

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych (w tym materiały typu Glare)

Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań Results

Generowane losowo, periodyczne reprezentatywne elementy objętościowe (RVE) dla wielo-skalowego modelowania pianek o porowatości otwartej. Obliczenia parametru przepuszczalności termicznej

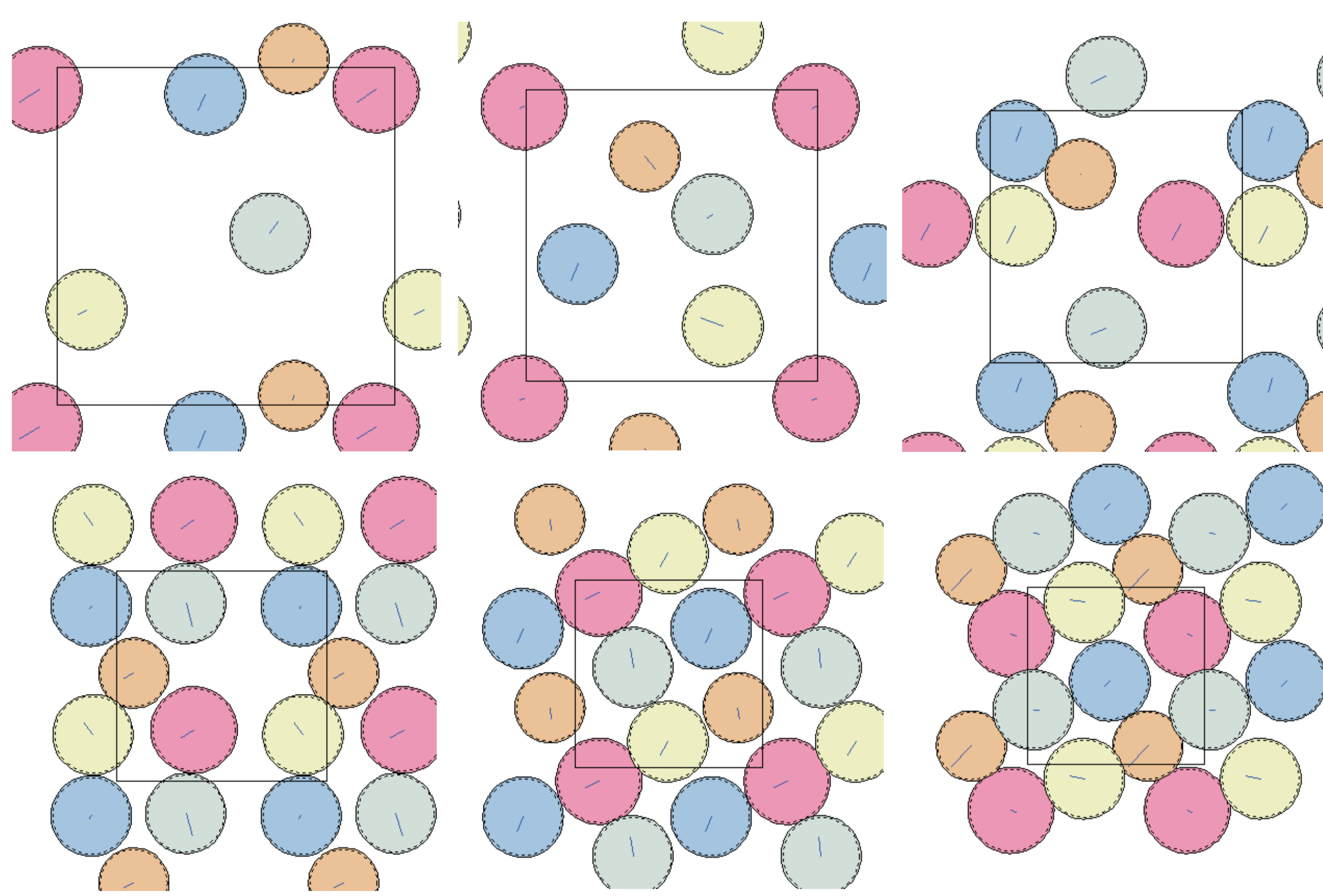
Wielo-skalowe modelowanie propagacji i pochłaniania dźwięku przez materiały porowate (np. pianki ceramiczne) wymaga modelu ich mikro-geometrii w postaci periodycznej komórki (kostki) zawierającej fragment szkieletu ośrodka porowatego. Taka komórka musi być reprezentatywna dla danego ośrodka porowatego, aby stanowić dla niego tzw. reprezentatywny element objętościowy „RVE”. Konstrukcja elementów reprezentatywnych dla ośrodków porowatych nie jest zadaniem łatwym, gdyż zazwyczaj nie są one regularne na poziomie mikro-strukturalnym. Na szczęście ich mikro-geometria da się zwykle opisać za pomocą pewnych globalnych parametrów uśredniających takich jak porowatość, charakterystyczny kształt porów lub włókien, oraz pewnych danych statystycznych takich jak typowe rozmiary porów i okien łączących pory w przypadku pianek, czy też typowe długości włókien i odległości między nimi w przypadku materiałów włóknistych. Wydaje się zatem, że bardzo dobre komórki RVE powinno się generować w sposób losowy, oparty na pewnych typowych danych statystycznych opisujących rzeczywisty ośrodek porowaty, który mają reprezentować. W tym celu zaproponowano stosunkowo prostą procedurę generowania losowych, a równocześnie periodycznych rozkładów kul (porów), które mogą posłużyć do konstrukcji komórek RVE dla rzeczywistych dźwiękochłonnych pianek o porach sferycznych. Przykładowa, losowo-wygenerowana periodyczna komórka RVE dla pianki o otwartej porowatości 70% posłużyła do wyznaczenia z mikrostruktury ważnego parametru tzw. „termicznej przepuszczalności”.

