

УДК 534-18

Копитько Ю.С.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ОГЛЯД МОЖЛИВИХ ЗАСТОСУВАНЬ
АКУСТИЧНИХ МЕТАМАТЕРІАЛІВ**

У даній роботі представлений результат огляду робіт в іноземних наукових журналах, що стосуються дослідження та розроблення акустичних метаматеріалів, і сформована хронологія розвитку області знань «Акустичні метаматеріали» до 2018 року (включно). Коротко надана інформація про історію розвитку галузі. Зібрані дані про останні дослідження і досягнення в галузі вивчення акустичних метаматеріалів (коротко – за 2013–2016 рр. і детальніше – за 2017–2018 рр.). Для огляду досягнень за 2017–2018 рр. були обрані роботи, де розглянуті конструкції метаматеріалів мають значні відмінності, або роботи, в яких було запропоновано нові ідеї щодо застосування метаматеріалів, що за структурою є схожими до вже описаних в інших дослідженнях. Коротко наведена оцінка зміни темпу розвитку галузі, наведені перспективи розвитку даної сфери, відмічені лідери в питанні дослідження акустичних метаматеріалів, наведені можливості та перспективи застосування таких матеріалів.

Ключові слова: метаматеріал, акустичний метаматеріал, метаповерхня, суперлінза, акустична лінза.

Постановка проблеми. Теми вивчення та розроблення акустичних метаматеріалів є актуальними на даний момент, про що свідчить стрімко зростаюча кількість публікацій, присвячених цим питанням. Частково це зумовлено широкою сферою застосування таких матеріалів: від фокусування звукових хвиль до звукопоглинання. Іншою перевагою використання акустичних метаматеріалів є можливість створення більш компактних систем для вирішення ряду задач акустики, ніж це було можливо раніше. У даній роботі на прикладах останніх публікацій висвітлені основні напрямки розвитку досліджень та можливості застосування таких метаматеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляди публікацій за даною темою [1, с. 1–324; 2, с. 1–352; 3, с. 31–39; 4, с. 43–48] не включають публікації за останні роки, тому є дещо застарілими.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз сучасного стану галузі «метаматеріали», а зокрема «акустичні метаматеріали», для подальших досліджень. Для досягнення мети були окреслені такі завдання: оцінка можливостей розроблення (а саме варіантів реалізації з точки зору структури) та можливих застосувань нових акустичних метаматеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

В останні роки спостерігається зростаючий інтерес до збірних конструкцій і композитних матеріалів, які або імітують властивості відомого матеріалу, або мають якісно нові, які не зустрічаються або не можуть бути легкодоступними в природі [5, с. 15].

Метаматеріал – це речовина або штучна структура, властивості якої виходять за рамки звичайних уявлень [6, с. 23].

Перші кроки на шляху до створення метаматеріалів були здійснені ще на початку минулого сторіччя. Поштовхом до розвитку цього питання стала новаторська робота Віктора Веселаго (1967) з електродинаміки ізотропних речовин з одночасно негативними значеннями діелектричної проникності та магнітної проникності [7, с. 2].

Розглянемо детальніше акустичні метаматеріали – штучно створені матеріали, призначені для контролю, направлення та маніпулювання звуковими хвилями, які можуть виникати в газах, рідинах і твердих тілах.

Акустичні метаматеріали були розроблені на основі результатів досліджень метаматеріалів. Дослідження з використанням таких матеріалів почалось у 2000 році (виготовлення і демонстрація звукових кристалів у рідині) [8, с. 1].

Сучасні досягнення в галузі створення і вивчення акустичних метаматеріалів

1. Розглянемо основні досягнення періоду 2013–2016 років.

Одна з перших публікацій інформує нас, що була створена стіна з метаматеріалу, що підсилює звук. Акустичні хвилі в такій стіні можуть проходити через отвори, менші за їх довжину хвилі. Метаматеріали вже були використані, щоб направити світлові хвилі через, здавалося б, непрохідні отвори. Для досягнення такої передачі зі звуком були розтягнуті шматки пластикової плівки через крихітні перфорації в тонкій металевій пластині [9, с. 1].

