100 mm do 6.4 kHz. Okazało się, że wszystkie krzywe mają taki sam charakter jak krzywa eksperymentalna (poza tym krzywe wynikające z oszacowań P i C były właściwie takie same, podobnie jak prawie identyczne były krzywe otrzymane z analiz numerycznych dla BCC_{42%} i FCC_{42%}). W zależności od grubości warstwy krzywe pochłaniania charakteryzowały się dwoma (dla 41 mm), pięcioma (dla grubości 106 mm) lub dziewięcioma maksimumami (dla warstwy 200 mm). W przypadku wyników otrzymanych z analiz elementu reprezentatywnego SC_{42%} maksima te były regularnie lekko przesunięte w kierunku niższych częstotliwości, natomiast w przypadku BCC_{42%} lub FCC_{42%} występowało lekkie regularne przesunięcie w stronę wyższych częstotliwości. Rezultaty pomiarów znajdowały się zatem pomiędzy dwoma skrajnymi przypadkami: kul nachodzących na siebie oraz kul rozsuniętych. Obliczenia dla pierwszego z tych dwóch przypadków, a więc dla elementu SC_{42%}, były mniej dokładne (co uwidaczniało się wyraźnie wraz ze wzrostem grubości warstwy), gdyż w rzeczywistości eksperymentalnej kule się co najwyżej stykają. Krzywe wynikające z oszacowań analitycznych miały maksima w częstotliwościach pośrednich, a więc zgodnie z eksperymentem, jednakże oszacowania typu P i C dawały wyraźnie niższe wartości absorpcji akustycznej. Generalnie najbardziej zgodne z eksperymentem były wyniki oszacowania typu V oraz analiz numerycznych typu BCC_{42%} lub FCC_{42%}. W przypadku najgrubszej warstwy 200 mm, w wyższych częstotliwościach maksima eksperymentalne miały już częstotliwości bliższe wynikom numerycznym niż rezultatom analitycznego oszacowania typu V.

 **PUBLIKACJA [H-6]: "Generation of random microstructures and prediction of sound velocity and absorption for open foams with spherical pores".** W pracy zaproponowana jest metoda projektowania i oceny morfologii dźwiękochłonnych pianek o otwartych porach o kształcie kulistym (bądź zbliżonym do kulistego). Metoda łączy ze sobą dwa zagadnienia: (1) algorytm quasi-losowego generowania reprezentatywnych

¹⁴Claude Boutin and Christian Geindreau. "Estimates and bounds of dynamic permeability of granular media". In: *J. Acoust. Soc. Am.* 124.6 (2008), pp. 3576–3593; Claude Boutin and Christian Geindreau. "Periodic homogenization and consistent estimates of transport parameters through sphere and polyhedron packings in the whole porosity range". In: *Phys. Rev. E: Stat., Nonlinear, Soft Matter Phys.* 82 (2010), 036313 (1–18).

mikrostruktur o otwartym periodycznym rozkładzie kulistych porów, oraz (2) bazujące na wygenerowanych mikrostrukturach określanie efektywnej prędkości propagacji fal akustycznych, jak również stopnia ich pochłaniania w zależności od częstotliwości fal.

Algorytm generowania mikrostruktury oparto na symulacji dynamicznego mieszania sztywnych kul o różnej wielkości w stopniowo zmniejszającym się, sześciennym obszarze elementu objętościowego. Kule te mogą do pewnego stopnia wzajemnie się penetrować, gdyż docelowo ich połączone wnętrza będą stanowić otwarty obszar porów w elemencie reprezentatywnym. W zaproponowanej procedurze kule mogą w miarę swobodnie przenikać przez ścianki kurczącego się elementu objętościowego, przy czym przenikający fragment natychmiast pojawia się w elemencie dokładnie po drugiej jego stronie, co zapewnia periodyczność układu kul (porów). Praktyczna realizacja tego podejścia polega na tym, że każdy docelowy por jest reprezentowany przez rodzinę ośmiu identycznych kul umieszczonych w wierzchołkach sześcianu, którego rozmiar jest w każdej chwili równy sześciennemu elementowi objętościowemu. Zmniejszenie tego elementu jest związane z identyczną zmianą rozmiaru sześcianów dla każdej rodziny kul. Nakłada to pewne dodatkowe więzy na dynamikę mieszania kul, ale jest niezbędne w celu spełnienia warunku periodyczności.

W miarę losowy rozkład porów w elemencie reprezentatywnym jest zapewniony przez (całkowicie lub do pewnego stopnia) losowy wybór położeń oraz prędkości początkowych kul, jak również innych (opcjonalnych) czynników, które mogą być wykorzystane w trakcie symulacji (np. zmiennie ukierunkowana grawitacja, dyssypacja energii odbić itp.). Z drugiej jednak strony cechy generowanych mikrostruktur muszą być do pewnego stopnia kontrolowane, czy też projektowane za pomocą zadanych parametrów, które w uśredniony czy też statystyczny sposób opisują ich mikrogeometrię.

Już z bardzo ogólnych badań nad propagacją dźwięku w materiałach porowatych wiadomo, że niezwykle istotnym czynnikiem jest porowatość otwarta, natomiast z zaawansowanych analiz i modeli wieloskalowych wynika, że rozmiary porów wiążą się z tzw. długością charakterystyczną dla efektów termicznych, podczas gdy rozmiary „okien” łączących pory są odpowiedzialne za tzw. długość charakterystyczną dla sił lepkich, ponadto zarówno rozmiary porów i łączących je kanałów (tj. okien i mniejszych porów) mają oczywisty związek z przepuszczalnością (lepka) materiału porowatego oraz z jej termicznym odpowiednikiem, wprowadzonym w ramach zaawansowanego modelowania akustyki ośrodków porowatych w celu poprawy oszacowań w zakresie niższych częstotliwości. Okazuje się również, że w trakcie fizyko-chemicznych procesów podczas wytwarzania pianek ceramicznych o porowatości otwartej i owalnych porach, parametry te (tzn. porowatość, rozmiary porów i okien) mogą być do pewnego stopnia kontrolowane/projektowane. Stąd wniosek, że powinny być one w pośredni lub bezpośredni sposób związane z parametrami projektowymi obecnymi w algorytmie losowego generowania geometrii mikrostruktur porowatych. Zaproponowano zatem cztery takie parametry projektowe: porowatość (otwartą), średni rozmiar porów i odchylenie standardowe dla tego rozmiaru, oraz zdefiniowany w celu uwzględnienia wpływu rozmiarów okien, tzw. parametr maksymalnej wzajemnej penetracji porów (lub raczej kul je reprezentujących).

Pierwsze dwa parametry są definiowane w sposób dokładny i bezpośredni w ramach zaproponowanego podejścia do projektowania morfologii ośrodka porowatego. Sama porowatość jest nawet czynnikiem, który warunkuje zakończenie algorytmu periodycznego mieszania kul: na każdym jego kroku – tj. po zmniejszeniu rozmiaru reprezentatywnego elementu objętościowego i wyznaczeniu aktualnych położeń (i prędkości) kul – obliczana jest jego porowatość wynikająca z potraktowania wzajemnie penetrujących się kul jako porów, dzięki czemu sprawdzony może być warunek osiągnięcia porowatości wymaganej/projektowanej i gdy nie jest on spełniony mieszanie jest kontynuowane. Gdy projektowana porowatość jest osiągnięta (czasami może to jednak nie być możliwe), dysponuje się losowo wygenerowaną morfologią porowatą, którą można dowolnie skalować, a raczej w odpowiedni sposób ustalić wymiar elementu objętościowego, tak, że średni rozmiar porów w tym elemencie jest równy wartości projektowej. Widać zatem, że porowatość i średni rozmiar porów są parametrami nie tylko dokładnie i bezpośrednio projektowanymi, ale też zupełnie niezależnymi.

Nieco inaczej jest w przypadku kolejnego parametru istotnie związanego z rozmiarem porów, a mianowicie odchylenia standardowego od ich średniego rozmiaru. Parametr ten może być dokładnie projektowany poprzez zróżnicowany wybór (początkowych) średnic kul, gdy nie dopuszcza się zmiany ich względnego rozmiaru w trakcie mieszania. Sprawdzone jednak, że nawet przy włączeniu opcji losowego (ale z odpowiednią szybkością) kurczenia oraz puchnięcia kul, końcowa wartość odchylenia standardowego może być prawie identyczna z projektowaną wartością początkową. W tym kontekście ważniejsze jest to, że zapewnienie różnorodności rozmiarów porów wymaga wprowadzenia wielu kul: im większa liczba porów w periodycznym elemencie

reprezentatywnym tym większe może być zróżnicowanie ich wielkości, co czasem może być również niezbędne w celu osiągnięcia (zwłaszcza dużych) wartości porowatości projektowych, przy względnie ograniczonym rozmiarze okien.

W przeciwieństwie do rozmiaru porów średni rozmiar okien łączących pory nie jest parametrem projektowanym bezpośrednio. W sposób pośredni rozmiar ten jest jednak kontrolowany przez parametr wzajemnej dopuszczalnej penetracji kul. Pokazano, że w przypadku dwóch kul (porów) o identycznej średnicy, stosunek promienia okna, które łączy te pory do promienia porów zależy od bezwymiarowego parametru penetracji ζ według formuły: $\sqrt{\zeta - \zeta^2/4}$. Oznacza to, że jeśli $\zeta = 0.2$ jest maksymalną wartością penetracji to rozmiary okien nie powinny przekraczać 0.435 rozmiarów porów. Sprawdzone, że to górne oszacowanie jest dosyć dokładne i użyteczne. Dla przykładowo wygenerowanej periodycznej mikrostruktury o projektowanej porowatości 70%, z pięcioma porami o względnych rozmiarach 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 i 1.2, czyli o projektowanym odchyleniu standardowym równym 0.158 (około 16% wartości średniej), średni promień okien łączących pory wyniósł 0.41 średniego promienia porów, przy zadanym parametrze maksymalnej dopuszczalnej penetracji $\zeta = 0.2$ (dla wszystkich kul takim samym).

W drugiej części pracy dla mikrostruktury o zaproponowanych parametrach (o porowatości otwartej 70%), wygenerowanej przy użyciu algorytmu losowego mieszania kul, wyznaczono efektywną prędkość propagacji fal akustycznych w materiale porowatym przez nią reprezentowanym, stosując podejście hybrydowe, takie jak opisane w pracy [H-4]. Pokazano wiele charakterystyk częstotliwościowych: krętości dynamicznej, tłumienia i liczby falowej, szybkości propagacji itp. W końcu, wykorzystując efektywną prędkość dźwięku i dynamiczną gęstość, obliczone dla projektowanego materiału porowatego o porach kulistych, wyznaczono współczynnik pochłaniania dźwięku dla warstw tego materiału o różnych grubościach.



Na zakończenie pracy, przedyskutowano pewne ograniczenia zaproponowanej metody, związane właściwie głównie z kosztami obliczeń numerycznych. Pokazano wyniki otrzymane dla elementu objętościowego, który może być tylko do pewnego stopnia uznany za reprezentatywny dla materiału porowatej ceramiki korundowej o porowatości 88%, gdyż aby ograniczyć liczbę stopni swobody zastosowano w nim tylko pięć porów. Pozwoliło to na wygenerowanie mikrostruktury o porowatości 88% i średnim rozmiarze porów takim samym, jak w przypadku pianki ceramicznej (dla której znane były rozmiary około 150 porów i 350 okien), jednakże z mniejszym odchyleniem standardowym i ze znacznie gorszym zróżnicowaniem wielkości porów, oraz z wyraźnie większym średnim rozmiarem okien łączących pory. Okazało się jednak, że krzywa współczynnika pochłaniania dźwięku, wyznaczona na poziomie makroskopowym, ale dzięki analizom mikrostrukturalnym bazującym na tym semi-reprezentatywnym elemencie objętościowym, jest bardzo zbliżona do wyników otrzymanych z bezpośrednich pomiarów próbki ceramicznej w tzw. rurze impedancyjnej.

4.2.4 Identyfikacja odwrotna parametrów mikrostruktury dźwiękochłonnych materiałów porowatych

PUBLIKACJE CYKLU: [H-5], [H-7], [H-3].

W publikacjach tych zajmuję się tzw. identyfikacją odwrotną materiałów porowatych, czyli określaniem parametrów ich mikrostruktury (takich jako porowatość, przepuszczalność, krętość, długości charakterystyczne itp.) na podstawie wyników pomiarów akustycznych, korzystając z zaawansowanych modeli Johnsona–Allarda. Proponuję oryginalne przeformułowanie zagadnienia odwrotnego związane z normalizacją poszukiwanych parametrów. Podejście to omawiam szczegółowo w referacie konferencyjnym [H-5] (indeksowanym przez *Web of Science*), natomiast publikacja [H-7] z czasopisma z listy JCR, jest rozszerzoną wersją tego referatu, różniącą się głównie dodatkowymi przykładami identyfikacji parametrycznych bazujących na pomiarach rzeczywistych próbek materiałów porowatych oraz prezentacją innego przykładu numerycznego. Z tego względu obie te publikacje zostaną poniżej omówione razem, z zaznaczeniem wspomnianych różnic. Nieco uproszczoną, pierwotną wersję podejścia w pełni rozwiniętego w tych pracach zaprezentowałem po raz pierwszy w roku 2012, w referacie konferencyjnym [H-3] (również indeksowanym przez *Web of Science*). Pracę tę krótko scharakteryzuję na końcu tego paragrafu ze względu na zaproponowaną tylko w tej publikacji, oryginalną koncepcję wspomaganą identyfikacji odwrotnej przy pomocy wyników modelowania wieloskalowego bazującego na analizach mikrostrukturalnych.