Randomly-generated periodic Representative Volume Elements (RVEs) for multi-scale modelling of porous media with open cell porosity. Determining the thermal permeability parameter

The multi-scale modelling of sound propagation and absorption in porous media (like, for example, ceramic foams) involves the model of micro-geometry in the form of a periodic cubic cell with a piece of skeleton (solid frame) inside. Such a cell must be representative for the porous medium to constitute its Representative Volume Element (RVE). Construction of RVEs for porous media is not an easy task since they are usually not regular on the micro-scale level. Fortunately, their micro-geometry can be rather well described by some global parameters like porosity, generic characteristics like typical shape of pores or fibres, and some statistical data like, for example, typical sizes of pores and windows linking the pores in case of foams, or typical size of fibres and distances between them in case of fibrous materials. Therefore, it seems reasonable that RVEs may be constructed in a random way basing on some typical statistics of real porous media they tend to represent. A comparatively simple method of generation periodic yet random assemblies of spheres (pores) is proposed. The method is suitable for constructing RVEs for real sound insulating foams with spherical pores. Such random periodic RVE is generated for a foam of porosity 70% for which the important parameter of the so-called „thermal permeability” is then calculated from microstructure.

Procedura losowego generowania periodycznych komórek RVE dla pianek o porach sferycznych Procedure for random generation of periodic RVEs for foams with spherical pores