Пізніше вчені навчилися «закручувати» акустичні хвилі, і було створено звуковий пристрій, який назвали ротатором акустичного поля, для чого використовувалися спеціальні метаматеріали. Учені стверджують, що «їх ротатор звукового поля також можна вважати звуковим плащем-невидимкою, бо він може змушувати акустичні хвилі огинати об'єкти і приховувати їх, наприклад, від акустичного зондування» [10, с. 1].

Також була продемонстрована робота акустичної суперлінзи з від'ємним показником заломлення. Така суперлінза дозволяє реалізувати візуалізації з шириною плями та роздільною здатністю кращими, ніж дифракційна межа [11, с. 77].

Того ж року стало відомо про інший матеріал, що здатний збільшувати роздільну здатність акустичного зображення? – ширококутний акустичний гіперболічний метаматеріал із паперу та алюмінію [12, с. 1]. Такий матеріал також здатний фокусувати акустичні хвилі та контролювати кути, під якими поширюється звук. Метаматеріал взаємодіє з акустичними хвилями двома різними способами. В одному напрямку він демонструє додатну щільність (аналогічно додатному коефіцієнту заломлення), однак у перпендикулярному напрямку, в аспекті взаємодії зі звуком, демонструє від'ємну щільність. Це змушує акустичні хвилі відхилятися під кутами, які протилежні передбачуваним базовою фізикою. Запропонований метаматеріал може знайти застосування в медичній візуалізації та пристроях неруйнівного контролю [13, с. 1].

Значна частина публікацій, що стосуються розроблення акустичних метаматеріалів, присвячена питанням звукопоглинання. Зокрема, в роботі [14, с. 1] описано акустичну панель із метаматеріалу, що здатна поглинати низькочастотний звук. Дуже тонка структура, виготовлена з метаматеріалу, може повністю поглинути дуже низькі час-

тоти звуку для майже кожного кута падіння, і вона багато в чому перевершує традиційні акустичні моделі, використовувані для даних цілей. Структура групи дозволяє зменшити розміри та масу акустичних систем для поглинання акустичної енергії на дуже низьких частотах [15, с. 1].

Іншим напрямком досліджень є розроблення методів та пошукових способів керування параметрами метаматеріалу. Наприклад, у роботі [16, с. 1] описано акустичний метаматеріал із подвійною негативністю, що керується електромагнітами. Представлений матеріал складається з періодичних мембран і бічних отворів. Напряга і жорсткість періодично розташованих мембран контролюються електромагнітами, що створюють додаткову напругу, і, таким чином, швидкість передачі та фазова швидкість метаматеріалу можуть регулюватися напругою збудження електромагнітів. Показано, що напруга постійного струму 6 В може викликати зсув смуги пропускання з подвійною негативністю на 40% ширини смуги пропускання.

Була присвячена увага і зворотнім ефектам Доплера. Зокрема, в ширококутних акустичних метаматеріалах. У статті [17, с. 1] продемонстровано спосіб проектування довільних ширококутних акустичних метаматеріалів. Ці всіспрямовані акустичні метаматеріали створюються з «флейтоподібними» акустичними метакластерними наборами із сімома подвійними метамолекулами; дані матеріали також долають обмеження ширококутового від'ємного об'ємного модуля і щільності маси, щоб забезпечити область негативної рефракції й зворотні ефекти Доплера.

Структура метаматеріалів може бути найрізноманітнішою, проте окремо слід сказати про метаматеріали, що базуються на резонаторах Гельмгольца. Популярність таких розробок стрімко зростає, що пов'язано з широким спектром можливих призначень та функцій таких структур. Зокрема, в роботі [18, с. 1] розроблено новий тип спрямовуючої відбиваючої поверхні, що складається з масиву резонаторів Гельмгольца. Відбиваюча поверхня дає відмінну фокусну лінію, аналогічну параболічній циліндричній антені, і використовується для формування спрямованого променя звуку. Крім плоских відбиваючих поверхонь, для формування звукового променя можуть використовуватися складні поверхні, такі як опуклі або конформні форми, що полегшує їх застосування в системах звукопідсилення. Тому направляючі відбиваючі поверхні мають перспективи до

застосування в таких областях, як акустична візуалізація, звукова зброя і підводний зв'язок.