Wymienione powyżej prace i zaproponowane oryginalne rozwiązania są wyłącznie mojego autorstwa. Wszystkie wyprowadzenia analityczne, implementacje programistyczne, przykłady numeryczne, jak również pomiary akustyczne i bazujące na nich „odwrotne” identyfikacje numeryczne wykonałem samodzielnie.

 **PUBLIKACJA [H-5]: "A methodology for a robust inverse identification of model parameters for porous sound absorbing materials".**  **PUBLIKACJA [H-7]: "Normalized inverse characterization of sound absorbing rigid porous media".** Parametry transportu, czyli mikrostruktury ośrodka porowatego, wykorzystywane przez modele Johnsona–Allarda i Biota–Allarda, mogą być mierzone bezpośrednio – wymaga to jednak specjalistycznego sprzętu, innego dla każdego z parametrów. Jest to jedna z istotnych przyczyn dla rozwoju metod odwrotnej identyfikacji tych parametrów na podstawie pomiarów akustycznych wykonywanych na sprężce jednego rodzaju. Powyższe prace prezentują tego typu metodologię wyznaczania tych parametrów dla materiałów porowatych o niezbyt miękkim szkielecie, w oparciu o modele Johnsona–Allarda.

W pierwszej części obu prac zaprezentowano kompletny zestaw równań potrzebny do opisu propagacji fal akustycznych w ośrodku dwuwarstwowym. Przypomniano również niezbędne formuły modelu Johnsona–Allarda: w pracy [H-5] dla sześćo-parametrowego wariantu JCAL, natomiast w artykule [H-7] dodatkowo również dla ośmio-parametrowej wersji JCAPL. Analityczne rozwiązania równań propagacji w ośrodku dwuwarstwowym wyprowadzono przyjmując, że warstwa wierzchnia wykonana jest ze sztywnego materiału porowatego, natomiast warstwę wewnętrzną (pomiędzy warstwą wierzchnią, a sztywnym podłożem) stanowić będzie inny materiał porowaty lub pustka powietrzna. Wyprecyzowano także przypadek ośrodka jednowarstwowego, gdy nie ma pustki powietrznej, a materiał porowaty przylega bezpośrednio do sztywnego podłoża. Dla obu przypadków wyprowadzono wzory na powierzchniową impedancję akustyczną, niezbędną do określenia współczynnika pochłaniania dźwięku.

Następnie w obu pracach omówiono metodologię identyfikacji odwrotnej parametrów mikrostruktury, występujących w modelu Johnsona–Allarda. W tym celu najpierw zaproponowano zestaw znormalizowanych parametrów bezwymiarowych, które w jednoznaczny sposób związane są z oryginalnymi parametrami modelu. We wzorach na niektóre z bezwymiarowych parametrów wprowadzono tzw. częstotliwość skalującą, której zadaniem jest normalizacja składowych wektora parametrów bezwymiarowych. Zaproponowano dwie takie niezależne częstotliwości: jedną dla normalizacji parametrów związanych z efektami lepkości, a drugą dla parametrów „termicznych”. Wyprowadzono również formuły odwrotne pozwalające na obliczenie klasycznych parametrów modelowych (tj. mikrostrukturalnych parametrów transportu), gdy znane są parametry bezwymiarowe oraz przyjęte częstotliwości normalizujące. W końcu wzory Johnsona–Allarda na dynamiczne funkcje krętości lepkiej i termicznej, przeformułowano do postaci zależnych od wprowadzonych parametrów bezwymiarowych. W pracy [H-5] wszystkie te wyprowadzenia podano dla wersji JCAL modelu Johnsona–Allarda, a więc dla sześciu parametrów (bezwymiarowych), natomiast w publikacji [H-7], oprócz przypadku JCAL, zaproponowano również rozszerzenie na wariant dla modelu JCAPL, definiując zatem jeszcze dwa dodatkowe parametry bezwymiarowe (definicje pierwszych sześciu parametrów są identyczne dla obu przypadków.)


Przeformułowane wzory Johnsona–Allarda względem znormalizowanych parametrów bezwymiarowych mają służyć do identyfikacji odwrotnej tych parametrów, a w konsekwencji oryginalnych parametrów modelowych. Identyfikacja ta polega w istocie na minimalizacji funkcji celu, zdefiniowanej względem wektora parametrów bezwymiarowych, jako suma kwadratów różnic pomiędzy impedancją akustyczną warstwy zidentyfikowanego materiału porowatego obliczoną z modelu JCAL (lub JCAPL) oraz adekwatnymi wynikami pomierzonymi eksperymentalnie w rurze impedancyjnej. Ponadto zaproponowano, aby w ramach funkcji celu minimalizować jednocześnie różnicę pomiędzy kilkoma krzywymi impedancji: pierwsza z nich jest obliczana i mierzona dla przypadku standardowej konfiguracji, kiedy warstwa materiału porowatego opiera się o sztywne podłoże (sztywne zakończenie rury impedancyjnej), natomiast dodatkowe krzywe wyznaczane są dla tej samej warstwy (próbki) porowatej umieszczonej w konfiguracji dwuwarstwowej, tj. w określonych odległościach od sztywnej ściany; oczywiście zarówno grubość warstwy próbki i jaki warstw powietrza są znane. Bardzo istotną cechą zaproponowanego podejścia, związaną z zastosowaniem częstotliwości normalizujących jest to, że wartości *początkowe* dla poszukiwanego wektora parametrów bezwymiarowych można (należy) przyjmować wszystkie równe 1, co jest dużym praktycznym ułatwieniem. Natomiast dwie częstotliwości skalujące mogą być dobierane dosyć dowolnie, choć w ramach sugerowanych ograniczeń.

W obu pracach przedstawiono przykłady identyfikacji odwrotnej dla modelu JCAL, a więc dla przypadku sześciu parametrów. Najpierw przedstawiono przykład oparty na numerycznych symulacjach badań eksperymentalnych – inny w każdej z prac: w referacie [H-5] wygenerowano krzywe impedancji akustycznej na bazie typowych parametrów materiału porowatego, a następnie zaburzono je za pomocą szumu losowego; natomiast w artykule [H-7] krzywe impedancji wygenerowano nakładając różne losowe zaburzenia bezpośrednio na oryginalne wartości parametrów modelowych. Stosując procedurę identyfikacyjną poprawnie zidentyfiko-

wano parametry modelu w obu przykładach (bardziej wartościowy jest przykład numeryczny z artykułu [H-7]; z rozważań matematycznych wiadomo, że w przypadku omówionym w referacie [H-5] otrzymano bardzo dokładną, ale trywialną identyfikację).

Następnie w obu pracach zaprezentowano test identyfikacyjny przeprowadzony dla rzeczywistego materiału ceramiki porowatej. Dla dwóch próbek tego materiału o różnej grubości, pomierzono w rurze impedancyjnej akustyczną impedancję powierzchniową oraz współczynnik pochłaniania dźwięku dla kilku konfiguracji, tzn. z próbką umieszczoną bezpośrednio na sztywnym podłożu oraz w układzie dwuwarstwowym z lukami powietrznymi o różnej grubości. Pomiar impedancji akustycznej dla pierwszej próbki zastosowano w procedurze identyfikacji parametrów bezwymiarowych, z których następnie wyznaczono parametry modelu JCAL. Zidentyfikowane parametry wykorzystano do obliczenia impedancji akustycznej oraz pochłaniania dźwięku dla warstwy materiału o grubości jak w przypadku drugiej próbki (czyli tej która nie brała udziału w procesie identyfikacji) i rezultaty obliczeń porównano z analogicznymi pomiarami akustycznymi otrzymując dobrą zgodność wyników, co potwierdza poprawność identyfikacji, sugerowaną również przez sensowne wartości zidentyfikowanych parametrów modelowych oraz np. fakt, że zidentyfikowana porowatość jest identyczna z wartością pomierzoną bezpośrednio dla tego typu materiału. Ponadto, należy zauważyć, że identyfikacje przeprowadzone w obu pracach różniły się zastosowanymi częstotliwościami normalizującymi (tzn. w artykule [H-7] przyjęto je inaczej niż w opublikowanym wcześniej referacie [H-5]); otrzymano zatem różne wektory parametrów bezwymiarowych, ale po przeliczeniu ich na parametry modelowe otrzymano mniej więcej te same rezultaty (z dokładnością do niewielkich różnic obliczeniowych wynikających m.in. z innej dyskretyzacji w domenie częstotliwości itp.).

W obszerniejszym artykule [H-7] zamieszczono jeszcze jeden przykład identyfikacji odwrotnej parametrów modelowych, tym razem dla typowej, lekkiej, ale dość sztywnej, izolacyjnej pianki poliuretanowej o bardzo dużej porowatości. W celu ilustracji zastosowania częstotliwości normalizujących pokazano wyniki trzech identyfikacji opartych o te same pomiary próbki pianki w rurze impedancyjnej, a różniących się właśnie doбором tych częstotliwości. Minimalizując funkcję celu dla trzech przypadków par częstotliwości skalujących, wyznaczono trzy wektory parametrów bezwymiarowych o różnym rozrzucie wartości składowych. Jednak obliczone dla każdego przypadku parametry modelu JCAL okazały się być takie same (z dokładnością do trzech cyfr znaczących). Przedyskutowano przy tym pewne aspekty matematyczne związane z uwarunkowaniem problemu identyfikacji: stwierdzono na przykład, że „lepszy” dobór częstotliwości skalujących sprawia, że macierz Hessianu funkcji celu (tj. macierz drugich pochodnych względem parametrów bezwymiarowych) jest lepiej uwarunkowana. Na zakończenie artykułu (w Dodatku) podano nietrywialne, analityczne formuły na gradient funkcji celu, które mogą być wykorzystane przez procedury minimalizujące.

 **PUBLIKACJA [H-3]: "Inverse identification and microscopic estimation of parameters for models of sound absorption in porous ceramics".** W referacie tym przedstawiono pierwotną wersję metody identyfikacji odwrotnej materiałów porowatych, którą w pełni dopracowano później w publikacjach [H-5] i [H-7]. W tej prostszej wersji zakładano między innymi, że parametr porowatości jest znany oraz korzystano tylko z pomiarów w standardowej konfiguracji, gdy próbka materiału porowatego przylega do sztywnej ścianki, stosując zatem w obliczeniach tylko równania propagacji fal w ośrodku jednowarstwowym. Istotnym czynnikiem, który odróżnia tę pracę od późniejszych publikacji (omówionych powyżej) jest koncepcja wspomagania identyfikacji odwrotnej obliczeniami wieloskalowymi, w oparciu o geometrię reprezentatywną skonstruowaną lub wygenerowaną na bazie parametrów znanych i/lub niektórych ze zidentyfikowanych. Pomysł opiera się na założeniu oczywistej korelacji pomiędzy zidentyfikowanymi parametrami, a geometrią mikrostruktury. W tym sensie obliczenia mikrostrukturalne można wykorzystywać do weryfikacji identyfikacji oraz ewentualnie do jej poprawiania ukierunkowując niejako procedury optymalizacji w kierunku minimum związanego z realną geometrią. W omawianej pracy, jako przykład takiego podejścia, pokazano obliczenia parametru przepuszczalności lepkiej na podstawie mikrostruktury periodycznej skonstruowanej dla badanej pianki dzięki znanej porowatości oraz rozpoznany rozmiarom porów i okien je łączących, w celu konfrontacji z wartością zidentyfikowaną.

Zaproponowana koncepcja powiązania identyfikacji odwrotnej z obliczeniami na bazie geometrii mikrostrukturalnej wymaga dopracowania i jest z pewnością pracochłonna. Zaprezentowane badania mikrostrukturalne nie były dalej rozwijane w kontekście prac związanych z identyfikacją odwrotną parametrów transportu, łączą się one natomiast bezpośrednio z tematyką opisaną w punkcie 4.2.3, a w szczególności z pracą [H-6].

4.2.5 Propagacja i pochłanianie dźwięku w materiałach i aktywnych kompozytach porosprężystych

PUBLIKACJE CYKLU: [H-1], [H-2].

Pierwsza z prac prezentuje system do sprzężonego modelowania zagadnień wibroakustyki aktywnych kompozytów bądź struktur, których główną część stanowi ośrodek poro-sprężysty. System ten wykorzystany jest w drugiej pracy do numerycznej analizy oryginalnej koncepcji aktywnego polepszania absorpcji fal akustycznych w materiale poro-sprężystym poprzez optymalne dostosowanie drgań sprężystego szkieletu za pomocą wbudowanych w warstwę materiału cienkościennych struktur z elementami piezoelektrycznymi.

Omawiane publikacje prezentują rozważania teoretyczne, oryginalne koncepcje oraz wyniki analiz numerycznych. Są one wyłącznie mojego autorstwa: wszystkie prace programistyczne oraz analizy numeryczne wykonałem samodzielnie.

PUBLIKACJA [H-1]: "Fundamentals of multiphysics modelling of piezo-poro-elastic structures".

