

УДК 351.861:504.064:614.8

*О. А. Левтеров, д.т.н., с.н.с., доц. каф. (ORCID 0000-0001-5926-7146)**Є. С. Стативка, викл. (ORCID 0000-0003-1536-2031)**Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

ВПЛИВ ГУСТИНИ ЗАДИМЛЕННЯ НА ПАРАМЕТРИ АКУСТИЧНОГО ПРИБОРУ СПОРЯДЖЕННЯ РЯТУВАЛЬНИКА

Експериментально визначені поправочні значення відстані до перешкоди в залежності від акустичного імпедансу середовища для акустичного пристрою спорядження рятувальника. Результати вимірювань було отримано за допомогою розробленої експериментальної установки, яка враховувала, у реальному часі, зміни акустичного імпедансу та температуру середовища за допомогою двоканального вимірювача температури та датчика оптичного проникнення середовища. Температура середовища (у замкнутому просторі) змінювалась від 20 °С до 60 °С, а показник оптичного проникнення від 0 до 100 %, де 100 % відповідає повній оптичній непроникності середовища. Отримано залежності розповсюдження акустичних хвиль при зміні показника оптичної проникності середовища та температури. Поправочні значення для відстані до перешкоди, що розраховується акустичним пристроєм на дистанції 1000 мм становило (+0,013 м). Відносна похибка при проведенні вимірювань не перевищувала 2 %. Встановлено, що при зростанні хвильового імпедансу показники відстані до перешкоди зменшуються, тому коригуюча залежність має додатне значення. Отримані результати дозволяють підвищити достовірність показань акустичного пристрою, як додаткового спорядження рятувальника. Отримані, в результаті експерименту, дані дозволяють детальніше відображати форму перешкоди. Апроксимуючі поліноми коефіцієнта відображення акустичних хвиль залежності об'ємного вмісту включень при кутах падіння від 0° до 30° визначено. Використання отриманих поліномів дозволяє підвищити швидкість програмного коду керуючого мікроконтролеру акустичного пристрою. Отримані залежності враховано у розрахунковому алгоритмі програмного коду мікроконтролеру акустичного пристрою визначення форми та відстані до перешкоди, що дозволяє підвищити ефективність орієнтування рятувальника в умовах незадовільного візуального контролю при виконання аварійно-рятувальних робіт.

Ключові слова: акустичний пристрій, сенсор, акустичний опір, коефіцієнт відображення, візуальний контроль

1. Вступ

Проблеми орієнтування в агресивних умовах НС та фіксації зворотного шляху для евакуації з небезпечної зони можуть бути частково розв'язані шляхом застосування спеціальних допоміжних технічних засобів, що здатні підвищити рівень безпеки проведення рятувальних робіт і ліквідації наслідків НС.

Перспектива застосування пристрою акустичної дії, розміщеного на спорядженні рятувальника, як додаткового елементу необхідного оснащення полягає у підвищенні ефективності орієнтування у незадовільному для візуального контролю (НВК) середовищі з метою скорочення часу пошуку постраждалого та часу, що необхідний для евакуації. Також охарактеризовано параметри надзвичайної ситуації, що впливають на поширення акустичних хвиль. Для успішного використання акустичних систем орієнтування (дальнометрування) і навігації газових складових необхідні кількісні дані про характер розповсюдження акустичного випромінювання у середовищі з НВК (запорошення, задимлення).

Також, підтверджено та визначено залежність впливу температурного градієнту перешкоди з різних матеріалів на поширення акустичних хвиль та коригуюче поправочне значення показань відстані акустичного пристрою. Однак, залишається не вирішеним питання експериментального підтвердження та визначення

впливу акустичного імпедансу середовища на поширення акустичних хвиль. Під час ліквідації надзвичайних ситуацій в приміщеннях з НВК, у будівлях, спорудах зі складними планувальними рішеннями тощо, досить важко визначити розташування, характер та розмір перешкоди, що може трапитись на шляху слідування. Найважливішим заходом на початковому етапі рятувальних робіт є розвідка зони надзвичайної ситуації (НС). Складність виконання оперативних дій в зоні НС, орієнтування може бути спричинена НВК, внаслідок заповищеності, задимлення, зруйнованих будівельних конструкцій та іншими факторами, що ускладнюють орієнтування в просторі. При цьому, пошук й евакуація потерпілих, які опинились у небезпечній зоні та зворотний шлях, є також значною проблемою рятувальників, що ускладнюється фізичною втомою та вкрай сильним психологічно-емоційним навантаженням. Крім того, ланка газодимозахисної служби (ГДЗС), як правило, має обмежений час для зворотного виходу, який визначається за залишком повітря (кисню) в засобах індивідуального захисту органів дихання та зору.