Здатність сповільнювати поширення хвиль у матеріалах викликала значний дослідницький інтерес. У роботі [19, с. 1] описана реалізація бездисперсійного повільного поширення акустичної хвилі за допомогою спіральних-структурованих метаматеріалів. За допомогою таких матеріалів тепер можна реалізувати безрозмірне гальмування звуку. Спіральні структуровані метаматеріали з розробленими неоднорідними елементарними комірками можуть перетворювати нормально падаючу плоску хвилю в пучок на заданій параболическій траєкторії, що самозбуджується.

Того ж року була спроектована і чисельно продемонстрована в роботі [20, с. 1] акустична одностороння метаповерхня, яка являє собою плоский акустичний субхвильовий шар, який поводить себе як матеріал із майже безрефлекторною поверхнею з довільною здатністю до хвильового управління для падаючої хвилі (хвиля, що падає з одного боку, при цьому фактично блокує зворотну хвилю). Проілюстрована реалізація мета структури, створеної шляхом об'єднання гібридних структур і лабиринтних структур. Результати роботи можуть надати більше можливостей для маніпуляції звуком і застосовуватися для вдосконалення пристроїв в таких областях, як ультразвукова візуалізація і терапія.

2. Огляд публікацій, присвячених дослідженню та розробленню акустичних метаматеріалів за 2017 рік.

Станом на 2017 рік продовжують активно публікуватися роботи, пов'язані з розробленням акустичних метаматеріалів, що базуються на резонаторах Гельмгольца. Зокрема, було розроблено градієнтну акустичну метаповерхню на основі резонаторів Гельмгольца, щоб вільно маніпулювати звуковим хвильовим фронтом, про що повідомляється в роботі [21, с. 1]. Широка смуга пропускання і висока ефективність передачі досягаються за допомогою акустичної метаповерхні, яка побудована за допомогою серії одиничних осередків для забезпечення бажаного дискретного розподілу акустичної швидкості. Кожна елементарна комірка складається з металевої пластини з чотирма періодично розміщеними резонаторами Гельмгольца і однією щільною. Узгодження імпедансу між метаповерхнею і фоновим середовищем може бути реалізовано шляхом регулювання ширини щілини елементарної комірки. Спроектвана конструкція може бути використана в системах формування зображення, керування променем і акустичних лінзах.

Інше застосування резонаторів Гельмгольца було запропоновано в роботі [22, с. 1], в якій мова йде про створення метадифузорів. Це особливий тип субхвильових звукових дифузорів, які являють собою жорстко закріплені щільні панелі, причому кожна щілина завантажувється масивом резонаторів Гельмгольца. Шляхом настройки геометрії метаматеріалу коефіцієнт відбиття панелі можна налаштувати так, щоб отримати або звичайну фазу відбиття, або помірну чи навіть ідеальну абсорбцію. Можливо контролювати дисперсію акустичних хвиль у щілинах, і просторово-залежний коефіцієнт відбиття може бути адаптований до конкретних функцій із рівномірним перетворенням Фур'є. Акустична енергія може бути розсіяна в інших напрямках, ніж дзеркальна. Було показано, що структури можуть бути оптимізовані для роботи в широкому діапазоні частот, що охоплюють 3 октави. Зокрема, представлено дифузор товщиною 3 см, що працює від 250 до 2000 Гц, товщина панелей становила від 1/46 до 1/20 розрахункової довжини хвилі, тобто приблизно від двадцятої до десятої від товщини традиційних конструкцій.

Тривають дослідження можливостей звукопоглинання за допомогою акустичних метаматеріалів. У роботі [23, с. 1] гібридний метаматеріал пропонується в якості нового класу звукопоглинача, який демонструє чудове широкомуглове низькочастотне звукопоглинання, а також відмінну механічну міцність. Застосовуючи теорію мікроперфорованої панелі, встановлено теоретичний метод розрахунку коефіцієнта поглинання звуку цього виду метаматеріалу. Досконале поглинання звуку зустрічається всього в декількох сотнях герц із пропускнуою здатністю двох октав 0,5. Такі акустичні метаматеріали зможуть служити в якості багатофункціональних матеріалів із надзвичайно низькочастотним звукопоглинанням, відмінною міцністю і поглинанням енергії удару.