W pracy przedstawione są podstawy teoretyczne modelowania zagadnień, w których ośrodek poro-sprężysty sprzężony jest z elementami wykonanymi z materiałów sprężystych i piezoelektrycznych oraz z ośrodkiem „płynu akustycznego”.


Do modelowania ośrodka poro-sprężystego zastosowano podejście dwufazowe (w ujęciu teorii porosprężystości Biota), w którym mikroskopowo niejednorodny materiał jest zastępowany na poziomie makroskopowym przez dwie zhomogenizowane fazy: fazę stałą (*solid phase*) oraz fazę płynną (*fluid phase*), wypełniające ten sam obszar materiału. Faza stała jest związana ze sprężystym szkieletem i jest opisana równaniami efektywnego dyspersyjnego sprężystego ośrodka ciągłego, natomiast faza płynna opisuje zachowanie się płynu wypełniającego otwarty obszar porów za pomocą efektywnych równań dyspersyjnego nielepkiego płynu akustycznego. Z tego też powodu w takim ośrodku bifazowym pojawiają się trzy fale akustyczne: fala szybka (tzw. *fast wave* lub *solid borne wave*) i fala poprzeczna/ścinająca (*shear wave*) – obie związane z fazą stałą, oraz fala wolna (tzw. *slow wave* lub *fluid borne wave*) – związana z fazą płynną. Propagacja tych fal nie jest niezależna, gdyż pojawiają się człony sprzęgające równania obu faz, które opisują interakcję pomiędzy sprężystą mikrostrukturą ośrodka porowatego i płynem wypełniającym pory. Dyspersja oraz efekty lepkie i termiczne, związane z tą interakcją i z dyssypacją energii propagacji fal, są właściwe dla mikroskali, a ich obecność na poziomie makroskali uwidacznia się tylko we wzorach na makroskopowe współczynniki materiałowe i sprzęgające (zespolone i zależne od częstotliwości).

W pierwszej części pracy podane są równania teorii sprężystości Biota w klasycznym sformułowaniu przemieszczeniowym oraz w tzw. mieszanym sformułowaniu przemieszczeniowo-ciśnieniowym (tj. w opisie wykorzystującym przemieszczenia fazy stałej oraz ciśnienie akustyczne fazy płynnej). Dla tego drugiego sformułowania podana jest całkowita forma słaba. Całkowe sformułowania słabe przypomniane są również dla ośrodka sprężystego, piezoelektrycznego oraz akustycznego wraz z krótkimi dyskusjami warunków brzegowych. Osobno przeprowadzono dokładniejszą dyskusję warunków brzegowych dla ośrodka poro-sprężystego oraz warunków sprzężeń pomiędzy wszystkimi rozpatrywanymi typami ośrodków. Pokazano, że dzięki zastosowaniu sformułowania mieszanego dla ośrodka poro-sprężystego, warunki sprzężenia na granicy pomiędzy tym ośrodkiem, a materiałem sprężystym (bądź piezoelektrycznym) w efekcie upraszczają się tylko do warunku ciągłości przemieszczeń fazy stałej (szkieletu) z przemieszczeniami materiału sprężystego, gdyż odpowiednia całka sprzęgająca na interfejsie pomiędzy obu ośrodkami zeruje się. Podobnie zeruje się całka sprzęgająca na interfejsie pomiędzy dwoma ośrodkami poro-sprężystymi (w formie słabej opisu przemieszczeniowo-ciśnieniowego), więc w implementacji numerycznej, wykorzystującej formę słabą, należy tylko zapewnić ciągłość przemieszczeń pomiędzy fazami stałymi oraz ciśnienia pomiędzy fazami płynnymi.

W kolejnej części pracy wyprowadzono dyskretny model Galerkin dla sprzężonego systemu ośrodków poro-sprężystych, sprężystych, piezoelektrycznych i akustycznych, wychodząc z całkowitego sformułowania słabego grupującego formy słabe dla tych ośrodków wraz ze sprzężeniami pomiędzy ośrodkami. Stosując aproksymację funkcjami kształtu – na nieznaną pola przemieszczeń w ośrodku sprężystym, piezoelektrycznym lub fazie stałej ośrodka poro-sprężystego, ciśnienie akustyczne w ośrodku płynu akustycznego lub fazie płynnej ośrodka poro-sprężystego, wreszcie potencjał elektryczny w materiale piezoelektrycznym – wyprowadzono wzory na składowe macierzy układu oraz wektora prawych stron modelu dyskretnego, a właściwie na ich komponenty, tj. w szczególności na: macierze mas i sztywności dla ośrodka sprężystego (w tym piezoelektrycznego), sprzężeń piezoelektrycznych dla ośrodka piezoelektrycznego, macierze mas i sztywności dla

szkieletu porowatego bez płynu w porach, macierze energii kinetycznej i energii kompresji nielepkiego płynu akustycznego lub fazy płynnej ośrodka poro-sprężystego, macierze sprzężeń kinetycznego (lepko-inercyjnego) i potencjalnego (sprężystego) pomiędzy fazami ośrodka poro-sprężystego, wreszcie macierze sprzężeń na interfejsach pomiędzy różnymi ośrodkami. Przedyskutowano otrzymany układ równań algebraicznych modelu dyskretnego w kontekście zagadnień związanych z dyskretyzacją elementami skończonymi oraz liczbą stopni swobody.

W końcowej części pracy przedstawiono przykład numeryczny wykorzystujący implementację sprzężonego modelu dyskretnego. Zaprezentowano wyniki dwuwymiarowej analizy transmisji fali akustycznej, propagującej się w dukiem powietrznym, przez przegrodę z warstwy pianki poliuretanowej pokrywającej swobodnie podparte pasmo płyty aluminiowej z naklejoną centralnie po drugiej stronie piezoelektryczną „łatką” ceramiki PZT. Pokazano między innymi wyniki transmisji przez pasywne pasmo płytowe bez poro-sprężystej warstwy pianki oraz z tą warstwą modelowaną przy użyciu liniowych lub kwadratowych funkcji kształtu. Obecność warstwy pianki powodowała redukcję transmisji hałasu w dwóch zaobserwowanych częstotliwościach rezonansowych oraz generalne zwiększenie redukcji transmisji hałasu dla częstotliwości powyżej drugiego rezonansu. W niskich częstotliwościach warstwa pianki nie była efektywna. Przeprowadzono analizę parametryczną aktywnej redukcji hałasu (z wykorzystaniem elementu piezoelektrycznego) dla częstotliwości pierwszego rezonansu: znaleziono wartość amplitudy sygnału elektrycznego potrzebną do wytłumienia transmisji hałasu w rezonansie.

 **PUBLIKACJA [H-2]: "Numerical investigation of active porous composites with enhanced acoustic absorption"**. Praca prezentuje numeryczną analizę oryginalnego konceptu aktywnych kompozytowych absorberów hałasu, składających się z warstwy materiału poro-sprężystego z zatopionymi strukturami sprężystymi oraz aktywnymi elementami z materiału piezoelektrycznego. Zadaniem takiego aktywnego kompozytu jest dyssypacja energii fal akustycznych w szerokim zakresie częstotliwości, w tym zwłaszcza ulepszona dyssypacja dla fal o niższych częstotliwościach, słabo absorbowanych przez warstwę materiału pasywnego. Grubość kompozytu powinna być niewielka, gdyż celem zastosowania mogą być np. dźwiękochłonne wykładziny w lotnictwie. Aktywne części w warstwie kompozytu mają za zadanie również adaptować jego własności absorpcyjne do różnych warunków hałasu. Istotą proponowanej metody jest to, że dostarczając niewielką energię elektryczną do elementów piezoelektrycznych można w odpowiedni sposób wpływać na drgania sprężystego szkieletu ośrodka porowatego, zmieniając ich charakter, fazę (w stosunku do fazy harmonicznych fal akustycznych penetrujących materiał porowaty), czy wręcz wzbudzać drgania wzmacniające dyssypację energii fal poprzez ukierunkowanie interakcji pomiędzy szkieletem, a powietrzem w porach. Uzasadnieniem dla tego podejścia jest fakt, że to właśnie tarcie pomiędzy cząstkami powietrza, a szkieletem jest głównym mechanizmem rozpraszania energii fal.

Z punktu widzenia propagacji fal w ośrodkach poro-sprężystych proponowana technika polega na: (1) dostosowaniu fali szybkiej, propagującej się głównie dzięki obecności szkieletu (jest więc to tzw. *solid-borne wave*), w ten sposób, aby interakcja z falą wolną, której nośnikiem jest głównie powietrze wypełniające pory (jest więc to tzw. *fluid-borne wave*), dawała jak najlepszą dyssypację energii; (2) ewentualnie, wzbudzeniu fali szybkiej, o ile szkielet jest na tyle sztywny, że fale akustyczne propagujące się w powietrzu i penetrujące otwarte pory, nie powodują jego drgań. W obu przypadkach mamy tu w efekcie do czynienia z zachowaniem poro-sprężystym ośrodka. Genezą pomysłu jest obserwacja, że w przypadku propagacji „akustycznie wzbudzonych” fal w ośrodku poro-sprężystym, obie fale, szybka i wolna, są silnie sprzężone, zwłaszcza w niższych częstotliwościach (w przypadku wyższych częstotliwości następuje rozprężanie propagacji tych fal, a następnie zwykle zmniejszenie się amplitudy i w efekcie zanik fali szybkiej, związanej z lepko-sprężystym szkieletem).

W celu przetestowania zaproponowanej idei, przeanalizowano sześć konfiguracji, począwszy od samej (mezo- i makroskopowo jednorodnej) warstwy poro-sprężystej o ustalonej grubości, poprzez warstwę kompozytu poro-sprężystego z osadzonymi periodycznymi strukturami wykonanymi z aluminiowej folii albo z materiału piezoelektrycznego, aż po periodycznie rozmieszczone cienkościenne struktury w kształcie litery „T” wykonane częściowo z aluminium, a po części z materiału piezoelektrycznego. W celach porównawczych przyjęto, że grubość warstwy/kompozytu jest zawsze taka sama.

Wszystkie analizy numeryczne przeprowadzone zostały dla dwóch przypadków różniących się zastosowanym materiałem poro-sprężystym. Były to dwie pianki poliuretanowe o znanych parametrach mikrostruktury i niezbyt sztywnym szkielecie, tak, że staje się on nośnikiem fal akustycznych penetrujących piankę, na równi z powietrzem wypełniającym pory. Obie pianki są bardzo dobrymi lekkimi materiałami dźwiękochłonnymi i

często są wykorzystywane jako rdzenie izolatorów akustycznych, ich porowatości są otwarte i wynoszą odpowiednio 97% i 99%.

Najpierw przeanalizowano zagadnienie absorpcji hałasu przez warstwy samych pianek oraz kompozyty z pasywnymi strukturami, a więc wtedy, gdy żaden sygnał elektryczny nie jest wysyłany na elektrody elementów piezoelektrycznych lub w przypadku, gdy takie elementy w ogóle nie występują. Struktury pasywne usztywniają warstwę poro-sprężystą, a w przypadku swobodnie rozmieszczonych kawałków folii aluminiowej dochodzi jeszcze istotny efekt lokalnie dodanej masy (na odpowiedniej głębokości w warstwie). Zasadniczej zmianie ulega wtedy między innymi częstotliwość rezonansowa szkieletu. Efekty z tym związane zostały zaobserwowane podczas analiz numerycznych. Generalnie, dla większości struktur (w tym struktury „T” z pasywnym elementem piezoelektrycznym) następowało przesunięcie rezonansu do wyższych częstotliwości w stosunku do warstwy jednorodnej, co wiązało się z polepszeniem pochłaniania dźwięku w niższych częstotliwościach z równoczesnym osłabieniem w kolejnym zakresie średnich częstotliwości. Ponadto dla częstotliwości wyższych niż około 2.5-3 kHz (gdzie absorpcja fal była generalnie bardzo dobra) nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy warstwami jednorodnymi, a kompozytami ze strukturami pasywnymi.

Zanim przystąpiono do analiz „aktywnego” pochłaniania dźwięku, porównano amplitudę drgań szkieletu pianek poliuretanowych dla harmonicznego obciążenia ciśnieniem akustycznym o amplitudzie odpowiadającej hałasowi o natężeniu 100 dB, z możliwą do uzyskania amplitudą wydłużenia elementów piezoelektrycznych wykonanych z popularnej ceramiki PZT o znanych parametrach materiałowych. Okazało się, że porównywane amplitudy są podobnej wielkości już przy zastosowaniu sygnałów elektrycznych o amplitudzie 20 V. Piezoelektryczne części aktywnych struktur usytuowane są w poprzek warstwy kompozytu, tak, że ich wydłużenie powoduje ruch szkieletu (a raczej małe odkształcenia na makroskopowym poziomie fazy stałej) przede wszystkim na kierunku propagacji fal. Nie powoduje to jednak zmiany mikrogeometrii szkieletu, tzn. parametry transportu takie jak porowatość, przepuszczalność, krętość mikrostruktury itp., związane bezpośrednio z geometrią oraz wielkością porów i łączących je okien, nie ulegają zmianie w wyniku małych deformacji spowodowanych przez aktywnie wzbudzone drgania szkieletu, tak samo jak penetrujące materiał fale akustycznych nie powodują zmiany geometrii mikrostruktury. Wszystko odbywa się w ramach małych odkształceń i przemieszczeń, co pozwala stosować modele w pełni liniowe. Do wszystkich analiz (zarówno pasywnych jak i aktywnych) zastosowano zatem sprzężony model opisany w pracy [H-1], uwzględniający sprzężenia pomiędzy różnymi ośrodkami, w tym obu fazami materiału poro-sprężystego. Pokazano jednak, że w przypadku elementów piezoelektrycznych można stosować uproszczenie, pomijając efekt piezoelektryczny prosty, a efekt odwrotny zastępując, odpowiednio wyznaczonymi, harmonicznymi zmiennymi odkształceniami wstępnymi. Stosowano jednak model w pełni sprzężony. W niektórych analizach uwzględniono również warstwę powietrza przed warstwą kompozytu.