Зменшення ризику при проведенні рятувальних робіт будь-якого змісту (пожежа, руйнування, військові події, техногенні катастрофи, природні катаклізми та ін.) є надзвичайно важливим для збереження життя рятувальників та збільшення ефективності виконання робіт, зазвичай пов'язаних з різними неконкретизованими екстремальними ситуаціями. Фактори надзвичайної ситуації погіршують рівень орієнтування фахівців рятувальних служб у просторі з НВК та складною пропускну здатністю середовища внаслідок заповищення, або задимлення середовища, утворення деформацій та руйнувань будівельних конструкцій. Рятувальники проводять оперативні дії в умовах надзвичайних ситуацій, які часто супроводжуються задимленням середовища. У таких умовах, фахівці рятувальних служб можуть мати обмежені можливості визначення місця розташування потерпілих та можуть стикатися зі складністю пошуку виходу.

Акустичні пристрої спорядження рятувальника є важливими засобами для забезпечення безпеки під час проведення рятувальних операцій. Їхні параметри, такі як дальність дії, якість звуку та точність визначення напрямку звуку, можуть бути суттєво погіршені в умовах високої густини задимлення.

Отже, дослідження впливу густини задимлення на параметри акустичного пристрою спорядження рятувальника є дуже важливим для забезпечення ефективності рятувальних операцій та безпеки рятувальників. Результати такого дослідження можуть бути використані для вдосконалення акустичного спорядження рятувальників та розробки рекомендацій щодо їх використання в умовах задимлення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Від мобільності рятувальника в зоні ліквідації наслідків НС, швидкості прийняття ним рішень та його власної безпеки залежить успіх виконання службових завдань. В роботі [1] проведено аналіз виробничого травматизму серед особового складу Державної служби України з надзвичайних ситуацій за 2005–2016 роки. Всього за 12 років на території України під час проведення оперативних дій сталося 877 нещасних випадків серед рятувальників, під час яких було травмовано 1034 особи. Близько 7 % від загальної кількості потерпілих за 12 років були травмовані смертельно. Найбільша кількість рятувальників отримали механічні (464 особи) травми. У низці випадків НС обставини загибелі рятувальників невідомі, тому можна зробити припущення, що отримані травми та загибель рятувальників, під час проведення аварійно-рятувальних робіт (АРР), також пов'язані з

неможливістю оперативно отримувати інформацію про навколишні обставини в приміщеннях з НВК.

Використання сучасних засобів та методів, які ґрунтуються на альтернативних фізичних явищах, таких як акустичні хвилі, може підвищити рівень орієнтування рятувальників в умовах НВК та знизити кількість нещасних випадків. Таким засобом (заснованим на акустичних хвилях) може бути додатковий пристрій спорядження рятувальника. Для використання такого пристрою необхідно визначення його параметрів в умовах факторів, які супроводжують НС. У статті авторів [2] були вирішені завдання, пов'язані з впливом на параметри акустичного пристрою таких факторів НС як: температура середовища та температура перешкоди. Для визначення інших параметрів акустичного пристрою, таких як залежність від густини задимлення та кута падіння акустичних хвиль необхідно провести додаткові експерименти.

У роботі [3, 4] реалізовано метаматеріальну систему з показником заломлення акустичної хвилі, близьким до нуля. Розроблено систему, яка використовує резонатори Гельмгольца, та аналізується за допомогою теорії еквівалентної схеми. Завдяки експерименту спостерігається велика фазова швидкість у метаматеріалі та висока концентрація щільності енергії у вузькому нормальному хвилеводі, безпосередньо з'єднаному з метаматеріалом. Акустична метаматеріальна система може бути застосована для розробки пристрою для концентратора акустичної енергії та акустичного фільтра.

Даний метод застосування метаматеріалу для дослідження поширення акустичних хвиль можна назвати еталонним. Бо похибка з визначення коригуючого параметру відстані поширення акустичної хвилі за одиницю часу наближається до нуля. Але в такому випадку, навіть в умовах, коли властивості матеріалу наближені до ідеально-необхідних, вплив акустичного імпедансу на розповсюдження акустичних хвиль не враховано.

У статті [5] представлено теоретичне дослідження впливу фазових перетворень, складу та інших теплофізичних властивостей парогазокрапельних систем на характеристики поширення та загасання слабких хвиль у таких системах. Встановлено що наявність включень різних матеріалів і розмірів істотно впливає на динаміку акустичного сигналу у багатofракційних газових сумішах, що необхідно враховувати при розробці методики акустичної діагностики розглянутих середовищ. Дано пояснення впливу немонотонної залежності коефіцієнта ослаблення низькочастотних збурень від концентрації крапель у двофазній суміші. Однак, оскільки виконання оперативних завдань рятувальниками схильне до роботи при різких змінах температур, дослідження впливу акустичного імпедансу середовища з урахуванням впливу температурного градієнту середовища на розповсюдження акустичних хвиль не досліджено.