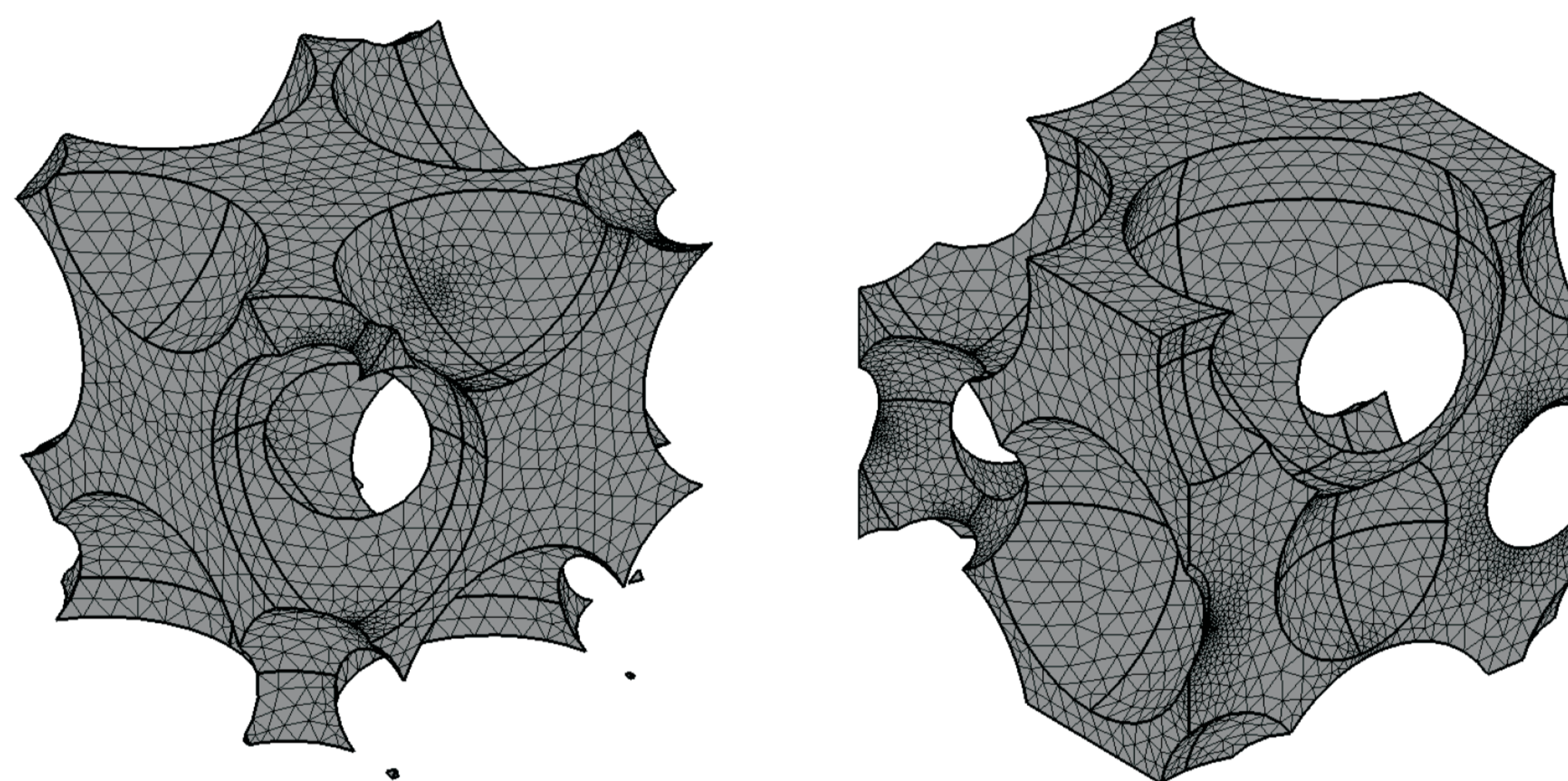
Stosunkowo prosta metoda losowego generowania komórek RVE dla pianek o porach sferycznych może polegać zastosowaniu prostej dynamiki idealnie sprężystych kulek, które odbijają się od siebie podczas, gdy sześcienna komórka RVE zmniejsza swój rozmiar. Kulki mogą swobodnie przenikać przez ścianki komórki, przy czym ich ruch jest periodyczny, co oznacza, że przenikający fragment kulki od razu pojawia się po naprzeciwległej stronie komórki. W praktyce zrealizowane jest to w ten sposób, że każda kulka powiązana jest więzami z siedmioma (z trzema – w przypadku 2D) identycznymi sferami rozmieszczonymi w rogach sześciangu (kwadratu – w przypadku 2D) o krawędzi równej aktualnej długości krawędzi komórki. Średnice kulek zadane są na podstawie statystycznych rozmiarów porów otrzymanych z analizy materiału rzeczywistej pianki. Innym istotnym parametrem jest dopuszczalna penetracja sfer; parametr ten – wraz z przyjętym rozmiarem porów – powinien w efekcie prowadzić do uzyskania okien (łączących wnętrza sfer/porów) o rozmiarach zgodnych z tymi znanymi z analizy statystycznej rzeczywistej pianki. Rysunek 1 ilustruje ideę losowego generowania komórek RVE – na przykładzie dwuwymiarowym.