Dla istotnego zakresu częstotliwości poniżej 2.5 kHz, porównano pochłanianie dźwięku przez warstwy pianek poliuretanowych z rezultatami uzyskanymi dla odpowiadających im kompozytów z periodycznie rozmieszczonymi strukturami typu „T”, korygującymi ruch szkieletu, dzięki elektrycznym sygnałom harmonicznym o odpowiedniej amplitudzie i fazie, działającym na elementy piezoelektryczne. Wyniki tłumienia aktywnego były najlepsze w całym zakresie częstotliwości i znacząco lepsze zwłaszcza w szeroko rozumianych okolicach częstotliwości rezonansowych. Wynikało to co prawda z optymalnie dobranej amplitudy i fazy sygnału zależnie od częstotliwości fal. Pokazano jednak, że w zasadzie jedna wartość przesunięcia fazowego daje już wystarczająco dobre rezultaty w całym badanym zakresie. Pozwala to na praktyczne uproszczenie systemu kontroli sygnału.

W celu analizy ruchu szkieletu optymalnego dla dyssypacji energii fal akustycznych, dla paru wybranych częstotliwości przeanalizowano wzajemny ruch obu faz poro-sprężystego ośrodka bifazowego, tj.: fazy stałej (szkieletu) i płynnej (powietrza w porach), jak również amplitudy i kąty fazowe obu faz w przypadku pianki bez struktury oraz ze strukturą „T” pasywną i aktywną.

Na zakończenie (Dodatek A) przedyskutowano zasadność makroskopowego uśrednienia rezultatów dla kompozytu mezoskopowo niejednorodnego, gdzie pasywne bądź aktywne struktury sprężyste są dosyć gęsto rozmieszczone w warstwie materiału poro-sprężystego na sposób periodyczny. Pochłanianie dźwięku przez kompozyt poro-sprężysty wyznaczane jest na podstawie drgań obu faz (płynnej i stałej) na powierzchni kompozytu, należy jednak pamiętać, że wynika to oczywiście z propagacji i interferencji fal padających i odbitych w całym wnętrzu kompozytu. Ze względu na niejednorodność budowy kompozytu na poziomie mezoskopowym, drgania na jego powierzchni zależeć będą od położenia względem cienkościennych struktur sprężystych periodycznie rozmieszczonych wewnątrz warstwy. Pochłanianie dźwięku oceniano na poziomie makroskopowym, co wymagało pewnego uśrednienia drgań po powierzchni kompozytu. Pokazano jednak, że to podejście

jest bardzo dokładne, zwłaszcza w istotnym zakresie częstotliwości poniżej 3 kHz, ze względu na znikome różnice pomiędzy wynikami obliczonymi dla różnych punktów na powierzchni kompozytu.

4.2.6 Podsumowanie

Poniżej wyszczególniam dokonania, które uważam za najważniejsze i oryginalne osiągnięcia w ramach zaprezentowanego cyklu publikacji naukowych; są nimi:

- Metoda projektowania zoptymalizowanej mikrostruktury dźwiękochłonnych pianek o otwartych porach w kształcie kulistym, oparta o algorytm do generowania *semi*-losowych periodycznych konfiguracji porów oraz wykorzystująca modelowanie wieloskalowe.
- Opracowanie metodologii identyfikacji odwrotnej parametrów mikrostruktury ośrodka porowatego, wykorzystywanych przez modele Johnsona–Allarda (oraz Biota–Allarda); oryginalna propozycja normalizacji tych parametrów (wprowadzenie tzw. częstotliwości skalujących) w celu stabilizacji metody identyfikacji odwrotnej; podanie wzorów dla modeli Johnsona–Allarda (JCAL i JCAPL) oraz na gradient funkcji celu względem zaproponowanych znormalizowanych parametrów bezwymiarowych.
- Zaproponowanie koncepcji wspomagania identyfikacji odwrotnej parametrów mikrostruktury ośrodka porowatego obliczeniami wielo-skalowymi na bazie reprezentatywnej geometrii mikrostrukturalnej.
- Oryginalna koncepcja aktywnego kompozytu dźwiękochłonnego o polepszanej wydajności (adaptowanej do warunków hałasu), dzięki aktywnemu dostosowaniu drgań mikrostruktury porowatej; wykazanie (za pomocą analiz numerycznych) istnienia postulowanego efektu dla typowego dźwiękochłonnego materiału porowatego z zatopionym elementem piezoelektrycznym, już przy niewielkich amplitudach napięcia sterującego sygnału elektrycznego i niezbyt dokładnej kontroli fazy sygnału.
- Publikacje [H-4] i [H-6] (a w mniejszym zakresie również [H-3]) – prezentujące rozważania teoretyczne oraz zaawansowane analizy numeryczne w konfrontacji z wynikami doświadczalnymi (walidacja eksperymentalna!) – stanowią istotny wkład w badania związku pomiędzy mikrostrukturą ośrodków porowatych, a propagacją i tłumieniem fal akustycznych w takich ośrodkach.

Ponadto w ramach prowadzonych przeze mnie prac badawczych samodzielnie zrealizowałem następujące istotne zadania programistyczne:

- Oprogramowanie systemu (bazującego na rozwiązaniach analitycznych) do obliczeń propagacji fal płaskich w wielowarstwowych układach składających się z dowolnych konfiguracji warstw: sprężystego materiału lub płynu „akustycznego”, ośrodka porowatego o sztywnym szkielecie (modele Johnsona–Allarda i inne: Delany–Bazley–Miki, Attenborough itd.), materiału poro-sprężystego (model Biota–Allarda).
- Implementacja sformułowania całkowego (tj. „słabego”) dla obliczeń numerycznych układów składających się z ośrodków porowatych (modele Johnsona–Allarda) i poro-sprężystych (model Biota–Allarda: sformułowanie $\mathbf{u}-P$ o czterech stopniach swobody w węźle, a także sformułowanie $\mathbf{u}-U$ o sześciu stopniach swobody), materiałów piezoelektrycznych (sformułowanie $\mathbf{u}-V$) i sprężystych, oraz płynu „akustycznego”, z uwzględnieniem wszelkich możliwych sprzężeń pomiędzy ośrodkami. System opracowano w zintegrowanych środowiskach *MATLAB* i *COMSOL Multiphysics* z wykorzystaniem wyrażień symbolicznych.
- Zaprogramowanie systemu do generowania i inspekcji periodycznych porowatych mikrostruktur reprezentatywnych dla pianek o porach kulistych, którego główną część stanowi algorytm dynamicznego mieszania kul z zachowaniem periodyczności układu.
- Stworzenie systemu do wieloskalowego modelowania ośrodków porowatych w oparciu o elementy objętościowe (a także dwuwymiarowe) reprezentatywne dla ich mikrostruktury. Procedury systemu zaprogramowane zostały w środowisku *MATLAB* oraz sprzężone z opartymi o wyrażenia symboliczne implementacjami problemów „mikrostrukturalnych” w środowisku *COMSOL Multiphysics*. Dzięki zastosowaniu pakietu *MATLAB-LiveLink* wszystkie implementacje w środowisku *COMSOL Multiphysics*

wykonano z poziomu programu *MATLAB*; dotyczą one sformułowań całkowych dla dwóch zagadnień o wymuszeniach harmonicznym, mianowicie: zagadnienia harmonicznego przepływu lepkiego przeskalowanego do wymiaru przepuszczalności (lepkiej) oraz harmonicznego przepływu ciepła przeskalowanego do wymiaru przepuszczalności (termicznej) – a także dla trzech zagadnień „statycznych”, mianowicie: przeskalowanego przepływu Stokes’a, przeskalowanego problemu ustalonego przepływu ciepła, oraz przeskalowanego zagadnienia Laplace’a.

- Implementacja procedur dla identyfikacji odwrotnej parametrów dźwiękochłonnych materiałów porowatych na bazie modeli Johnsona–Allarda oraz krzywych impedancji akustycznej uzyskanych eksperymentalnie.

5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5.1 Ewolucja zainteresowań i kompetencji naukowych

Od czasu studiów na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (WIL PW) moje zainteresowania naukowe przeszły istotną ewolucję. Bazę dla rozwoju naukowego stanowiły jednak poznane na specjalizacji Teoria Konstrukcji WIL PW: aparat matematyczny (m.in. rachunek tensorowy i wariacyjny, geometria różniczkowa, Metoda Elementów Skończonych) oraz szeroko pojęta Mechanika Konstrukcji i Mechanika Ośrodków Ciągłych – utrwalone i rozszerzone o dodatkową wiedzę podczas studiów doktoranckich w IPPT PAN.

Podczas pracy nad moim dyplomem magisterskim zajmowałem się problemem nośności granicznej walcowych powłok zbrojonych, poddanych obciążeniu materiałem sypkim, cieczą itp. Zadania tego typu wiążą ze sobą nietrywialnie zagadnienia mechaniki konstrukcji oraz materiałów, tzn.: zarówno mechanikę powłok cienkościennych jak i zagadnienia plastyczności materiałów i kompozytów (warunki plastyczności i ich transformacja do przestrzeni sił wewnętrznych powłoki, stowarzyszone prawo płynięcia itp.).

Z kolei w pracy doktorskiej badałem (stosując głównie metody komputerowe mechaniki) zastosowanie tzw. Metody Dystorsji Wirtualnych (MDW) do modelowania i identyfikacji defektów w konstrukcjach. W tym celu opracowałem oryginalną Impulsową Metodę Dystorsji Wirtualnych jako nietrywialne uogólnienie MDW na zagadnienia dynamiki konstrukcji. Zaproponowałem również uogólnienie podstawowego pojęcia tzw. *dystorsji wirtualnej* na przypadek w zasadzie dowolnego elementu skończonego, dla konstrukcji dowolnego typu (krata, belka, tarcza, płyta, powłoka). Stworzyłem własny obiektowy program komputerowy, składający się z dwóch współpracujących ze sobą podprogramów, tj.: (1) implementacji opracowanych przeze mnie algorytmów IMDW i MDW oraz (2) uniwersalnego systemu Metody Elementów Skończonych (MES) dla konstrukcji ramowo-kratowych z uwzględnieniem *dystorsji wirtualnych*, pozwalającym na ich zastosowanie do modelowania i identyfikacji defektów oraz w zagadnieniach wrażliwości strukturalnej i przemodelowania tego typu konstrukcji.

W trakcie pracy nad doktoratem brałem udział w europejskim projekcie badawczym *PIEZODIAGNOSTICS – Smart Structural Diagnostics using Piezo-Generated Elastic Waves*, gdzie stosowałem zaproponowane przeze mnie rozwiązania w ramach badań związanych z monitorowaniem stanu technicznego konstrukcji, w oparciu o czujniki i aktywatory wykorzystujące materiały piezoelektryczne, co wiązało się również z modelowaniem tego typu materiałów. Kontakty nawiązane podczas tego projektu, oraz – jak sądzę – ocena moich kompetencji związanych z modelowaniem materiałów, zaowocowała zaproszeniem mnie do dalszej współpracy, na studia po-doktoranckie do *Ecole Centrale de Lyon* we Francji, gdzie m.in. brałem udział we francuskim projekcie badawczym *CAHPAC – Capotage Acoustique Hybride Passif/Actif*. Zapoznałem się tam z tematyką dotyczącą wibroakustyki oraz akustyki fizycznej, a przede wszystkim rozpocząłem moje badania związane z mechaniką materiałów porowatych oraz modelowaniem aktywnych paneli sandwichowych o rdzeniu poro-sprężystym i elementach aktywnych z materiału piezoelektrycznego. Mój pobyt w *Ecole Centrale de Lyon* zaowocował wspólnymi publikacjami oraz współpracą i kontaktami trwającymi do dziś.

Po powrocie do kraju, jako pracownik Zakładu Technologii Inteligentnych IPPT PAN, kontynuowałem badania naukowe związane z wibroakustyką, a w szczególności z aktywnymi i adaptacyjnymi systemami wibroakustycznymi, będąc kierownikiem projektu *Smart Vibroacoustics* (jednego z trzech równorzędnych podprojektów Programu *TEAM Smart Technologies for Safety Engineering – SMART and SAFE*). W tym czasie moje zainteresowania i prace badawcze zaczęły niejako biec dwutorowo: oprócz zagadnień wibroakustycznych

oraz dotyczących tzw. materiałów i konstrukcji „inteligentnych”, gdzie wykorzystywałem i modelowałem m.in. materiały piezoelektryczne, ciecze magnetoreologiczne, a także materiały poro-sprężyste w ujęciu makroskopowym, coraz bardziej zacząłem interesować się mechaniką ośrodków porowatych, w tym przede wszystkim propagacją i tłumieniem fal akustycznych w dźwiękochłonnych ośrodkach porowatych i włóknistych, co zawoocowało badaniami opisanymi w cyklu publikacji, który prezentuję jako moje główne osiągnięcie naukowe (omówione w punkcie 4).