Аналіз досліджень засвідчив, що авторами не приділено достатньо уваги впливу факторів надзвичайної ситуації (температура, задимлене середовище) на розповсюдження акустичних хвиль. Це, своєю чергою, призводить до похибок у вимірах відстані до перешкоди за допомогою пристрою акустичної дії. Тому невирішеною частиною проблеми використання властивостей акустичних хвиль є визначення коригуючого коефіцієнту впливу акустичного імпедансу середовища на визначення відстані до перешкоди акустичного пристрою спорядження рятувальника.

3. Мета роботи та завдання дослідження

Метою роботи є експериментальне виявлення впливу густини задимлення на параметри акустичного пристрою спорядження рятувальника.

Завданнями дослідження є:

- розробити експериментальну установку для дослідження впливу рівнів градієнта густини задимленого (запорошеного) середовища на розповсюдження акустичних хвиль;
- визначити коефіцієнти апроксимуючих поліномів діапазону кута падіння акустичних хвиль від об'ємного вмісту зважених частинок (густина задимлення);
- експериментально встановити значення коригуючого коефіцієнту впливу акустичного імпедансу середовища на визначення відстані до перешкоди акустичного пристрою спорядження рятувальника.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – параметри акустичного пристрою в умовах надзвичайної ситуації. Предмет дослідження – процес розповсюдження акустичних хвиль в умовах надзвичайної ситуації. Гіпотеза дослідження – відмінності значень параметрів акустичного пристрою в умовах надзвичайної ситуації.

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент, статистична обробка експериментальних даних. При виконанні роботи застосовувалися емпіричні, теоретичні, функціональні та системні методи дослідження.

5. Розробка установки дослідження впливу імпедансу середовища на розповсюдження акустичних хвиль

З метою проведення експериментальних досліджень визначення впливу хвильового імпедансу середовища на поширення акустичних хвиль та розрахунку коригуючого коефіцієнту для врахування хвильового опору середовища в якому поширюється акустична хвиля було спроектовано та виготовлено дослідну установку (рис. 1). З її допомогою проведено експеримент, що складалась з таких компонентів: 1 – блок акустичних датчиків; 2 – датчик оптичної проникності середовища; 3 – акустичні хвилі; 4 – скляна колба довжиною 1 м та внутрішнім діаметром 0,09 м; 5 – нагрівальний елемент; 6 – термопара; 7 – матеріал, що виступав зразком перешкоди; 8 – польовий транзистор; 9 – резистор з регульованим опором, 10 кОм; 10 – вимикач; блок живлення (БЖ); блок управління (БУ), блок управління рівнем задимленням (БУЗ).

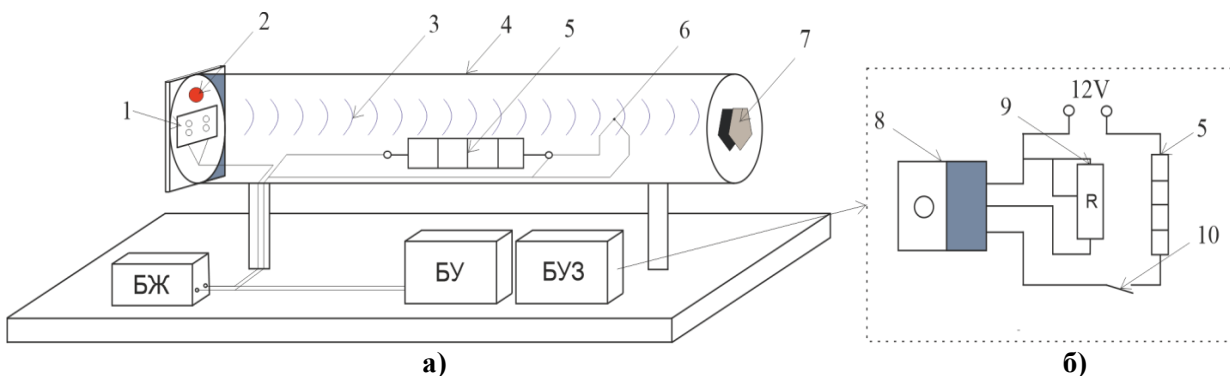


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження впливу хвильового імпедансу на поширення акустичних хвиль: а – компоненти дослідної установки; б – блок управління задимленням

На одному кінці скляної колби закріплено акустичний датчик (випромінювач звукових коливань та приймач). На відстані 1 м з протилежної сторони колби розміщено матеріал, що є умовною перешкодою (цегла, метал, пластик, пінопласт, текстиль, картон). З використанням представленої експериментальної бази в роботі [6] основним матеріалом для проведення дослідів обрано бетон, як одного з найбільш поширених на об'єктах з масовим перебуванням людей.

Акустичний генератор датчика генерує акустичні хвилі, які поширюються уздовж скляної колби, відбиваючись від перешкоди, потрапляють до приймача датчика. Показання акустичного пристрою фіксуються на індикаторі. Випромінювачем і приймачем виступали електродинамічні гучномовці, сигнали з яких надходили на осцилограф, де реєструвалися різниці фаз між джерелом і приймачем звукових коливань.