3. Огляд публікацій за 2018 рік

2018 рік став найпродуктивнішим серед окреслених у роботі років із точки зору дослідження та розроблення акустичних метаматеріалів. Представлена дуже велика кількість робіт, присвячених питанням фокусування звукових хвиль та розробленню акустичних лінз. Продовжуються дослідження звукопоглинання за допомогою акустичних метаматеріалів, а також представлені нові ідеї стосовно варіантів розроблення метаматеріалів із точки зору їх структури.

Було запропоновано новий тип поверхонь на основі акустичних матеріалів – акустичні

метаповерхні. Такі поверхні мають незвичайні функціональні можливості в порівнянні з їх попередником у матеріалознавстві, а саме акустичними метаматеріалами. Метаповерхні являють собою 2D-матеріали із субхвильовою товщиною, які забезпечують новий шлях для маніпулювання звуковими хвилями. У роботі [24, с. 460] окреслена фундаментальна фізика метаповерхонь, описані їх різні концепції і стратегії проектування, обговорюються їх функціональні можливості для контрольованого відбиття, передачі і незвичайного поглинання. Зокрема, описані в загальних рисах основні конструкції акустичних метаповерхонь, у тому числі заснованих на резонатороподібних і мембраноподібних структурах типу Гельмгольца, обговорюються їх застосування, такі як фокусування променя, асиметрична передача і самогнуті промені.

Упродовж року досліджувались і пропонувались нові варіанти реалізацій акустичних лінз. Наприклад, у роботі [25, с. 1] описані можливості акустичної візуалізації з лінзами Люнебурга з метаматеріалу. Лінза Люнебурга являє собою пристрій зі сферично-симетричним градієнтним показником заломлення з унікальними властивостями зображення. Раніше запропоновані акустичні лінзи Люнебурга в основному обмежені двовимірними конструкціями для роботи на частотах від 1 кГц до 7 кГц. У роботі застосовується новий метод проектування для масштабованих метаматеріалів, щоб продемонструвати лінзи Люнебурга для повітряного звуку і ультразвукових хвиль. Виготовлені дві лінзи Люнебурга: ультразвукова версія для 40 кГц і версія для звуку частотою 8 кГц. Якість зображення ультразвукової версії продемонстровано експериментально.

Працюючи над винаходженням нових структур метаматеріалів, вчені часто пропонують неочікувані варіанти. Так, у роботі [26, с. 1] були запропоновані еластичні метаматеріали, що побудовані на принципах кірігамі, для керування довжиною хвилі при згині.

Кірігамі – окремих вид орїгамі, в якому дозволяється використання ножиць та розрізання паперу в процесі складання моделі.

Описано новий дизайн еластичного метаматеріалу з анізотропною масовою щільністю для маніпулювання згинальними хвилями в масштабі субхвилі. Тривимірний метаматеріал, натхненний кірігамі, може бути легко виготовлений шляхом розрізання та складання тонкої металевої пластини. За допомогою періодичного прикріплення резонансних структур кірігамі на верхній частині пластини-господаря можна створити пластину з метаматеріалу без будь-якої перфорації, яка погіршує міцність вихідної пластини. Запропонований метаматеріал має переваги конструкції без перфорації і можливість маніпулювання хвилями при згині по довжині хвилі, що може бути дуже корисним для інженерних застосувань, включаючи неруйнівний контроль і моніторинг стану конструкцій.