Badania nad związkiem pomiędzy mikrostrukturą ośrodków porowatych, a makroskopową propagacją fal w tego typu materiałach, bezpośrednio przyczyniły się do mojego zainteresowania modelowaniem wieloskalowym, technikami homogenizacji oraz różnymi zagadnieniami fizycznymi, w tym przede wszystkim mechaniką płynów. Doświadczenia nabyte w modelowaniu sprzężonych zagadnień fizycznych różnego typu zawoocowały semestralnym wykładem autorskim (prowadzonym przeze mnie od 2006 roku) oraz skryptem pt.: *"Introduction to Modelling of Multiphysics Problems"*. Szerzej na ten temat piszę w punkcie 5.3.

Z kolei badania wibroakustyczne spowodowały również moje zainteresowanie technikami identyfikacji źródeł dźwięku – za pomocą tzw. metody formowania wiązki fali (*beamforming*) oraz holografii akustycznej (*acoustic holography*). W środowisku *MATLAB* stworzyłem własne oprogramowanie zawierające zarówno procedury i algorytmy dla metody identyfikacji odwrotnej formowania wiązki fali (*inverse beamforming*), jak i graficzne interfejsy użytkownika pozwalające na interaktywną wizualizację wyników.

Mój udział w projektach *AEROCHINA2 – Multiphysics Modelling, Simulation, Experimentation and Design Methods in Aeronautics*, oraz *PKAERO – Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym*, ukierunkował moje badania w stronę zastosowań w lotnictwie. Wiązało się to przede wszystkim: (1) z badaniami i modelowaniem kompozytów lotniczych w aktywnych systemach wibroakustycznych w celu tłumienia hałasu wewnątrz kabiny statku powietrznego, w tym również z badaniami doświadczalnymi na rzeczywistych obiektach lotniczych (helikopter i wiatrakowiec) dzięki współpracy z Instytutem Lotnictwa w Warszawie; (2) z badaniem możliwości zastosowania żaroodpornych materiałów porowatych w tłumiących hałas osłonach silników.

W 2012 roku zostałem ponownie zaproszony do Francji (m.in. przez *Ecole Centrale de Lyon*) w celu pomocy we francuskim projekcie badawczym dotyczącym sterowania mikro-przepływami (*Microfluidics*). Moim głównym zadaniem było zaawansowane, w pełni sprzężone modelowanie wzbudzenia (za pomocą piezokryształów) oraz propagacji fal akustycznych w mikro-kanalach wypełnionych płynem (*Acoustofluidics*). W tym celu opracowałem i zaimplementowałem w środowisku *MATLAB* procedury do obliczeń propagacji fal powierzchniowych Rayleigha oraz fal Lamba w ośrodkach anizotropowych, w tym również w materiałach (kryształach) piezoelektrycznych. Ponadto, stworzyłem w środowisku *COMSOL Multiphysics* w pełni sprzężony model MES dla badanego doświadczalnie zagadnienia, w którym fale powierzchniowe wygenerowane przez elektrody przetworników „międzypalczastych” (IDT) na powierzchni piezoelektrycznego kryształu niobianu litu wzbudzają fale akustyczne w umieszczonym na tej powierzchni mikro-kanale wypełnionym cieczą.

W 2014 roku, w ramach projektu EU SMART-NEST, dotyczącego współpracy pomiędzy ośrodkami naukowymi a przemysłem, zostałem zaproszony na 5 miesięcy do pracy w dziale badawczo-rozwojowym znanej firmy mechatronicznej *CEDRAT Technologies* w Meylan (k. Grenoble) we Francji, gdzie moje doświadczenie związane z badaniami wibroakustycznymi wykorzystałem w celu opracowania i implementacji strategii wyciszenia silniczków piezoelektrycznych produkowanych przez tę firmę. Jedno z zaproponowanych przeze mnie rozwiązań zostało wdrożone¹⁵.

5.2 Dorobek publikacyjny w czasopismach z bazy JCR, po uzyskaniu stopnia doktora i spoza cyklu habilitacyjnego

Poniżej krótko referuję 7 prac spoza cyklu publikacji mojego osiągnięcia naukowego, opublikowanych w czasopismach z bazy JCR (*Journal Citation Reports*), indeksowanych przez *Web of Science*, a więc z ministerialnej listy A. Wszystkie te prace dotyczą zagadnień, którymi zacząłem zajmować się po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora. Jedna z tych publikacji jest wyłącznie mojego autorstwa, a w przypadku pozostałych jestem pierwszym (3×), bądź drugim (3×) ze współautorów i w tych przypadkach charakteryzuję mój wkład

¹⁵Załączam dokument poświadczający wykonanie ekspertyz i opracowanie strategii redukcji hałasu, wystawiony przez *CEDRAT Technologies*.

pracy w daną publikację, szacując również mój udział procentowy. Pełne dane bibliograficzne dla poniższych prac podaje w punkcie 6.1.1.

☰ PUBLIKACJA [W-1]: "Determination of the free-field acoustic radiation characteristics of the vibrating plate structures with arbitrary boundary conditions". W pracy zaprezentowany jest algorytm implementacji pośredniej (wariacyjnej) metody elementów brzegowych (MEB) dla obliczeń w polu swobodnym promieniowania akustycznego drgających konstrukcji płytowych o prostokątnym kształcie i dowolnych warunkach zamocowania na brzegu. W celu znaczącej redukcji kosztów obliczeń numerycznych, algorytm uwzględnia prostą geometrię problemu i symetrię pomiędzy elementami brzegowymi. Procedura wyznaczania rozkładu ciśnienia akustycznego została zilustrowana na przykładzie cienkiej płyty prostokątnej utwierdzonej na fragmencie jednego z boków, a całym pozostałym brzegu swobodnym. Częstości własne i odpowiadające im postacie drgań własnych płyty obliczono wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES), a następnie wykorzystano je w obliczeniach algorytmem MEB. Wyniki symulacji numerycznych porównano z rezultatami doświadczeń przeprowadzonych w komorze bezdechowej, uzyskując dobrą zgodność pomiędzy obliczeniami, a obserwacjami eksperymentalnymi.

Jestem drugim spośród dwóch współautorów tej pracy. W ramach opieki naukowej nad pierwszym autorem pracy, brałem udział w pisaniu fragmentów pracy oraz odpowiedzi na recenzje. Mój wkład szacuję na 30%.

☰ PUBLIKACJA [W-5]: "Acoustic absorption of a new class of alumina foams with various high-porosity levels". Praca przedstawia wyniki badań akustycznych ceramicznych pianek korundowych o stosunkowo wysokich porowatościach. Wykonane analizy porównawcze z typowymi piankami poliuretanowymi o dobrych własnościach pochłaniania dźwięku pozwalają wnioskować o bardzo dobrej dźwiękochłonności niektórych z przebadanych pianek ceramicznych, a mianowicie tych o wysokiej porowatości otwartej. Badania te – po raz pierwszy przeprowadzone dla tego materiału – wskazują na jego duży potencjał w przypadku zastosowań do izolacji akustycznej, zwłaszcza tam, gdzie wymagana jest również ogniotrwałość materiału. Przeprowadzono dyskusję tłumienia fal akustycznych przez ceramikę porowatą w kontekście zbadanej morfologii pianek ceramicznych.

Jestem pierwszym spośród czterech współautorów tej pracy. Wykonałem wszystkie eksperymenty akustyczne oraz analizy porównawcze krzywych pochłaniania dźwięku. Przeprowadziłem badania literaturowe i napisałem pracę wykorzystując materiały dotyczące wytwarzania i morfologii pianek ceramicznych dostarczone przez drugiego autora. Jako główny autor przeprowadziłem cały proces publikacyjny. Mój wkład oceniam na 60%.

☰ PUBLIKACJA [W-6]: "Modal sensitivity and selectivity of small, rectangle-shaped piezoelectric transducers used as sensors and actuators in active vibroacoustic control systems". W pracy skupiono się na zagadnieniu zastosowania niewielkich przetworników piezoelektrycznych w postaci prostokątnych płytek („łatek”), zarówno jako czujniki oraz aktywatory w systemach aktywnej kontroli wibroakustycznej dla belek oraz płyt i konstrukcji panelowych o dowolnych (niejednorodnych) warunkach podparcia/zamocowania na brzegach. Zaproponowano nową postać opisu prostego systemu proporcjonalnej kontroli aktywnej z wieloma niezależnymi pętlami sprzężenia zwrotnego. Wprowadzono funkcje wrażliwości modalnej dla czujników oraz aktywatorów, w celu opisu ich zdolności do mierzenia lub (odpowiednio) wzbudzania określonych modów konstrukcji. Przeanalizowano wpływ charakterystyk modalnych przetworników na stabilność aktywnego systemu kontroli oraz jego wydajność, opierając się na przyjętej formie funkcji celu oraz wyprowadzonych równaniach systemu kontroli. Wyniki rozwiązań analitycznych oraz symulacje numeryczne porównano z rezultatami eksperymentalnymi przeprowadzonymi dla różnych struktur belkowych i płytowych, wykonanych z aluminium lub materiałów kompozytowych, w tym kompozytów lotniczych, udowadniając przydatność zaprezentowanych koncepcji.

Jestem drugim spośród dwóch współautorów tej pracy. Wpisuje się ona w moje badania związane z aktywnymi systemami wibroakustycznymi. W ramach opieki naukowej nad pierwszym autorem pracy, brałem udział w niektórych testach eksperymentalnych, konsultowałem obliczenia numeryczne, brałem udział w pisaniu fragmentów pracy oraz odpowiedzi na recenzje. Mój wkład szacuję na 30%.

📄 PUBLIKACJA [W-7]: "Fully-coupled finite-element modeling of active sandwich panels with poro-elastic core". Praca prezentuje wibroakustyczne analizy numeryczne aktywnego panelu sandwiczowego o licach aluminiowych, z rdzeniem wykonanym z lekkiego materiału poro-sprężystego. Na wierzchu jednej z płyt licowych przymocowany jest element aktywny w postaci płytki z materiału piezoelektrycznego. Zatem pasywne własności tłumienne porosprężystego rdzenia, efektywne w zakresie wyższych i średnich częstotliwości, mogą być wykorzystane wspólnie z tłumieniem aktywnym, niezbędnym w przypadku niższych częstotliwości. Rozpatrywany jest kołowy wycinek panelu w ten sposób, że wyniki analiz numerycznych mogą posłużyć do oszacowania zachowania się większej połaci panelu z regularnie rozmieszczonymi aktywatorami piezoelektrycznymi, jak również dla ewentualnych badań eksperymentalnych z takim kołowym wycinkiem panelu umieszczonym w standardowej rurze falowodu do pomiarów redukcji transmisji akustycznej. W analizach uwzględniona jest również interakcja z fragmentem falowodu wypełnionego powietrzem. Do obliczeń Metodą Elementów Skończonych (MES) wykorzystano sprzężony system dla ośrodków sprężystego, poro-sprężystego, piezoelektrycznego i akustycznego, zaimplementowany dla zagadnień 3D oraz w przypadku 2D z wykorzystaniem symetrii kołowej. Ważne kwestie zbieżności sprzężonego modelowania MES tego typu paneli badane są w odniesieniu do istotnego parametru całkowitej redukcji transmisji akustycznej. W końcu, wyznaczone są optymalne amplitudy napięcia elektrycznego dla sygnałów wykorzystywanych w tłumieniu aktywnym w zakresie niższych częstotliwości i w zależności od względnego rozmiaru aktywatora piezoelektrycznego.

Jestem pierwszym spośród trzech współautorów tej pracy. Praca prezentuje moje pomysły na bazie wspólnych koncepcji opracowywanych we współpracy w pozostałymi autorami. Wszystkie implementacje programistyczne i analizy numeryczne wykonałem samodzielnie. Napisałem całą pracę uwzględniając komentarze i sugestie współautorów oraz jako główny autor przeprowadziłem cały proces publikacyjny. Mój wkład oceniam na 80%.


📄 PUBLIKACJA [W-9]: "Multiphysics modeling and experimental validation of the active reduction of structure-borne noise". Praca ta prezentuje w pełni sprzężone modelowanie problemu aktywnej redukcji hałasu generowanego przez drgającą cienką płytę. Płyta jest specjalnie wzbudzana w drgania, które powodują istotny hałas o niskiej częstotliwości; następnie hałas ten jest wytłumiany przy użyciu aktywatorów w postaci prostokątnych płytek piezoelektrycznych przyklejonych do płyty przy pomocy żywicy epoksydowej, w lokalizacjach wyselekcjonowanych wcześniej dzięki analizom numerycznym. W tym celu, podano sformułowanie słabe sprzężonego systemu uwzględniającego wszystkie występujące w zagadnieniu materiały i ośrodki. Modelowanie jest bardzo dokładne: aktywatory piezoelektryczne są modelowane zgodnie z elektromechaniczną teorią piezoelektryczności, uwzględnione są warstwy żywicy epoksydowej, jak również interakcja pomiędzy całą konstrukcją płyty, a otaczającym ją powietrzem, którego duży fragment modelowano, zadając na brzegu odległym od płyty odpowiednie warunki brzegowe symulujące brak odbicia fal akustycznych, czyli warunki spotykane w komorze bezechowej, w której wykonywano wszystkie eksperymenty. Wyniki analiz numerycznych porównane są z wieloma rezultatami eksperymentalnymi. Poziomy ciśnienia akustycznego obliczone w różnych odległościach od płyty znakomicie zgadzają się z pomiarami wykonanymi w tych punktach w komorze bezechowej. Również obliczone amplitudy napięcia elektrycznego sygnału kontrolnego (dla aktywnej redukcji hałasu drgań) okazały się być dobrymi oszacowaniami.