Нагрівач підключений до блоку живлення. Для відновлення початкових умов у колбі після кожного випробування тестового матеріалу здійснювалася вентиляція протягом 30–40 с.

Скляна колба заповнювалась повітрям, у середині якої встановлено нагрівальний елемент. Під час проведення дослідження нагрівальний елемент змочується машинним мастилом, під час згоряння якого в колбі виникає ефект задимлення. Для визначення середнього значення коригуючого коефіцієнту впливу хвильового імпедансу на поширення акустичних хвиль рекомендовано проведення декількох етапів досліду з різним ступенем задимлення у порядку з показниками від прозорого до задимленого середовища. Для точності випробувань задано кількість випромінювання акустичних імпульсів акустичним датчиком. Реєстрація вимірювань показань акустичних датчиків здійснюється з частотою 0,3–0,5 с.

Діапазон робочих температур захисного одягу для пожежних-рятувальників згідно [7] становить від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однак діапазон виживання для людського організму всередині захисного одягу не має перевищувати $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Небезпека підвищеної температури середовища полягає в тому, що вдихання розігрітого повітря разом із продуктами згоряння може призвести до ураження органів дихання та смерті. В умовах пожежі підвищення температури середовища до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ вже є життєво-небезпечною для людини. Тому експериментальні дослідження з впливу акустичного імпедансу на поширення акустичних хвиль проводились при зростанні температури від $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання температури у середині установки використовувалась термопара.

Під час експериментальних досліджень для визначення та контролю ефективності проникнення світлового потоку у задимленому середовищі скляної колби використовувався датчик оптичної проникності середовища із різною колірною температурою світіння потужністю 1 Вт та 3 Вт, технічні параметри яких наведено в табл. 1.

6. Визначення впливу градієнта густини середовища на розповсюдження акустичних хвиль

У роботах [8, 9] наведено результати порівняння коефіцієнта відображення в залежності від об'ємного вмісту часток (крапель) першої фракції, або виважених частинок при різних кутах падіння θ_1 , а також графік залежності коефіцієнта відображення акустичних хвиль від об'ємного вмісту включень при різних кутах падіння акустичних хвиль. Заштрихованою областю на графіку є визначений діапазон кута падіння.

У зв'язку з тим, що додатковий пристрій розміщено на шоломі рятувальника, то кут падіння акустичної хвилі, практично в усіх випадках при виконанні рятувальних робіт, знаходиться у діапазоні $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому параметри, що враховують вплив на акустичні хвилі в умовах НС знаходяться в межах кривих залежності коефіцієнта відображення акустичних хвиль від об'ємного вмісту включень при різних кутах падіння. Дану залежність хвильового імпедансу в обраному діапазоні наведеному у статті авторів [2] для подальших розрахунків можна записати у вигляді виразу (1).

$$0,4174\alpha_{2a}^2 + 0,2134\alpha_{2a} \leq R^2 \leq 0,5689\alpha_{2a}^2 - 0,0573\alpha_{2a}, \quad (1)$$

де R^2 – акустичний опір середовища, α_{2a} – об'ємний вміст частинок.

Даний вираз включено у вигляді полінома в блок управління, для подальшого використання у програмних засобах блоку управління додатковим пристроєм акустичної дії.

Акустичний імпеданс або комплексний акустичний опір середовища за своєю суттю характеризує опір, який середовище чинить на поверхню, що коливається. Являє собою відношення комплексних амплітуд звукового тиску до коливальної об'ємної швидкості частинок середовища, яку обчислюють як добуток, усередненої по площі швидкості коливань частинок середовища і площі, для якої визначається акустичний імпеданс. У загальному випадку, акустичний імпеданс визначається згідно з формулою (2):

$$Z_a = R_a + iX_a, \quad (2)$$

де i – уявна одиниця; R_a – дійсна частина, так званий активний акустичний опір, визначається дисипацією енергії в акустичній системі і втратами на випромінювання звуку. Уявна частина – X_a , так званий реактивний акустичний опір, є наслідком наявності в акустичній системі сил пружності або інерції мас. Тому реактивний опір буває пружним або інерційним. Одиницею вимірювання акустичного імпедансу в системі SI є $1\text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$.

Основна увага приділяється характерним властивостям акустичних випромінювачів і поглиначів, але необхідно чітко розуміти припущення, зроблені щодо самого поширення акустичних хвиль. Виводячи подібності зі світлової оптики, імпеданс матеріалу та повітря можна тлумачити як аналогічний показникам заломлення. Подібно до характеристичного опору матеріалу, повітря як середовище також має власний імпеданс. Цей імпеданс поля залежить від поширення акустичної хвилі.