Rys. 1. Dwuwymiarowy przypadek ilustrujący sposób losowego generowania rozkładu porów za pomocą dynamiki sztywnych kul z pewną dopuszczalną penetracją oraz z dodatkowymi więzami zapewniającymi periodyczność finalnej komórki reprezentatywnej
Fig. 1. 2D case showing the way of random generation of pore-distribution using a rigid-sphere dynamics with some allowed penetration and additional constraints insuring the periodicity of the final representative cell

Losowo wygenerowana komórka RVE dla pianki o porowatości otwartej 70% Randomly-generated RVE for a foam with open-cell porosity of 70%

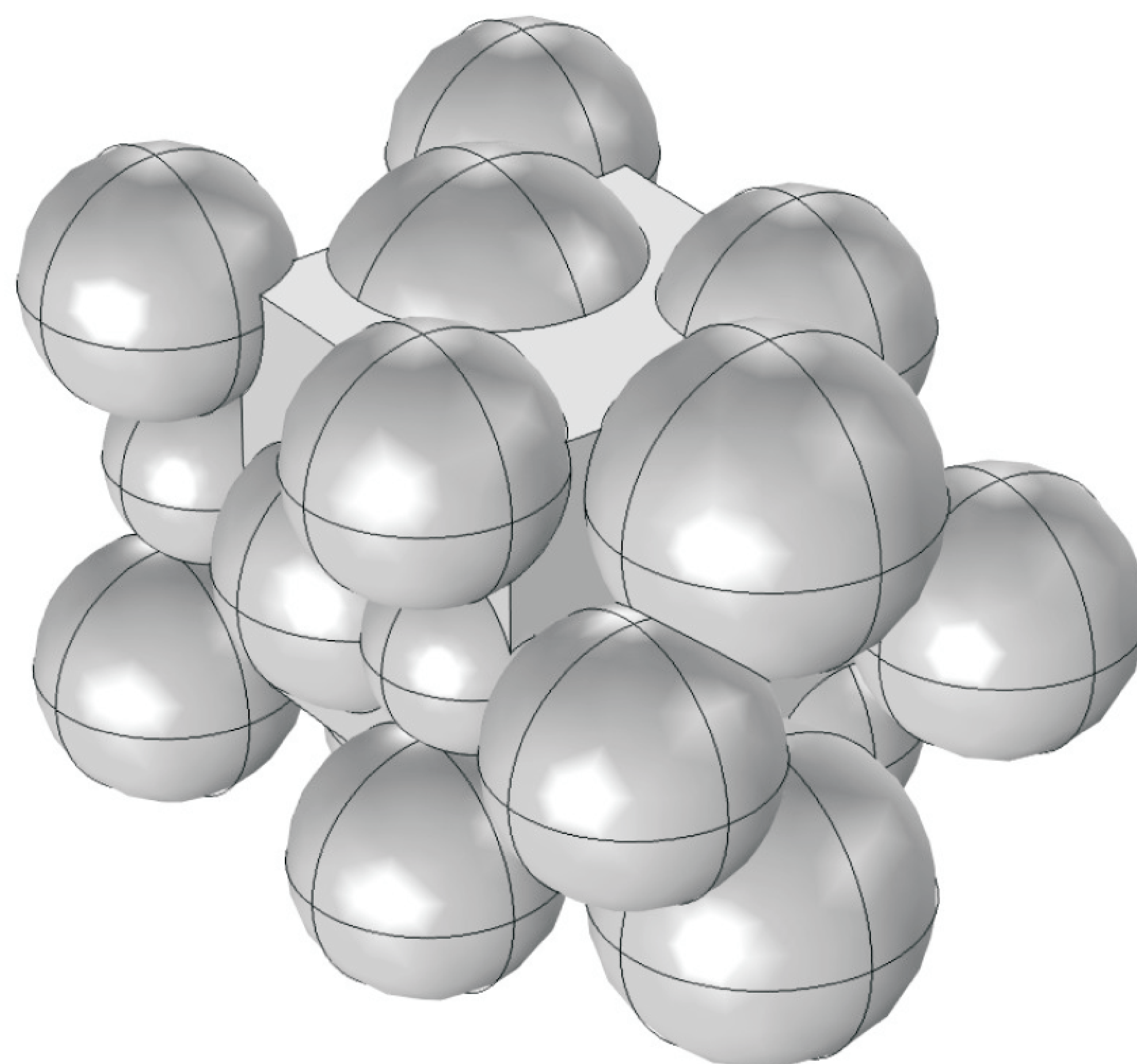
Rysunek 2 prezentuje dwa periodyczne wycinki (komórki) szkieletu tej samej mikrostruktury o porowatości otwartej 70%. Mikrostruktura została wygenerowana losowo, a komórka reprezentatywna zawiera 5 porów o różnej wielkości. Komórka pokazana na Rys. 2 z lewej strony jest oryginalnym wynikiem procedury generacyjnej – wyraźnie widać, iż zawiera ona 3 drobne, pozornie swobodne fragmenty (w rzeczywistości połączone ze szkieletem po przeciwległej stronie), które są niekorzystne przy generowaniu siatki elementów skończonych i obliczeniach numerycznych. Aby tych problemów uniknąć, komórka oryginalna została po prostu przesunięta względem periodycznej mikrostruktury – wynik przesunięcia pokazano na Rys. 2 z prawej strony. Na Rys. 3 przedstawiono natomiast sześcienną kostkę wraz z przenikającym ją periodycznym układem sfer (odpowiadającym „przesuniętemu” wycinkowi mikrostruktury), które po odjęciu od kostki utworzą w niej periodyczny rozkład porów. Niektóre dane morfologiczne dla tej losowo wygenerowanej mikrostruktury podano w Tabeli 1.