Jestem jedynym autorem tej pracy. Wszystkie prace programistyczne, analizy numeryczne oraz badania eksperymentalne wykonałem samodzielnie, zatem mój wkład wynosi 100%.

📄 PUBLIKACJA [W-11]: "Acoustic absorption of foams coated with MR fluid under the influence of magnetic field". Praca prezentuje oryginalną koncepcję oraz eksperymentalne testy funkcjonalności „inteligentnego” dźwiękochłonnego materiału porowatego, którego własności można polepszać i adaptować do różnych warunków hałasu, za pomocą pola magnetycznego. W tym celu, szkielet miękkiej pianki o porowatości otwartej pokrywany jest cienką warstwą płynu magneto-reologicznego (MR). Aby sprawdzić działanie pomierzono dźwiękochłonność kilku pianek poliuretanowych o jedno- i dwu-skalowej (dualnej) porowatości – bez oraz z pokryciem warstwą MR-płynu. Testy wykonano w trzech etapach: dla czystych pianek, dla pianek o szkielecie powlekanym płynem magneto-reologicznym, oraz dla próbek powlekanymi umieszczonych w polu magnetycznym. Zaobserwowano dwa znaczące, sterowalne efekty na krzywej ilustrującej zależność współczynnika pochłaniania dźwięku od częstotliwości, zwłaszcza w przypadku pianek o dualnej porowatości.

W porównaniu do pianek czystych lub eksperymentów bez obecności pola magnetycznego, najbardziej istotne maksimum na krzywej absorpcji akustycznej było przesunięte w dziedzinie częstotliwości za pomocą przyłożonego pola magnetycznego. Ponadto, w szerokim paśmie częstotliwości za tym maksimum występowało znaczące polepszenie absorpcji.

Jestem pierwszym spośród dwóch współautorów tej pracy, w której prezentowane są oryginalne koncepcje mojego autorstwa. Badania eksperymentalne wykonałem przy istotnym współudziale drugiego autora. Jako główny autor przeprowadziłem cały proces publikacyjny. Mój wkład oceniam na 65%.

 **PUBLIKACJA [W-12]: "A finite-element study of a piezoelectric/poroelastic sound package concept".** W pracy zaprezentowany jest kompletny opis koncepcji pasywno-aktywnego pakietu numerycznego Metody Elementów Skończonych (MES) dla projektowania izolacji akustycznej, zwykle w postaci panelu sandwiczowego z poro-sprężystym rdzeniem oraz aktywnymi elementami w formie naklejonych płytek piezoelektrycznych, tak aby zapewnić wysoką sprawność izolacyjną panelu w zakresie zarówno średnich/wysokich jak i niskich częstotliwości. Wszystkie warstwy panelu są modelowane w środowisku *COMSOL Multiphysics*. Sprzężenia pomiędzy materiałami: sprężystym i piezoelektrycznym oraz porosprężystym są w pełni uwzględnione. Poprawność modelowania zweryfikowano wykorzystując adekwatne wyniki MES otrzymane za pomocą programu *ANSYS* oraz rozwiązania analityczne. W kontekście dynamicznego zachowania się każdej z warstw materiałowych, przedyskutowano zastosowanie odpowiednich funkcji kształtu oraz kwestie zbieżności związane z dyskretyzacją siatki elementów skończonych. Przetestowano kilka konfiguracji warstwowych w celu zoptymalizowanego projektowania panelu o funkcjonalności hybrydowej (pasywno-aktywnej). Otrzymane różnice pomiędzy odpowiedziami częstotliwościowymi przedyskutowano z fizycznego punktu widzenia. W końcu zaprezentowano obiecujące wyniki wstępnego testu doświadczalnego dla rozpatrywanego zagadnienia.

Jestem drugim spośród czterech współautorów tej pracy. Brałem istotny udział w rozwoju koncepcji oraz pakietu numerycznego, w implementacji w środowisku *COMSOL Multiphysics*. Mój wkład w publikację szacuję na 25%.

5.3 Praca dydaktyczna i popularyzatorska

Dydaktyka. Od roku 2006 prowadzę w IPPT PAN kurs semestralny dotyczący modelowania zagadnień fizycznych, pt.: "*Introductory Course on Modelling of Multiphysics Problems*" ("*Wstęp do modelowania zagadnień fizycznych*"). Kurs składa się z 30 godzin wykładów i jest organizowany raz w roku (**punkty ECTS: 3**). W trakcie kursu prezentowane są również podstawy środowiska obliczeniowego *COMSOL Multiphysics*, jak również jego zaawansowana funkcjonalność szczególnie przydatna do zastosowań naukowych (m.in. implementacja własnych modeli wykorzystując wyrażenia symboliczne). Uczestnikami wykładów są doktoranci IPPT PAN oraz doktoranci/studenci z innych ośrodków naukowych i uczelni. Za wyjątkiem dwóch lat kurs zawsze prowadzony był w języku angielskim ze względu na udział słuchaczy z zagranicy.

Wykłady opierają się na opracowanym przeze mnie 150-stronicowym skrypcie (*Lecture Notes*), pt.: "*Introduction to Modelling of Multiphysics Problems*". Wszystkie materiały do wykładów (prezentacje, rozdziały skryptu, materiały do ćwiczeń) zostały w całości przygotowane przeze mnie w języku angielskim i są dostępne online: <http://bluebox.ippt.pan.pl/~tzielins/index.php?im=1&id=lectures.html> Rejestrowana statystyka odwiedzin strony internetowej¹⁶ i ściągnięć plików z materiałami do kursu, jak również rzetelne propozycje (np. przez *IOP*) wydania skryptu w formie e-booka i/lub papierowej, pozwalają mi stwierdzić, że skrypt do moich wykładów cieszy się sporą popularnością. Poniżej prezentuję w skrócie tematykę wykładów prowadzonych przeze mnie w ramach mojego kursu autorskiego:

- Ogólnie użyteczne metody i zagadnienia matematyczne: równania różniczkowe cząstkowe (klasyfikacja, techniki rozwiązywania), elementy rachunku i notacji tensorowej, twierdzenia całkowe itp.
- Podstawy Metody Elementów Skończonych (MES) w tym również m.in. Metoda Ritza-Galerkina oraz Metody Residuów Ważonych, a ponadto: sformułowanie mocne i słabe oraz ich równoważność, podstawowy algorytm i procedury MES, funkcje kształtu itp.

¹⁶Statystyka z ostatnich 4 lat: średnio ponad 1100 wejść rocznie (tzw. *unique vistis*) z krajów całego świata, oraz prawie 3000 wyświetleń rocznie (tzw. *page views*).

- Zagadnienia przepływu ciepła (wyprowadzenie i omówienie równania różniczkowego cząstkowego oraz warunków brzegowych, wyprowadzenie modelu Galerkin dla MES, ćwiczenia z programem *COMSOL Multiphysics*).
- Podstawy teorii sprężystości, sprzężenie termo-sprężyste (ćwiczenia z programem *COMSOL Multiphysics*, w tym m.in.: implementacja zmodyfikowanego sformułowania słabego wykorzystując wyrażenia symboliczne).
- Teoria przepływów nielepkich (równania Eulera, twierdzenia Bernoulliego), podstawy aerodynamiki (twierdzenie Kutty-Żukowskiego).
- Podstawy dynamiki płynów lepkich (równania Naviera-Stokesa, liczba Reynoldsa, cechy charakterystyczne przepływów lepkich).
- Fale w płynach (fale na powierzchni wody głębokiej i płytkiej, fale kapilarne i grawitacyjne, dyspersja i prędkość grupowa, fale akustyczne i naddźwiękowe).
- Podstawy akustyki (wyprowadzenie równań akustyki, impedancja akustyczna, natężenie dźwięku i poziom ciśnienia akustycznego, tłumienie fal dźwiękowych), wibroakustyka (sprzężenie akustyczno-strukturalne, ćwiczenia z programem *COMSOL Multiphysics*).
- Podstawowe równania piezoelektryczności (sprzężenie elektryczno-mechaniczne – różne postaci związku konstytutywnego, ćwiczenia z programem *COMSOL Multiphysics*).

Wykłady zaproszone. Wielokrotnie wygłaszałem wykłady dotyczące moich badań naukowych na seminariach w IPPT PAN, a także w *Ecole Centrale de Lyon* podczas stażu doktoranckiego, oraz – na zaproszenie – w jednostkach naukowo-badawczych w kraju (m.in.: na Politechnice Warszawskiej, na Politechnice Wrocławskiej, na UKW w Bydgoszczy, w ITWL w Warszawie, na AGH w Krakowie, w ABB Corp. w Krakowie) i zagranicą. Poniżej prezentuję zaproszone wykłady, które w ciągu ostatnich kilku lat wygłosiłem zagranicą:

- Trzy wykłady dla inżynierów wygłoszone w czasie pobytu w *CEDRAT Technologies* w Meylan/Grenoble, we Francji: (1) "Vibroacoustic Analyses of Amplified Piezoelectric Actuators for Stepping Piezoelectric Motors" [2.04.2014]; (2) "Vibroacoustic and Signal Analyses of Amplified Piezoelectric Actuators for Linear Stepping Piezo-Actuators" [24.04.2014]; (3) "Less-Noisy Signal Propositions for Linear Stepping Piezo-Actuators" [21.07.2014].
- Wykład wygłoszony 20.07.2012 w *Centre Acoustique, Ecole Centrale de Lyon* w Ecully/Lyon, we Francji: "Surface Acoustic Waves in piezoelectric media – an application to acoustofluidics".
- Dwa wykłady wygłoszone w ramach kursu zorganizowanego 3.04.2009 w *Harbin Institute of Technology* w Harbin, w Chinach: (1) "Multiphysics Modelling of Smart Active-Passive Approach in Vibroacoustics"; (2) "Multiphysics Modeling and Demonstration Experiment of the Active Reduction of Structural Noise".
- Dwa wykłady wygłoszone w ramach kursu zorganizowanego 7.04.2009 w *Aircraft Strength Research Institute, AVIC I* w Xi'an, w Chinach: (1) "Multiphysics Modelling of Smart Active-Passive Approach in Vibroacoustics"; (2) "Multiphysics Modeling and Demonstration Experiment of the Active Reduction of Structural Noise".

Praca popularyzatorska. Od roku 2009 biorę aktywny udział w kolejnych wydaniach Festiwalu Nauki organizowanych w Warszawie, podczas których – w ramach pokazów przygotowanych przez IPPT PAN – rocznie prezentuję zagadnienia wibroakustyki w tym przede wszystkim techniki identyfikacji źródeł dźwięku (metodami tzw. odwrotnego *beamforming*'u oraz holografii akustycznej), demonstrując wykorzystanie zaawansowanego, nowoczesnego sprzętu pomiarowego.

5.4 Promotorstwo i opieka naukowa

2010–2014: opiekun naukowy i **promotor pomocniczy**¹⁷ doktoranta IPPT PAN p. Łukasza Nowaka. Temat pracy doktorskiej: "*Adaptive Feedback Control System for Reduction of Vibroacoustic Emission*". Praca została obroniona w listopadzie 2014 roku w IPPT PAN i w dniu 27 listopada 2014 roku nadany został stopień doktora nauk technicznych.

2009–2010: opiekun naukowy stażysty z Pakistanu p. Tanzeela ur Rehmana. Tematyka stażu: *Control Systems for Active Reduction of Vibrations*.

2009: przez cztery miesiące opiekun naukowy stażysty z Indii p. Jaya Amina. Temat pracy badawczej: *Modeling of Heat Transfer for Solidification Process in Concrete*.

2008/2009: w czasie semestru jesienno-zimowego opiekun naukowy stażystki z Chin p. Zhang Li (z *Aircraft Strength Research Institute, AVIC I* w Xi'an). Cel stażu: zapoznanie się z tematyką dotyczącą wibroakustyki oraz uczestnictwo w kursie na temat modelowania zagadnień fizycznych.

5.5 Recenzowanie i członkostwo w towarzystwach naukowych

Recenzowanie. Jestem recenzentem artykułów publikowanych m.in. w następujących czasopismach: *Journal of Sound and Vibration*, *Journal of Vibration and Acoustics – Transactions of the ASME*, *Structural Health Monitoring*, *Journal of Structural Control*, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, *Archives of Acoustics*, *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, *Engineering Transactions*.

Członkostwo. Od roku 2012 jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Akustycznego (PTA) oraz *European Acoustics Association* (EAA).

5.6 Udział w projektach badawczych i badawczo-rozwojowych

od 2012: SMART-NEST – Projekt UE w ramach Programu *Marie Curie Industry-Academia Partnerships and Pathways* (IAPP). Call FP7-PEOPLE-2011-IAPP: *Smart Technologies for Transport Safety – Innovation Cluster Nesting*.