У випадку апроксимації плоскої хвилі характерний імпеданс поля визначається за формулою (3):

$$Z = \rho c, \quad (3)$$

де густина середовища – ρ , швидкість звуку – c .

Балансувальні фактори, такі як передача, відображення, поглинання та ослаблення, формують основу балансу акустичної енергії.

Імпеданс в акустиці – це міра протидії, яку система представляє акустичному потоку в результаті застосування акустичного тиску до системи. Він показує, який звуковий тиск створюється коливанням молекул конкретного акустичного середовища на даній частоті. Нижче наведено деякі інші широко прийняті визначення, засновані на конкретних застосуваннях.

Питомий акустичний опір, z (тиск/швидкість частинок), характерна властивість середовища та типу хвилі, що поширюється.

Акустичний імпеданс, Z (тиск/об'ємна швидкість), термін, корисний для обговорення акустичного випромінювання від поверхонь, що вібрують, і передачі цього випромінювання через зосереджені акустичні елементи або через труби та рупори.

Спочатку вимірювання імпедансу виконувалися за допомогою аналогових пристроїв, де криві були побудовані з використанням значень, отриманих безпосередньо з аналогового вихідного сигналу.

Експериментальні дослідження проводилися за двома такими основними напрямками:

- визначення акустичного випромінювання джерел, які можуть бути застосовані для виготовлення експериментального зразка;
- визначення ефективності проникнення акустичних хвиль у задимленому середовищі.

Рівень задимлення в скляній колбі прийнято за діапазон від 100 % (повністю прозоре середовище) до 0 % (повністю задимлене середовище). Під поняттям повністю задимленого середовища високої щільності мається на увазі, що згідно з даними [10, 11] при освітлюванні груповим пожежним ліхтарем з лампочкою потужністю 21 Вт зі світловим потоком 400 Лм вважається, що дим є оптично щільним при умові видимості предметів з відстані 3 м.

Тоді, відстань до перешкоди визначається за формулою (4):

$$r = \frac{|Z|}{2\rho} kt. \quad (4)$$

Таким чином, для визначення відстані до перешкоди та її форми з урахуванням впливу акустичного імпедансу середовища на поширення акустичних хвиль, необхідно застосовувати коефіцієнт відображення k , хвильовий імпеданс Z , температуру середовища t (°C).

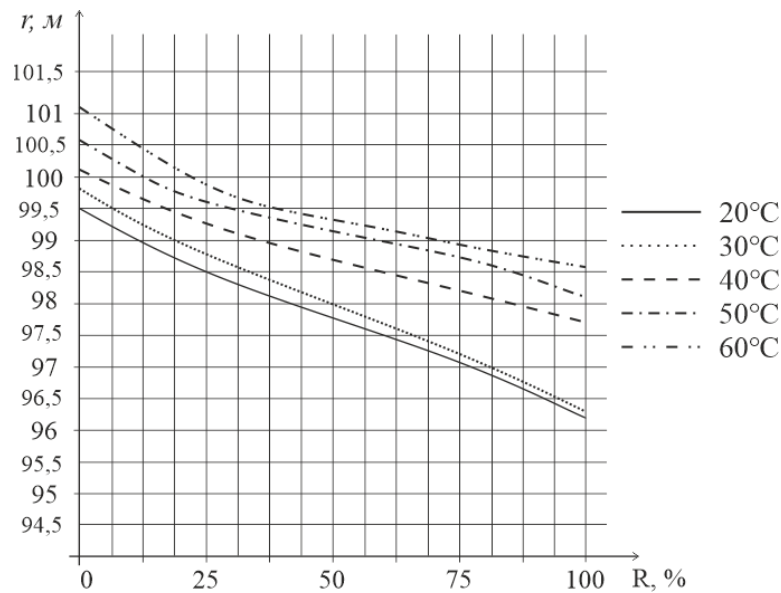
Результати експерименту наведені в табл. 1.

Згідно з отриманими даними, побудована графічна залежність (рис. 3), на якій можна побачити зміну значень відстані від акустичного датчика до перешкоди при зменшенні показника оптичної проникності середовища та підвищенні температури середовища всередині скляної колби. Розраховано абсолютну та відносну похибки для кожного етапу вимірів.

В результаті проведеного експерименту та отриманих даних можна констатувати, що акустичні хвилі поширюючись у градієнтах густини середовища показують сильне просторове зростання збурення щільності, коли хвиля поширюється в напрямку збільшення щільності, і затухання, коли хвиля поширюється в напрямку зменшення щільності. Хоча амплітуда хвилі сама по собі зменшується, коли хвиля поширюється в область меншої щільності, відносна амплітуда збільшується.