У роботі [27, с. 1] була запропонована реалізація ультратонкої акустичної лінзи для субхвильового фокусування. У цьому дослідженні повідомляється про першу експериментальну реалізацію ультратонкої субхвильової фокуруючої акустичної лінзи, яка може перевищувати межу дифракції Релея. Вона називається суперколивальною акустичною лінзою (SOAL) і має цікаву особливість, що дозволяє досягти субхвильового фокусування без необхідності працювати в безпосередній близькості від об'єкта, який буде відображатися. Ефективність фокусування SOAL на субхвилі перевіряється експериментально за допомогою системи вимірювання інтенсивності звуку. Із цих вимірів виявлено, що запропонована лінза може забезпечити чудові характеристики фокусування з повною шириною на половині максимуму з ефективністю передачі 26,5%.

Ще один варіант акустичної лінзи представлений у роботі [28, с. 1], в якій мова йде про проектування акустичної суперлінзи з використанням однофазних метаматеріалів із зіркоподібною ґратчастою структурою. Запропоновано однофазну суперлінзу з низькою густиною, яка дозволяє домогтися фокусування звуку за межами дифракційної межі. Моделювання перевіряє ефективне фокусування звуку однофазною суцільною лінзою з просторовим розрішенням приблизно $0,39 \lambda$.

Також активно розробляються нові варіанти застосування резонаторів Гельмгольца для створення метаматеріалів. Зокрема, в роботі [29, с. 1] описано зв'язані резонатори для уловлювання і поглинання звуку. У цьому дослідженні повідомляється про розроблення пристрою захоплення звуку, заснованого на зв'язаних резонаторах Гельмгольца, розміщених у повітряному хвилеводі, які можуть ефективно вирішити проблему витоку хвиль. Показано, що структура зв'язаних резонаторів може генерувати провали у спектрі пропускання за допомогою аналітичної моделі, отриманої з другого закону Ньютона і чисельного аналізу, заснованого на методі кінцевих елементів. Отримана теорія ефективного середовища, яка показує, що зв'язані резонатори викликають від'ємний ефективний об'ємний модуль поблизу

резонансної частоти й індукують плоскі смуги, які призводять до обмеження вхідної хвилі всередині резонаторів. Розраховані спектри пропускання та діаграма смуги з теорії ефективного середовища, які узгоджуються з результатами моделювання. Уловлювання та високе поглинання енергії звукової хвилі демонструється за допомогою розробленого пристрою.

Висновки. Ідея застосування метаматеріалів в акустиці є новою. Активний розвиток цієї сфери спостерігається з 2010-х років. Починаючи з 2016 року зростає кількість наукових публікацій, присвячених акустичним метаматеріалам, що свідчить про зростаючий інтерес та актуальність даної теми.

Найактивніше акустичні метаматеріали досліджують вчені з Китаю. Саме в Китаї створена компанія AMG, яка займається виключно розробленням, дослідженням та застосуванням у різноманітних сферах людської діяльності акустичних метаматеріалів. Компанія регулярно оприлюднює результати частини своїх досягнень у вигляді публікацій.

Оцінюючи кількість праць станом на 2018 рік, спостерігається продовження росту кількості нових імен серед вчених, що зацікавились даною темою, та, відповідно, продовжує зростати кількість публікацій за рік у порівнянні з попередніми роками.

Використання акустичних метаматеріалів може зіграти важливу роль в удосконаленні апаратів ультразвукової медичної діагностики. Іншою сферою застосування може стати маскуваність підводних об'єктів від ехолокаторів, а використання

фокусуючих звукових лінз на основі метаматеріалів може стати простим способом посилення звуку, що надходить від джерела в деяку область, наприклад, у приладах для діагностики слуху людини. Існують праці, присвячені сповільненню розповсюдження звукових хвиль, поглинанию звуку деякої смуги частот.

Багато ідей, що вже реалізовані в оптиці, поки не були адаптовані для акустики, а багато праць ще не знайшли собі застосування. Різноманіття вже розроблених матеріалів свідчить про те, що нам відкрилося широке поле для діяльності, адже для вирішення подібних задач розробляються метаматеріали з використанням найрізноманітніших речовин (алюміній, папір та ін.) та такі, що мають різну структуру. З іншого боку, незначна зміна структури дозволяє використовувати матеріал для вирішення іншої задачі. Активно досліджуються варіанти застосування резонаторів Гельмгольца у складі метаматеріалів, зокрема для створення фокусуючих метаматеріалів. На кафедрі акустики та акустоелектроніки НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» проводяться як теоретичні роботи, присвячені дослідженню таких резонаторів [30, с. 70], так і експериментальні [31, с. 34]. Для подальших досліджень та розроблення були обрані акустичні метаматеріали саме такого типу.