2012: Udział we francuskim projekcie naukowo-badawczym dotyczącym sterowania mikroprzepływami (*Microfluidics*). Temat pracy badawczej: *Surface Acoustic Waves in Piezoelectric Media – an Application to Acoustofluidics*.

2011–2014: AKAH – Projekt Narodowego Centrum Nauki (NCN): *Adaptacyjne kompozytowe absorbery hałasu* (*Adaptive Composite Noise Absorbers*), 2011-2014. Nr UMO-2011/01/N/ST8/07755.

od 2008: PKAERO – Projekt badawczo-rozwojowy: *Modern Material Technologies in Aerospace Industry*, 2008-2015. Nr POIG.01.01.02-00015/08-00. Projekt współfinansowany przez Fundusz Rozwoju Regionalnego UE "Innowacyjna Gospodarka".

2008–2013: **Kierownik i główny wykonawca projektu *Smart Vibroacoustics*** – jednego z trzech równorzędnych pod-projektów Projektu Fundacji Nauki Polskiej w ramach Programu TEAM współfinansowanego przez Fundusz Rozwoju Regionalnego UE "Innowacyjna Gospodarka 2007–2013": *Smart Technologies for Safety Engineering – SMART and SAFE*, 2008-2013. Nr TEAM/2008-1/4.

2009–2012: MONIT – Projekt Komitetu Badań naukowych (KBN): *Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i ocena jej żywotności*, 2009-2012. Nr POIG.01.01.02-00-013/08-00.

2008–2010: AEROCHINA2 – EU FP7 Project: *Promoting Scientific Cooperation Between Europe and China in the Field of Multiphysics Modelling, Simulation, Experimentation and Design Methods in Aeronautics*.

¹⁷Załączam formalne potwierdzenie pełnienia funkcji promotora pomocniczego.

2006–2009: SAFE-STRUCT – Projekt Komitetu Badań naukowych (KBN): *New Methods for Design of Safe Structures with Identification of Hazards and Active Adaptation in Critical States*. Nr 3T11F00930.

2004–2006: CAHPAC – Francuski projekt naukowo-badawczy: *Capotage Acoustique Hybride Passif/Actif*.

2002–2004 (w trakcie i w związku z doktoratem): PIEZODIAGNOSTICS – EU FP5 Project: *Smart Structural Diagnostics using Piezo-Generated Elastic Waves*. No. GRD1-2001-40589.

5.7 Uczestnictwo w konferencjach międzynarodowych

Wyniki prac badawczych prowadzonych przez mnie **po uzyskaniu stopnia doktora** prezentowałem **osobiście** na **20 konferencjach międzynarodowych**, mianowicie:

- *PCM-CMM-2015: 3rd Polish Congress of Mechanics & 21st International Conference on Computer Methods in Mechanics*, 8-11 September 2015, Gdańsk, Poland. [in spe; referat zaakceptowany]
- *EURONOISE2015: 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 31 May – 3 June 2015, Maastricht, The Netherlands.
- *SAPEM2014: Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials*, 16-18 December 2014, Stockholm, Sweden.
- *ISMA2014: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 15-17 September 2014, Leuven, Belgium.
- *Forum Acusticum 2014: 7th Forum Acusticum joined with 61st Open Seminar on Acoustics*, 7-12 September 2014, Cracow, Poland.
- *COMSOL Conference Rotterdam 2013*, 23-25 October 2013, Rotterdam, The Netherlands.
- *ICMM3–EMMC13: 3rd International Conference on Material Modelling incorporating the 13th European Mechanics of Materials Conference*, 8-11 September 2013, Warsaw, Poland.
- *ICSV20: 20th International Congress on Sound and Vibration*, 7-11 July 2013, Bangkok, Thailand.
- *ISMA2012: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 17-19 September 2012, Leuven, Belgium.
- *SolMech2012: 38th Solid Mechanics Conference*, 27-31 August 2012, Warsaw, Poland.
- *CMM2011: 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics*, 9-12 May 2011, Warsaw, Poland.
- *ICA2010: 20th International Congress on Acoustics*, 23-27 August 2010, Sydney, Australia.
- *AEROCHINA2–Brussels’2009: The 3rd EU-China Workshop on Multiphysics Modeling, Simulation, Validation and Optimization in Aeronautics*, 21-23 September 2009, Brussels, Belgium.
- *AEROCHINA2–Harbin’2009: The 2nd EU-China Workshop on Multiphysics Modeling, Simulation, Validation and Optimization in Aeronautics*, 30 March – 2 April 2009, Harbin, China.
- *SAPEM2008: Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials*, 17-19 December 2008, Bradford, UK.
- *ISMA2008: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 15-17 September 2008, Leuven, Belgium.
- *AEROCHINA2–Marseilles’2008: The 1st EU-China Workshop on Multiphysics Modeling, Simulation, Validation and Optimization in Aeronautics*, 16-18 June 2008, Marseilles, France.

- *ICA2007: 19th International Congress on Acoustics*, 2-7 September 2007, Madrid, Spain.
- *ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 18-20 September 2006, Leuven, Belgium.
- *SAPEM2005: Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials*, 7-9 December 2005, Lyon, France.

Ponadto, rezultaty prac badawczych, w których brałem udział **po uzyskaniu stopnia doktora** były również prezentowane **przez moich współpracowników** na następujących konferencjach międzynarodowych i krajowych:

- *ISMA2012: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 17-19 September 2012, Leuven, Belgium. [drugi referat]
- *SolMech2012: 38th Solid Mechanics Conference*, 27-31 August 2012, Warsaw, Poland. [drugi referat]
- *XXIX Symposium on Hydroacoustics*, 22-25 May, Gołuń, Poland.
- *58th Open Seminar on Acoustics (OSA-58: Otwarte Seminarium z Akustyki) in conjunction with 2nd Polish-German Structured Conference on Acoustics*, 13-16 September 2011, Gdańsk–Jurata, Poland.
- *XXXVII Polish Symposium on Machine Diagnostics*, 5-10 May 2010, Wisła, Poland.
- *ACTIVE2006: International Symposium on Active Control of Sound and Vibration*, 18-20 September 2006, Adelaide, Australia.

Wyniki badań prowadzonych przeze mnie **przed uzyskaniem stopnia doktora** prezentowane były (przeze mnie osobiście lub przez moich współpracowników) na następujących konferencjach międzynarodowych:

- *ECCOMAS2004: European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 24-28 July 2004, Jyväskylä, Finland.
- *SMART2003: AMAS Workshop on Smart Materials and Structures*, 2-5 September 2003, Jadwisin, Poland.
- *SMART'01: Advanced Course on Structural Control and Health Monitoring*, 22-25 May 2001, Warsaw, Poland.
- *COST International Conference on System Identification and Structural Health Monitoring*, 6-9 June 2000, Madrid, Spain.
- *2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, 8-10 September 1999, Stanford University, Palo Alto, USA.
- *7th Russian-Polish Seminar on Theoretical Foundations of Civil Engineering*, 6-8 July 1999, Moscow - Sankt-Petersburg, Russia.
- *7th Polish-Ukrainian Seminar on Theoretical Foundations of Civil Engineering*, 24-29 June 1999, Dnepropetrovsk, Ukraine.

5.8 Liczba publikacji w czasopismach z bazy JCR oraz indeksowanych przez Web of Science, sumaryczny Impact Factor i liczba cytowań, sumaryczna punktacja MNiSW

Lista większości publikacji, których jestem autorem lub współautorem zostanie przedstawiona w punkcie następnym. Spośród tych publikacji **19 artykułów podlega indeksacji przez Web of Science**, przy czym jestem pierwszym autorem w przypadku 13 artykułów (w tym 9 publikacji jest wyłącznie mojego autorstwa), a w przypadku pozostałych prac jestem drugim ze współautorów. Dwa z tych artykułów zostały opublikowane przed otrzymaniem przeze mnie doktoratu.

Spośród wzmiankowanych wyżej prac indeksowanych przez *Web of Science*, **liczba artykułów** opublikowanych przeze mnie w czasopismach z bazy JCR (*Journal Citation Reports*), tj. indeksowanej przez *Web of Science* tzw. „listy filadelfijskiej”, wynosi 13, w tym jeden artykuł dotyczył jeszcze tematyki związanej z doktoratem, zaś pozostałe zupełnie nowych zagadnień, którymi zacząłem się zajmować po obronie pracy doktorskiej. Sumaryczny *Impact Factor*, tzw. 5-letni, dla tych czasopism wynosi 20.866, a *Impact Factor* zgodny z rokiem opublikowania wynosi 15.677. Spośród 12 artykułów – z czasopism z bazy JCR – opublikowanych przeze mnie po otrzymaniu stopnia doktora: 6 jest wyłącznie mojego autorstwa, dla 3 innych jestem pierwszym autorem, a w przypadku 3 pozostałych jestem drugim ze współautorów.

Liczba cytowań publikacji moich lub mojego współautorstwa podawana przez bazę *Web of Science* w dniu 25.06.2015 wynosiła 67, natomiast indeks Hirscha miał wartość 5. Ponadto suma punktów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) dla artykułów opublikowanych przeze mnie w czasopismach z bazy JCR, czyli z ministerialnej listy czasopism A, wynosi 340, natomiast odpowiednia suma „indywidualna” wynosi 236 pkt.¹⁸, co obliczyłem dzieląc punktację każdego z artykułów przez liczbę współautorów.

6 Publikacje naukowe

6.1 Artykuły z listy *Web of Science*

6.1.1 Artykuły w czasopismach z bazy JCR

Po doktoracie

- [W-1] Nowak Ł.J., **ZIELIŃSKI T.G.**: "Determination of the free-field acoustic radiation characteristics of the vibrating plate structures with arbitrary boundary conditions". *Journal of Vibration and Acoustics – Transactions of the ASME*, Vol. 137, No. 5, pp. 051001-051001-8, 2015.
doi:10.1115/1.4030214
IF(5-letni): 1.315, IF: 1.128, MNiSW: 25 pkt. (lista A)
- [W-2] **ZIELIŃSKI T.G.**: "Normalized inverse characterization of sound absorbing rigid porous media". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 137, No. 6, 2015, pp. 3232-3243.
doi:10.1121/1.4919806 [H-7]
IF(5-letni): 1.736, IF: 1.503, MNiSW: 30 pkt. (lista A)
- [W-3] **ZIELIŃSKI T.G.**: "Generation of random microstructures and prediction of sound velocity and absorption for open foams with spherical pores". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 137, No. 4, pp. 1790-1801, 2015.
doi:10.1121/1.4915475 [H-6]
IF(5-letni): 1.736, IF: 1.503, MNiSW: 30 pkt. (lista A)
- [W-4] **ZIELIŃSKI T.G.**: "Microstructure-based calculations and experimental results for sound absorbing porous layers of randomly packed rigid spherical beads". *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 3, pp. 034905-034905-17, 2014.
doi:10.1063/1.4890218 [H-4]
IF(5-letni): 2.276, IF: 2.183, MNiSW: 35 pkt. (lista A)
- [W-5] **ZIELIŃSKI T.G.**, Potoczek M., Śliwa R.E., Nowak Ł.J.: "Acoustic absorption of a new class of alumina foams with various high-porosity levels". *Archives of Acoustics*, Vol. 38, No. 4, pp. 495-502, 2013.
doi:10.2478/aoa-2013-0059
IF(5-letni): 0.482, IF: 0.656, MNiSW: 20 pkt. (lista A)
- [W-6] Nowak Ł.J., **ZIELIŃSKI T.G.**: "Modal sensitivity and selectivity of small, rectangle-shaped piezoelectric transducers used as sensors and actuators in active vibroacoustic control systems". *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 32, No. 4, pp. 253-272, 2013.
doi:10.1260/0263-0923.32.4.253
IF(5-letni): 0.409, IF: 0.263, MNiSW: 15 pkt. (lista A)

¹⁸Sumę „indywidualną” obliczono w następujący sposób:

$$\frac{1}{2} \times 25 \text{ pkt. [W-1]} + 30 \text{ pkt. [W-2]} + 30 \text{ pkt. [W-3]} + 30 \text{ pkt. [W-4]} + \frac{1}{4} \times 20 \text{ pkt. [W-5]} + \frac{1}{2} \times 15 \text{ pkt. [W-6]} + \frac{1}{3} \times 20 \text{ pkt. [W-7]} + 30 \text{ pkt. [W-8]} + 27 \text{ pkt. [W-9]} + 27 \text{ pkt. [W-10]} + \frac{1}{2} \times 27 \text{ pkt. [W-11]} + \frac{1}{4} \times 32 \text{ pkt. [W-12]} + \frac{1}{3} \times 27 \text{ pkt. [W-13]} = 236 \text{ pkt.}$$