Rys. 2: Losowo wygenerowany periodyczny szkielet o 5 porach i porowatości całkowitej 70%. (z lewej) oryginalnie wygenerowana komórka, (z prawej) komórka przesunięta „dogodnie” dla MES

Tabela 1: Dane morfologiczne losowo wygenerowanej mikrostruktury porowatej
Table 1: Morphological data for the randomly generated porous micro-structure

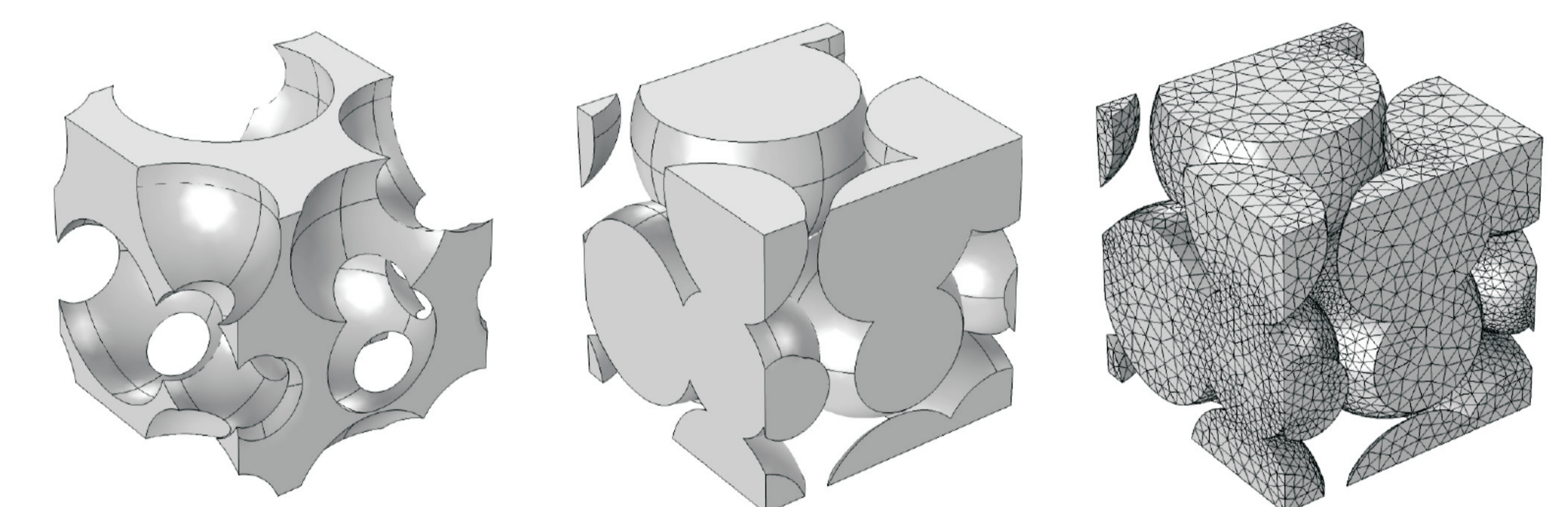
Porowatość – Porosity: 70%	Liczba porów w RVE – No. of pores in RVE: 5				
Stosunek średnic porów do krawędzi RVE: Ratio of pore-diameter to RVE-edge-length:	0.4948	0.6263	0.6301	0.6618	0.7761
Średnice porów [mm] dla RVE o krawędzi równej 0.5159 mm: Pore diameter [mm] for RVE with edge-length 0.5159 mm:	0.2553	0.3231	0.3251	0.3414	0.4004
Objętość – Volume [mm ³]	RVE: 0.1373	szkielet: 0.0412	pory: 0.0961		
	RVE	skeleton	pores		