Дана область акустики є перспективною, оскільки такі реалізації можуть дозволити зменшити габарити обладнання, вдосконалити технічні параметри існуючого обладнання (ширина смуги пропускання, роздільна здатність та ін.) або ж створити абсолютно новий пристрій із новими функціями.

Список літератури:

1. Acoustic Metamaterials. Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking / Craster R. V., Guenneau S. NY. 2012. 324 p.
2. Frank Pai P. Theory and Design of Acoustic Metamaterials. 2015. 352 p.
3. Haberman M. R., Norris A. N. Acoustic Metamaterials. *Acoustics Today*. 2016. Vol. 12. № 3. P. 31–39.
4. Haberman M., Guild M. Acoustic metamaterials. *Physics Today*. 2016. Vol. 69. № 6. P. 43–48.
5. Engheta N. Metamaterials: Physics and Engineering Exploration. 2006. 440 p.
6. Возианова А.В. Нанофотоника. Часть 1 / ред. А.В. Возианова, М.К. Ходзицкий. Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. 94 с.
7. Boardman A. Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago. *Journal of optics*. 2011. № 2. P. 1–6. DOI : 10.1088/2040-8978/13/2/020401.
8. Acoustic metamaterial. *Wikipedia: the free encyclopedia*. URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_metamaterial (дата звернення : 18.03.2019).
9. Park J., Lee K., Wright O. et al. Giant Acoustic Concentration by Extraordinary Transmission in Zero-Mass Metamaterials. *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110. № 24. P. 1–5. DOI : 10.1103/PhysRevLett.110.244302.
10. Учёные научились «закручивать» акустические волны, для которых использовались специальные метаматериалы. *Scientific World – научно-информационный журнал*. URL : <http://sci-world.ru/technics/3051-uchenye-nauchilis-zakruchivat-akusticheskie-volny-dlya-kotoryh-ispolzovalis-specialnye-metamaterialy.html> (дата звернення : 20.02.2017).