- [W-7] **ZIELIŃSKI T.G., Galland M.-A., Ichchou M.N.:** "Fully-coupled finite-element modeling of active sandwich panels with poroelastic core". *Journal of Vibration and Acoustics – Transactions of the ASME*, Vol. 134, No. 2, pp. 021007-021007-10, 2012.
doi:[10.1115/1.4005026](https://doi.org/10.1115/1.4005026)
IF(5-letni): 1.315, IF: 1.268, MNiSW: 20 pkt. (lista A)
- [W-8] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Numerical investigation of active porous composites with enhanced acoustic absorption". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 22, pp. 5292-5308, 2011.
doi:[10.1016/j.jsv.2011.05.029](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.05.029) [H-2]
IF(5-letni): 2.223, IF: 1.588, MNiSW: 30 pkt. (lista A)
- [W-9] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Multiphysics modeling and experimental validation of the active reduction of structure-borne noise". *Journal of Vibration and Acoustics – Transactions of the ASME*, Vol. 132, No. 6, pp. 061008-061008-14, 2010.
doi:[10.1115/1.4001844](https://doi.org/10.1115/1.4001844)
IF(5-letni): 1.315, IF: 0.390, MNiSW: 27 pkt. (lista A)
- [W-10] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Fundamentals of multiphysics modelling of piezo-poro-elastic structures". *Archives of Mechanics*, Vol. 62, No. 5, pp. 343-378, 2010.
<http://am.ippt.gov.pl/index.php/am/article/view/376> [H-1]
IF(5-letni): 0.798, IF: 0.469, MNiSW: 27 pkt. (lista A)
- [W-11] **ZIELIŃSKI T.G., Rak M.:** "Acoustic absorption of foams coated with MR fluid under the influence of magnetic field". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 1, pp. 125-131, 2010.
doi:[10.1177/1045389X09355017](https://doi.org/10.1177/1045389X09355017)
IF(5-letni): 2.364, IF: 1.604, MNiSW: 27 pkt. (lista A)
- [W-12] **Batifol C., ZIELIŃSKI T.G., Ichchou M.N., Galland M.-A.:** "A finite-element study of a piezoelectric/poroelastic sound package concept". *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 1, pp. 168-177, 2007.
doi:[10.1088/0964-1726/16/1/021](https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/1/021)
IF(5-letni): 2.791, IF: 1.512, MNiSW: 32 pkt. (lista A)

Przed lub w związku z doktoratem

- [W-13] **Kołakowski P., ZIELIŃSKI T.G., Holnicki-Szulc J.:** "Damage identification by the Dynamic Virtual Distortion Method". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, No. 6, pp. 479-494, 2004.
doi:[10.1177/1045389X04042279](https://doi.org/10.1177/1045389X04042279)
IF(5-letni): 2.364, IF: 1.610, MNiSW: 27 pkt. (lista A)

6.1.2 Pozostałe artykuły indeksowane przez *Web of Science*

Po doktoracie

- [W-14] **ZIELIŃSKI T.G.:** "A methodology for a robust inverse identification of model parameters for porous sound absorbing materials". *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2014) / International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2014)*, 15-17 September 2014, Leuven, Belgium, edited by P. Sas, D. Moens, and H. Denayer, pp. 63-76, 2014. [H-5]
- [W-15] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Inverse identification and microscopic estimation of parameters for models of sound absorption in porous ceramics". *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012) / International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2012)*, 17-19 September 2012, Leuven, Belgium, edited by P. Sas, D. Moens, and S. Jonckheere, pp. 95-107, 2012. [H-3]
- [W-16] **Nowak Ł., ZIELIŃSKI T.G.:** "Determining the optimal locations of piezoelectric transducers for vibro-acoustic control of structures with general boundary conditions". *Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012) / International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2012)*, 17-19 September 2012, Leuven, Belgium, edited by P. Sas, D. Moens, and S. Jonckheere, pp. 369-383, 2012.
- [W-17] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Active porous composites for wide frequency-range noise absorption". *Proceedings of*

ISMA2008: *International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 15-17 September 2008, Leuven, Belgium, Vols. 1-8, pp. 89-103, 2008.

- [W-18] **ZIELIŃSKI T.G., Galland M.-A., Ichchou M.N.:** "Further modeling and new results of active noise reduction using elasto-poroelastic panels". *Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 18-20 September 2006, Leuven, Belgium, edited by P. Sas and M. DeMunck, Vols. 1-8, pp. 309-319, 2006.

Przed lub w związku z doktoratem

- [W-19] **Holnicki-Szulc J., ZIELIŃSKI T.G.:** "Damage identification method based on analysis of perturbation of elastic waves propagation". *Structural Health Monitoring 2000: Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, 8-10 September 1999, Stanford University, Palo Alto, USA, edited by F.K. Chang, pp. 881-890, 1999.

6.2 Publikacje w książkach i monografiach

Po doktoracie

- [M-1] **ZIELIŃSKI T.G.:** *Introduction to Modelling of Multiphysics Problems*. Lecture Notes, 150 pages, 2014 (last revision), online:
<http://bluebox.ippt.pan.pl/~tzielins/index.php?im=1&id=lectures.html>
- [M-2] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Microstructure-based modelling of sound absorption in rigid porous media" – Section 7.3 (pp. 106-111) of Chapter 7 "Selected applications" in: *GRAFEN - IPPT PAN Computer of Biocentrum Ochota Grid*, edited by E. Postek and T. A. Kowalewski, IPPT Reports on Fundamental Technological Research, 2014.
- [M-3] **Graczykowski C., Knor G., Kołakowski P., Mikułowski G., Orłowska A., Pawłowski P., Skłodowski M., Świercz A., Wiszowaty R., ZIELIŃSKI T.G.:** "Wybrane zagadnienia monitorowania" – Rozdział 7 (str. 189-236) w: *Monitorowanie obciążeń i stanu technicznego konstrukcji mostowych*, red.: J. Holnicki-Szulc i A. Świercz, IPPT Reports on Fundamental Technological Research, 2014.
- [M-4] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Modeling and Analysis of Smart Technologies in Vibroacoustics" – Chapter 8 (pp. 269-321) in: *Smart Technologies for Safety Engineering*, edited by J. Holnicki-Szulc, Wiley 2008.
[doi:10.1002/9780470758595.ch8](https://doi.org/10.1002/9780470758595.ch8)

Przed lub w związku z doktoratem

- [M-5] **ZIELIŃSKI T.G.:** *Metoda Impulsowych Dystorsji Wirtualnych z zastosowaniem do modelowania i identyfikacji defektów w konstrukcjach*. Praca doktorska, 160 stron. IFTR Reports 4/2004, IPPT PAN 2004.
- [M-6] **Wojewódzki W., ZIELIŃSKI T.G.:** *Nośność graniczna żelbetowych zbiorników walcowych*. (Skrócona wersja pracy magisterskiej drugiego autora), 108 stron. Research Papers of the Warsaw University of Technology – Building Engineering, Vol. 135, OWPW 2000.

6.3 Pozostałe wybrane publikacje

Po doktoracie

- [P-1] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Multiscale modelling of the acoustic waves in rigid porous and fibrous materials". *Proceedings of PCM-CMM-2015 – 3rd Polish Congress of Mechanics & 21st International Conference on Computer Methods in Mechanics*, 8-11 September 2015, Gdańsk, Poland. [referat zaakceptowany]
- [P-2] **ZIELIŃSKI T.G.:** "On representativeness of the representative cells for the microstructure-based predictions of sound absorption in fibrous and porous media". *Proceedings of EURONOISE2015 – 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 31 May – 3 June 2015, Maastricht, The Netherlands.

- [P-3] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Microstructure generation for a design of sound absorbing foams with spherical pores". *Proceedings of SAPEM2014: Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials*, 16-18 December 2014, Stockholm, Sweden.
- [P-4] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Sound absorption of porous layers of loosely-packed rigid spheres: multiscale modelling and experimental validation". *Proceedings of the 7th Forum Acusticum 2014*, 7-12 September 2014, Kraków, Poland.
- [P-5] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Multiphysics modelling of sound absorption in rigid porous media based on periodic representations of their microstructural geometry". *Proceedings of the COMSOL Conference Rotterdam 2013*, 23-25 October 2013, Rotterdam, The Netherlands.
- [P-6] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Representative volume elements, microstructural calculation and macroscopic inverse identification of parameters for modelling sound propagation in rigid porous materials". *Proceedings of ICSV20: 20th International Congress on Sound and Vibration*, 7-11 July 2013, Bangkok, Thailand.
- [P-7] **Nowak Ł., ZIELIŃSKI T.G., M. Meissner:** "Active vibroacoustic control of plate structures with arbitrary boundary conditions". *IPPT Reports on Fundamental Technological Research*, Vol. 47, No. 4, pp.5-9, 2013.
- [P-8] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Concurrence of the micro-scale calculation and inverse identification of parameters used for modelling acoustics of porous media". *Proceedings of SolMech2012: 38th Solid Mechanics Conference*, 27-31 August 2012, Warsaw, Poland.
- [P-9] **Nowak Ł., ZIELIŃSKI T.G.:** "Active vibroacoustic control of beams and plates with general boundary conditions". *Proceedings of SolMech2012: 38th Solid Mechanics Conference*, 27-31 August 2012, Warsaw, Poland.
- [P-10] **Nowak Ł., ZIELIŃSKI T.G.:** "Acoustic radiation of vibrating plate structures submerged in water". *Hydro-acoustics*, Vol.15, pp.163-170, 2012.
MNiSW: 4 pkt. (lista B)
- [P-11] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Finite-element modelling of fully-coupled active systems involving poroelasticity, piezoelectricity, elasticity, and acoustics". *Proceedings of CMM2011: 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics*, 9-12 May 2011, Warsaw, Poland.
- [P-12] **Nowak Ł., ZIELIŃSKI T.G.:** "Wybrane aspekty aktywnej kontroli wibroakustycznej na przykładzie struktury płytowej". *58th Open Seminar on Acoustics (OSA-58: Otwarte Seminarium z Akustyki) in conjunction with the 2nd Polish-German Structured Conference on Acoustics*, Vol.2, pp.129-138, 2011.
- [P-13] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Multiphysics modelling and experimental verification of active and passive reduction of structural noise". *Proceedings of ICA2010: 20th International Congress on Acoustics*, 23-27 August 2010, Sydney, Australia.
- [P-14] **Motylewski J., Pawłowski P., Rak M., ZIELIŃSKI T.G.:** "Identyfikacja źródeł aktywności wibroakustycznej maszyn metodą kształtowania wiązki sygnału (beamforming)". *XXXVII Polish Symposium on Machine Diagnostics*, pp.1-8, 2010.
- [P-15] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Porous foams with active implants improving acoustic absorption". *Proceedings of SAPEM2008: Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials*, 17-19 December 2008, Bradford, UK.
- [P-16] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Modelling of poroelastic layers with mass implants improving acoustic absorption". *Proceedings of ICA2007: 19th International Congress on Acoustics*, 2-7 September 2007, Madrid, Spain.
- [P-17] **Batifol C., ZIELIŃSKI T.G., Galland M.-A., Ichchou M.N.:** "Hybrid piezo-poroelastic sound package concept: numerical/experimental validations". *Proceedings of ACTIVE 2006: the 2006 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration*, 18-20 September 2006, Adelaide, Australia.
- [P-18] **ZIELIŃSKI T.G., Galland M.-A., Ichchou M.N.:** "Active reduction of vibroacoustic transmission using elasto-poroelastic sandwich panels and piezoelectric materials". *Proceedings of SAPEM2005: Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials*, 7-9 December 2005, Lyon, France.

Przed lub w związku z doktoratem

- [P-19] **ZIELIŃSKI T.G., Świercz A.:** "Software tools for structural damage identification". *Proceedings of ECCO-MAS2004: European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 24-28 July 2004, Jyväskylä, Finland.
- [P-20] **ZIELIŃSKI T.G.:** "Virtual distortions applied to structural modelling and sensitivity analysis. Example of damage identification". *Proceedings of SMART2003: AMAS Workshop on Smart Materials and Structures*, 2-5 September 2003, Jadwisin, Poland.
- [P-21] **Holnicki-Szule J., Kołakowski P., Motylewski J., Orłowska A., Świercz A., Wiącek D., ZIELIŃSKI T.G.:** "Piezodiagnosics – damage identification via elastic wave propagation". *Proceedings of SMART2003: AMAS Workshop on Smart Materials and Structures*, 2-5 September 2003, Jadwisin, Poland.
- [P-22] **Holnicki-Szule J., ZIELIŃSKI T.G.:** "Damage identification method based on analysis of perturbation of elastic waves propagation". *Proceedings of SMART'01: Advanced Course on Structural Control and Health Monitoring*, 22-25 May 2001, Warsaw, Poland.
- [P-23] **Holnicki-Szule J., ZIELIŃSKI T.G.:** "New damage identification method through the gradient based optimisation". *Proceedings of the COST International Conference on System Identification and Structural Health Monitoring*, 6-9 June 2000, Madrid, Spain.
- [P-24] **Wojewódzki W., ZIELIŃSKI T.G.:** "Nośność graniczna żelbetowych zbiorników walcowych pod obciążeniem parciem Janssena". *Proceedings of the 7th Russian-Polish Seminar on Theoretical Foundations of Civil Engineering*, 6-8 July 1999, Moscow - Sankt-Petersburg, Russia.
- [P-25] **Wojewódzki W., ZIELIŃSKI T.G.:** "Nośność graniczna żelbetowych zbiorników walcowych pod obciążeniem hydrostatycznym". *Proceedings of the 7th Polish-Ukrainian Seminar on Theoretical Foundations of Civil Engineering*, 24-29 June 1999, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Podziękowanie

Część badań naukowych, stanowiących istotny wkład do mojej pracy habilitacyjnej, wykonałem dzięki wsparciu finansowemu¹⁹ uzyskanemu w ramach Projektu PKAERO – „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08, realizowanego w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG) i współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



¹⁹m.in. na zakup sprzętu, wykorzystywanego do akustycznych pomiarów ośrodków porowatych.