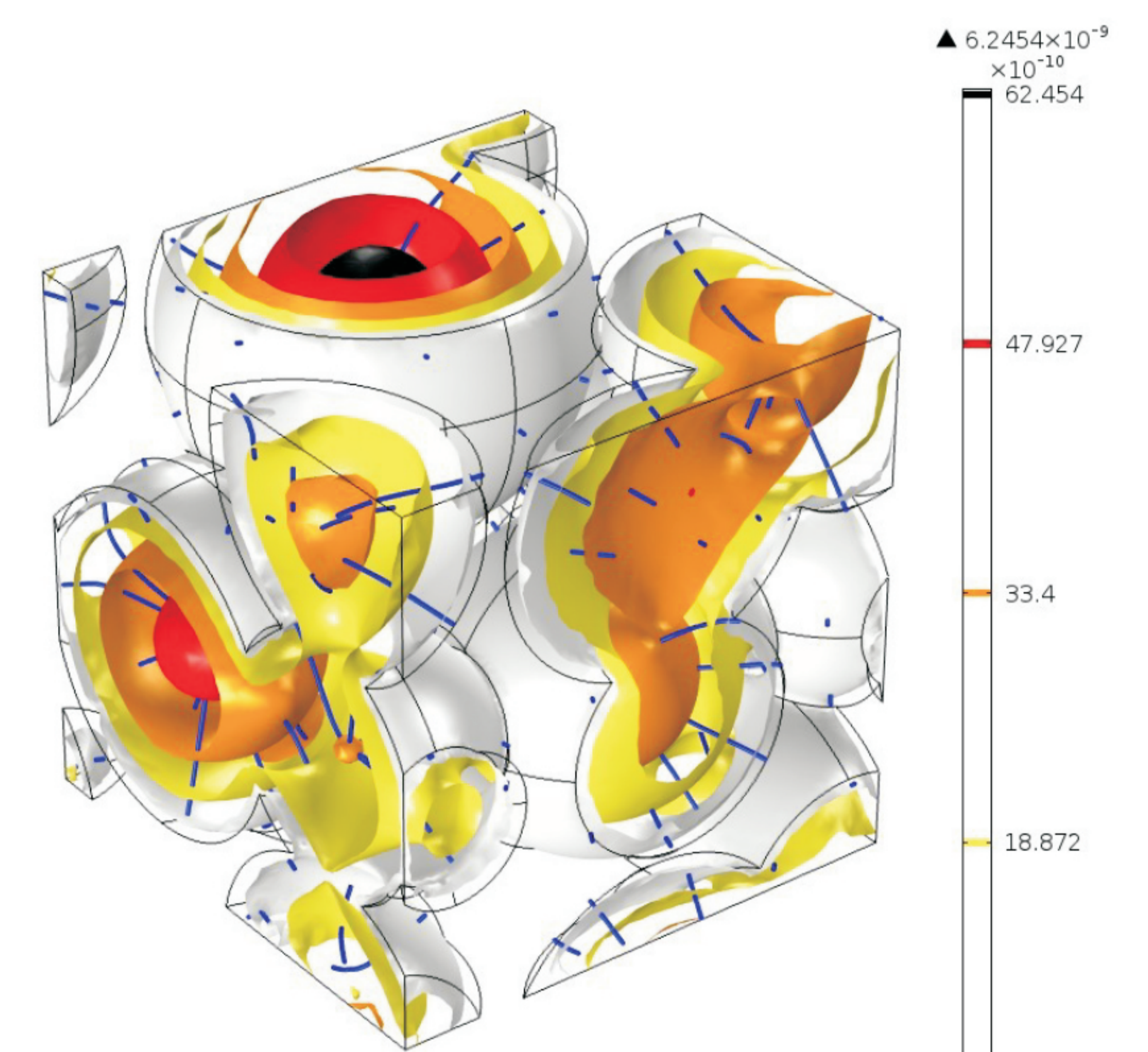
Rys. 3. Losowo wygenerowany periodyczny rozkład kul tworzący pory w kostce periodycznej mikro-struktury reprezentatywnej dla pianki o otwartej porowatości 70%
Fig. 3. Randomly-generated periodic distribution of spheres making pores in the cube of the periodic micro-structure representative for a foam with open porosity 70%