11. Kaina N., Lemoult F., Fink M. et al. Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials. *Nature*. 2015. № 7567. P. 77–81.
12. New Metamaterial Manipulates Sound to Improve Acoustic Imaging. *NC STATE NEWS*. URL : <https://news.ncsu.edu/2015/12/jing-hm-acoustic-2015> (дата звернення 18.03.2019).
13. Shen C., Xie Y., Sui N. et al. Broadband Acoustic Hyperbolic Metamaterial. *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 115. № 25. P. 1–5. DOI : 10.1103/PhysRevLett.115.254301.
14. Jiménez N., Huang W., Romero-García V. et al. Ultra-thin metamaterial for perfect and omnidirectional sound absorption. *Applied Physics Letters*. 2016. № 12. P.121902. DOI : 10.1063/1.4962328.
15. Acoustic metamaterial panel absorbs low-frequency sound. *PHYSORG*. URL : <https://phys.org/news/2016-09-acoustic-metamaterial-panel-absorbs-low-frequency.html> (дата звернення : 18.03.2019).
16. Chen Z, Xue C, Fan L et al. A tunable acoustic metamaterial with double-negativity driven by electromagnets. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 30254. DOI : 10.1038/srep30254.
17. Zhai S., Zhao X., Liu S et al. Inverse Doppler Effects in Broadband Acoustic Metamaterials. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 32388. DOI : 10.1038/srep32388.
18. Kyungjun S, Jedo K, Shin H et al. Directional Reflective Surface Formed via Gradient-Impeding Acoustic Meta-Surfaces. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 32300. DOI : 10.1038/srep32300.
19. Zhu X, Li K, Zhang P et al. Implementation of dispersion-free slow acoustic wave propagation and phase engineering with helical-structured metamaterials. *Nature Communications*. 2016. № 7. P. 11731. DOI : 10.1038/ncomms11731.
20. Jiang X, Liang B, Yang J et al. Acoustic one-way metasurfaces: Asymmetric Phase Modulation of Sound by Subwavelength Layer. *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 28023. DOI : 10.1038/srep28023.
21. Lan J., Li Y., Xu Y. et al. Manipulation of acoustic wavefront by gradient metasurface based on Helmholtz Resonators. *Scientific Reports*. 2017. № 7. P. 10587. DOI : 10.1038/s41598-017-10781-5.
22. Jimenez, N.; Cox, T.J., Romero-García V. et al. Metadiffusers: Deep-subwavelength sound diffusers. *Scientific Reports*. 2017. № 7. P. 5389. DOI : 10.1038/s41598-017-05710-5.
23. Tang Y., Ren S., Meng H. et al. Hybrid acoustic metamaterial as super absorber for broadband low-frequency sound. *Scientific Reports*. 2017. № 7. P. 43340. DOI : 10.1038/srep43340.
24. Assouar B., Liang B., Wu Y. et al. Acoustic metasurfaces. *Nature Reviews Materials*. 2018. № 3. P. 460–472. DOI : 10.1038/s41578-018-0061-4.
25. Xie Y., Fu Y., Jia Z. et al. Acoustic Imaging with Metamaterial Luneburg Lenses. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 16188. DOI : 10.1038/s41598-018-34581-7.
26. Zhu R., Yasuda H., Hang G. et al. Kirigami-based Elastic Metamaterials with Anisotropic Mass Density for Subwavelength Flexural Wave Control. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 483. DOI : 10.1038/s41598-017-18864-z.
27. Hyun J., Kim Y. Doh I. et al. Realization of an ultrathin acoustic lens for subwavelength focusing in the megasonic range. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 91313. DOI : 10.1038/s41598-018-27312-5.
28. Chen M., Jiang H., Zhang H. et al. Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 1861. DOI : 10.1038/s41598-018-19374-2.
29. Jahdali R., Wu Y. Coupled Resonators for Sound Trapping and Absorption. *Scientific Reports*. 2018. № 8. P. 13855. DOI : 10.1038/s41598-018-32135-5.
30. Копитько Ю. Розрахунок резонансних частот горлової частини резонатора Гельмольца. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2018. Т. 23. № 5. С. 70–75. DOI : 10.20535/2523-4455.2018.23.5.147782.
31. Didkovskiy V., Naida S., Zaets V. Experimental study into the Helmholtz resonators' resonance properties over a broad frequency band. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1. № 5(97). P. 34–39. DOI : 10.15587/1729-4061.2019.155417.

ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

В данной работе представлен результат обзора работ в иностранных научных журналах и сформирована хронология развития области знаний «Акустические метаматериалы» до 2018 года (включительно). Собраны данные о последних исследованиях и достижениях в области изучения акустических метаматериалов (кратко за 2013–2016 гг. и подробнее – за 2017–2018 гг.). Коротко приведена оценка изменения темпа развития отрасли, приведены перспективы развития данной сферы. Отмечены лидеры в вопросе исследования акустических метаматериалов. Приведены возможности и перспективы применения таких материалов.

Ключевые слова: метаматериал, акустический метаматериал, метаповерхность, суперлинза, акустическая линза.

THE REVIEW OF POSSIBLE APPLICATIONS OF ACOUSTIC METAMATERIALS

The information about the history of studying metamaterials and about the initiation of the study of acoustic metamaterials is given briefly. The results of the review of works in foreign scientific journals are presented and the chronology of the development of the field of knowledge “Acoustic Metamaterials” until 2018 (inclusive) is formed in this paper. The data on recent research and achievements in the field of study of acoustic metamaterials is collected (shortly for 2013–2016 and in detail for 2016–2018). The short estimate of changes of the pace of development of the industry is given. The prospects for the development of this field are given. The leaders in the study of acoustic metamaterials are noted, the possibilities and prospects for the use of such materials are presented.

Key words: *metamaterial, acoustic metamaterial, metasurface, superlens, acoustic lens.*