Табл. 1. Залежності градієнту густини задимленого (запорошеного) середовища на показання акустичного пристрою

№ з/п	Температура середовища в колбі, °С	Оптична проникність середовища R, %				Середній показник похибки показань пристрою		Середнє значення коригуючого параметру відстані, м
		100%	75%	25%	0%	Δ , м	δ , %	
1.	20 °С	0,962	0,97	0,984	0,995	0,02	2	0,022
2.	30 °С	0,962	0,974	0,987	0,997	0,019	1,9	0,019
3.	40 °С	0,975	0,983	0,991	1,001	0,009	0,9	0,009
4.	50 °С	0,981	0,988	0,995	1,009	0,006	0,6	0,0064
5.	60 °С	0,986	0,992	0,997	1,017	0,001	0,15	0,0064

**Рис. 2. Залежність розповсюдження акустичних хвиль при зміні показника оптичної проникності середовища та температури**

Можна очікувати, що це призведе до посилення хвилі та припустимо поведінки подібної до удару.

7. Обговорення результатів визначення параметрів акустичного пристрою екіпірування рятувальників

В результаті проведення дослідження отримані дані внесено до таблиці та побудовано графічну залежність. Зі зростанням градієнта густини задимленого середовища від повністю прозорого (100 %) до повністю задимленого (0 %) спостерігається зростання показників відстані від акустичного пристрою до перешкоди на дистанції 1000 мм. Це пояснюється тим, що молекули речовини в задимленому середовищі розташовані ближче один до одного, тому вони взаємодіють частіше та з більшою силою, що дозволяє передавати акустичні хвилі більш ефективно. Зі збільшенням температури середовища в якому поширюються акустичні хвилі, спостерігається зростання показників відстані від акустичного пристрою до перешкоди на дистанції 1000 мм. При цьому середнє значення коригуючого параметру пристрою зменшується від 0,022 м за температури середовища 20 °С до 0,0064 м за температури середовища 60 °С. Зміна швидкості поширення хвиль у градієнті температури викликана змінами в молекулярній структурі середовища та її фізичних властивостях. Акустичний імпеданс середовища є вагомим факто-

ром, який має вплив на поширення акустичних хвиль в середовищі. Розуміння цього ефекту є важливим для розробки та оптимізації різноманітних акустичних технологій. Якщо акустичні хвилі поширюються в середовищі з високим імпедансом, то швидкість руху хвиль зменшується, а амплітуда збільшується. Якщо акустичний імпеданс середовища змінюється, то змінюється і швидкість поширення акустичної хвилі. Наприклад, якщо акустичний імпеданс збільшується, то швидкість поширення акустичної хвилі зменшується. Якщо акустичний імпеданс двох середовищ відрізняється, то на межі цих середовищ виникає відбивання акустичної хвилі. Це може призвести до створення інтерференційних ефектів, які можуть бути корисними або шкідливими для деяких додатків.

Доведено, що урахування впливу факторів надзвичайної ситуації (задимлення, заповишеність, висока температура) на фізичні властивості акустичних хвиль з метою підвищення точності роботи даного пристрою враховується за допомогою поправочних коефіцієнтів, що враховують кут падіння, об'єм зважених частинок, температуру, хвильовий опір середовища. Результатами виконаних досліджень є визначення коригуючого параметру середовища, в якому функціонує прилад та алгоритм розрахунків поправочних коефіцієнтів для програми керування приладу. У практичному аспекті, обчислення коригуючого параметру акустичного імпедансу для впровадження в розрахунковий поліном блоку управління, роботехнічних установок, випромінювачів і приймачів, дозволяє, підлаштовуючи їх конструкцію і підбираючи матеріали, за рахунок зниження втрат звукової енергії, підняти ККД всій системі, що випромінює звук або окремих її частин. Для формування характеристик в програму керування приладу запропоновано внести відповідні поправочні коефіцієнти, які дозволять врахувати вплив означених вище особливостей середовища на чутливість та точність показань приладу. У якості коригуючих параметрів розглянути: хвильовий опір акустичній хвилі, який залежить від щільності задимлення та заповишення середовища; температурний градієнт, який впливає на характеристики акустичної хвилі. За результатами досліджень впливу параметрів середовища на характеристики акустичних хвиль отримано залежність (4), яка дозволяє визначити відстань до перешкоди та її форму. Побудовано експериментальну установку визначення характеру впливу акустичного імпедансу середовища на поширення акустичних хвиль. Особливість застосування пристроїв акустичної дії полягає в тому, що вони можуть працювати в умовах низької видимості, коли зорова орієнтація у просторі ускладнена через задимлення, туман або інші чинники. За допомогою акустичних сонарів і ехолотів можна виявляти об'єкти, які знаходяться поза зонами прямої видимості, і отримувати інформацію про їх розташування та відстань до них.

Обмеження притаманні цим дослідженням: обмеження зони охоплення – результати досліджень можуть бути обмежені залежно від зони охоплення акустичного пристрою. Зона охоплення може бути обмеженою через рівень шуму в середовищі, відстані до об'єкту.

- помилки вимірювань: помилки можуть виникати через зміни у характеристиках середовища, або в наслідок взаємодії з іншими об'єктами.