Zastosowanie analizy mikrostrukturalnej do wyznaczenia makroskopowego parametru „przepuszczalności termicznej” Microstructural analysis for determination of the macroscopic „thermal permeability” parameter

Dla losowo wygenerowanej periodycznej mikrostruktury o porowatości 70% wyznaczono makroskopowy parametr „przepuszczalności termicznej”. Parametr ten wykorzystywany jest w modelach pochłaniania dźwięku w ośrodkach porowatych i stanowi podstawę do uwzględnienia efektów termicznych. Postępowano w następujący sposób: (1) od objętości kostki RVE odjęto obszar szkieletu, uzyskując obszar płynu wypełniającego pory RVE (Rys. 4); (2) na obszarze tym wygenerowano siatkę elementów skończonych (por. Rys. 4 z prawej); (3) siatkę tę wykorzystano do analizy MES ustalonego przepływu ciepła przez porowatą kostkę RVE (z periodycznymi warunkami brzegowymi zadanymi na odpowiednich, przeciwległych ściankach kostki, oraz warunkami izotermicznymi na ściankach szkieletu); (4) odpowiednio przeskalanowane – do wymiaru [m²] (tj. wymiaru parametru przepuszczalności) – pole rozkładu temperatury (pokazane na Rys. 5) tego stacjonarnego przepływu ciepła zostało uśrednione po komórce RVE w celu oszacowania makroskopowego parametru „przepuszczalności termicznej”. Uzyskany wynik wyniósł 1,65 mm². Wyznaczono również drugi parametr istotny dla efektów termicznych zachodzących w propagacji i absorpcji fal akustycznych w ośrodkach porowatych, a mianowicie tzw. długość charakterystyczną dla efektów termicznych, obliczaną jako stosunek podwójnej objętości porów do ich powierzchni – długość ta wyniosła 0.138 mm.



Rys. 4: Losowo wygenerowana mikrostruktura porowata o otwartej porowatości 70%: (z lewej) szkielet, (w środku) obszar płynu w porach, (z prawej) siatka elementów skończonych obszaru płynu w porach
Fig. 4: Randomly-generated porous micro-structure with open-cell porosity of 70%: (left) the solid frame, (middle) the pore-fluid domain, (right) the finite-element mesh of the pore fluid domain



Rys. 5: Pole „termicznej przepuszczalności” (przeskalanowane do wymiaru [m²] pole rozkładu temperatury) wyznaczone dla ustalonego przepływu ciepła w periodycznej komórce RVE dla pianki o otwartej porowatości 70%
Fig. 5: The „thermal permeability” field (a temperature field scaled to the unit [m²]) determined for a stationary heat transfer in the periodic RVE for the foam with open porosity 70%

Wnioski Conclusions

Rozkład porów w komórkach RVE reprezentatywnych dla pianek o porach sferycznych może być realizowany w sposób losowy przy zachowaniu ich periodyczności według zaproponowanej procedury bazującej na prostej dynamice kul sprężystych. Komórka RVE wygenerowana w ten sposób pozwala na przeprowadzanie odpowiednich analiz MES do wyznaczenia z mikrostruktury wszystkich parametrów (w tym parametru „przepuszczalności termicznej”) wymaganych dla wielo-skalowego modelowania propagacji i pochłaniania fal akustycznych w danym ośrodku porowatym.

The pore distribution in RVEs for foams with spherical pores can be effectively realized in random way, and at the same time maintaining the periodicity, using the proposed procedure based on the simple dynamics of elastic spheres. A periodic RVE cell generated accordingly with that procedure can be used by specific FE analyses in order to determine from microstructure all of the parameters (including the „thermal permeability” parameter) required by the multi-scale modelling of acoustic wave absorption and propagation in the represented porous medium.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty

Zielinski 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 of Sound and Vibration, 7-11 July 2013, Bangkok, Thailand.