- інтерференція: інші джерела шуму або інтерференція можуть впливати на точність та надійність даних, зібраних акустичним пристроєм.

Вищеперераховані недоліки можуть бути усунуті за рахунок розвитку технологій, що може призвести до створення більш точних та надійних акустичних пристроїв з більшою зоною охоплення. Вдосконалення алгоритмів обробки да-

них, використання більш складних алгоритмів обробки даних допоможе у боротьбі з інтерференцією, що підвищить точність даних.

Основний внесок дослідження може полягати у з'ясуванні того, як градієнт густини середовища впливає на розповсюдження акустичних хвиль і як цей вплив може бути використаний для вирішення різних завдань, наприклад, для дослідження структури твердих тіл або для покращення якості медичних діагностичних методів.

Одним із труднощів, з якими можна зіткнутися в цих дослідженнях, є математичне моделювання розповсюдження акустичних хвиль у градієнті густини середовища. Це може вимагати складних розрахунків, що залежать від багатьох параметрів, таких як форма об'єкту, який досліджується, та параметри середовища, такі як густина, тиск і температура.

Також може бути складним експериментальне дослідження розповсюдження акустичних хвиль у градієнті густини середовища через труднощі зі збиранням даних та обробкою результатів.

8. Висновки

1. Розроблено експериментальну установку для дослідження впливу рівнів градієнта густини задимленого (запорошеного) середовища на розповсюдження акустичних хвиль. Встановлено, що при розповсюдженні акустичних хвиль в зростаючому температурному градієнті середовища швидкість акустичних хвиль збільшується. Що не суперечить загальноприйнятим фундаментальним законам акустики. Шляхом розрахунково-теоретичних досліджень розроблено підґрунтя для практичного створення акустичного приладу, який відрізняється від відомих додатковими характеристиками, а саме, здатністю ефективно функціонувати в умовах високої температури, щільного задимлення та запорошення повітря.

2. Визначено коефіцієнти апроксимуючих поліномів діапазону кута падіння акустичних хвиль на поверхню перешкоди від об'ємного вмісту зважених частинок (густина задимлення). Запропоновано застосування характеристики коефіцієнта відображення акустичних хвиль від об'ємного вмісту включень при різних кутах падіння для розрахунків в межах падіння акустичних хвиль від 0 °C до 30 °C за допомогою виразу. Використання отриманих поліномів дозволить підвищити швидкодію програмного коду керуючого мікроконтролеру акустичного пристрою. Визначено діапазон прозорості середовища, при якому 100 % повна оптична непроникність середовища (ефект задимлення), а 0 % повна оптична проникність середовища (прозоре).

3. Експериментально встановлено значення коригуючого коефіцієнту впливу акустичного імпедансу середовища на визначення відстані до перешкоди акустичного пристрою спорядження рятувальника. Коригуюче поправочне значення показань відстані акустичного пристрою на дистанції 1000 мм до перешкоди становить (+0,013 м). Відносна похибка вимірювань не перевищувала 2 %. Встановлено, що при зростанні хвильового імпедансу показники відстані до перешкоди зменшуються, тому коригуюча залежність має додатне значення. Максимальний вплив хвильового опору середовища на відстані 1 м від джерела випромінювання до об'єкту складає 0,03 м.

Література

1. Костенко Т. В. Особливості травматизму рятувальників в Україні. Вісті Донецького гірничого інституту. 2017. №1. С. 165–169. ISSN 1999-981X
2. Левтеров О. А., Стативка Є. С. Визначення параметрів акустичного при-

ладу екіпірування рятувальників. Problems of Emergency Situations. 2022. № 2(36). С. 280–295. doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-21

3. Hiremath N., Kumar V., Motahari N., Shukla D. An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects. Metrology. 2021. P. 17–38. doi: 10.3390/metrology1010002

4. Kirtskhalia V. The dependence of the speed of sound in the Earth's atmosphere on its density and the correction of Mach's number. Iliia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/1024/1/012037

5. Teregulova E. A. Features of the Passage of Acoustic Waves at Right Angle through a System of Layers of Multifractional Gas Suspensions. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. P. 2222–2225. doi: 10.1134/S1995080221090262

6. Choon M. P., Sang H. Lee. Propagation of acoustic waves in a metamaterial with a refractive index of near zero. Applied Physics Letters. 2013. P. 46–57. doi 10.1063/1.4811742

7. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 116. № 02027. doi: 10.1051/mateconf/201711602027

8. ДСТУ EN 469:2017. Захисний одяг для пожежників. Вимоги щодо показників якості захисного одягу для пожежників. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=82840

9. Wilk-Jakubowski J. Analysis of Flame Suppression Capabilities Using Low-Frequency Acoustic Waves and Frequency Sweeping Techniques. Department of Information Systems. Kielce University of Technology. 2021. P. 5–8. doi: 10.3390/sym13071299

10. Gubaidullin D. A., Teregulova E. A. Propagation acoustic signal in the multifractional gas suspension. Journal Physics. Journal of Physics: Conf. Series 1328. 2019. P. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/1328/1/012079

11. Kenney L. W., Degroot D. W., Lacy A. H. Extremes of human heat tolerance: life at the precipice of thermoregulatory failure. Journal of Thermal Biology. 2004. Vol. 29. P. 479–485. doi: 10.1016/j.jtherbio.2004.08.017

O. Levterov, DSc, Senior Researcher, Associate Professor of the Department

Y. Statyvka, Lecturer of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

INFLUENCE OF SMOKE DENSITY ON THE PARAMETERS OF THE ACOUSTIC DEVICE OF THE RESCUER'S EQUIPMENT

Experimentally determined correction values of the distance to the obstacle depending on the acoustic impedance of the environment for the acoustic device of the rescuer's equipment. The measurement results were obtained using the developed experimental setup, which took into account, in real time, changes in acoustic impedance and temperature of the environment using a two-channel temperature meter and an optical penetration sensor of the environment. The temperature of the environment (in the confined space) varied from 20 °C to 60 °C, and the optical penetration index from 0 to 100 %, where 100 % corresponds to complete optical opacity of the environment. Dependencies of the propagation of acoustic waves upon changing the optical permeability of the medium and temperature were obtained. The correction value for the distance to the obstacle calculated by the acoustic device at a distance of 1000 mm was (+0,013 m). The relative error during the measurements did not exceed 2 %. It was found that when the wave impedance increases, the indicators of the distance to the obstacle de-

crease, so the corrective dependence has a positive value. The obtained results make it possible to increase the reliability of the readings of the acoustic device as an additional equipment of the rescuer. The data obtained as a result of the experiment make it possible to display the shape of the obstacle in more detail. Approximating polynomials of the reflection coefficient of acoustic waves depending on the volume content of inclusions at angles of incidence from 0 °C to 30 °C have been determined. The use of the obtained polynomials allows to increase the speed of the program code of the control microcontroller of the acoustic device. The obtained dependencies are taken into account in the calculation algorithm of the program code of the microcontroller of the acoustic device for determining the shape and distance to the obstacle, which makes it possible to increase the efficiency of the rescuer's orientation in conditions of unsatisfactory visual control during emergency rescue operations.

Keywords: acoustic device, sensor, acoustic resistance, reflection coefficient, visual control

References

1. Kostenko, T. V. (2017). Osoblyvosti travmatyzmu riatuvalnykiv v Ukraini. *Vi sti Donetskoho hirnychoho instytutu*, 1(40), 165–169. ISSN 1999-981X
2. Lievtierov, O. A., Statyvka, Y. S. (2022). Vyznachennia parametriv akustychnoho prykladu ekipiruvannia riatuvalnykiv. *Problems of Emergency Situations*, 2(36), 280–295. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-21
3. Hiremath, N., Kumar, V., Motahari, N., Shukla, D. (2021). An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects. *Metrology*, 1, 17–38. doi: 10.3390/metrology1010002
4. Kirtskhalia, V. (2021). The dependence of the speed of sound in the Earth's atmosphere on its density and the correction of Mach's number. *Iliia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology. Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/1024/1/012037
5. Teregulova, E. A. (2021). Features of the Passage of Acoustic Waves at Right Angle through a System of Layers of Multifractional Gas Suspensions. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 42(9), 2222–2225 doi: 10.1134/S1995080221090262
6. Choon, M. P., Sang, H. (2013). Propagation of acoustic waves in a metamaterial with a refractive index of near zero. *Applied Physics Letters*, 46–57. doi: 10.1063/1.4811742
7. Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Sidnei, S., Shchipets, S. (2017). Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. *MATEC Web of Conferences*, 116. doi: 10.1051/mateconf/201711602027
8. DSTU EN 469:2017. Zakhysnyi odiah dlia pozhezhnykiv. Vymohy shchodo pokaznykiv yakosti zakhysnoho odiahu dlia pozhezhnykiv. Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=82840
9. Wilk-Jakubowski, J. (2021). Analysis of Flame Suppression Capabilities Using Low-Frequency Acoustic Waves and Frequency Sweeping Techniques. *Department of Information Systems. Kielce University of Technology*, 5–8. doi: 10.3390/sym13071299
10. Gubaidullin, D. A., Teregulova, E. A. (2019). Propagation acoustic signal in the multifractional gas suspension. *Journal Physics. Journal of Physics: Conf. Series*, 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/1328/1/012079
11. Kenney, L. W., Degroot, D. W., Lacy, A. H. (2004). Extremes of human heat tolerance: life at the precipice of thermoregulatory failure. *Journal of Thermal Biology*, 479–485. doi: 10.1016/j.jtherbio.2004.08.017

Надійшла до редколегії: 15.03.2023

Прийнята до друку: 11.04.2023