

## 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. каф. (ORCID 0000-0003-1536-2031)*

*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОГО ПРИЛАДУ ЕКІПРУВАННЯ РЯТУВАЛЬНИКІВ

В рамках використання ефекту акустичної емісії розглядається можливість створення для екіпування рятувальників пристроїв орієнтації в просторі. Обґрунтовано впровадження пристрою акустичної дії, розміщеного на спорядженні рятувальника як додаткового елементу спорядження для підвищення ефективності орієнтування у незадовільному для візуального контролю середовищі з метою скорочення часу пошуку постраждалого та часу, що необхідний для евакуації. Обґрунтовано впровадження пристрою акустичної дії для зниження кількості випадків травмування рятувальників під час виконання аварійно-рятувальних робіт у приміщеннях та в умовах з незадовільним візуальним контролем, особливо у воєнний час, що дозволить скоротити час пошуку постраждалого, забезпечити рятувальника від травм та знизити загальний час проведення пошуково-рятувальних робіт та робіт з ліквідації надзвичайних ситуацій. Визначено найбільш впливові на акустичні хвилі характеристики надзвичайної ситуації внаслідок пожежі. Запропоновано використати коригуючі коефіцієнти, що враховують вплив характеристик надзвичайної ситуації на акустичні хвилі: кут падіння, концентрацію зважених частинок, температуру, хвильовий опір середовища при визначенні параметрів перешкоди та відстані до неї з метою підвищення точності вимірів. Запропоновано застосовувати: коефіцієнт відображення, хвильовий імпеданс, температуру середовища. Запропоновано залежність, яка враховує вплив на поширення акустичних хвиль при визначенні форми перешкоди. Запропоновано технічне рішення та схема розміщення сенсорів пристрою акустичної дії на спорядженні рятувальника для визначення форми перешкоди. Обґрунтовано розміщення пристроїв акустичної дії на спорядженні рятувальника на рівні колін для зниження травматизму при пересуванні в умовах незадовільного візуального контролю.

**Ключові слова:** акустичний пристрій, сенсор, хвильовий опір, коефіцієнт відображення, візуальний контроль, надзвичайна ситуація

### 1. Вступ

Для зростання надійності та ефективності систем забезпечення життєдіяльності людини, попередження надзвичайних ситуацій (НС) та пожежної безпеки використовуються прийнятні нові технології будь-якої галузі науки та техніки. Особлива увага приділяється особистому захисту рятувальників, з якими безпосередньо пов'язана загальна ефективність місії порятунку та їх особиста безпека.

Згідно даних Міжнародної пожежної статистики міжнародної асоціації рятувальних служб країн світу [1] протягом 2009–2019 років середня кількість загиблих рятувальників при виконанні службових обов'язків становить 15 осіб, травмованих – 2506 осіб на рік.

Сумна статистика втрат: пожежа, що почалася 09 квітня 2015 р. на нафтобазі Київської області «Побутрембудматеріали», тривала 8 днів і забрала життя 4-х рятувальників; Тегеран, Іран (19 січня 2017 р.) – під завали висотки потрапили десятки рятувальників; обвал в печері Ітамбе, Бразилія (31 жовтня 2021 р.) поховав 9 рятувальників; Одеса (04 грудня 2021 р.) – від отриманих травм під час ліквідації пожежі загинув 1 рятувальник; провінція Хунань, Китай (02 січня 2022 р.) – пожежа в підземному приміщенні забрала ще одне життя рятувальника.

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 опе-

ративно отримувати інформацію про навколишні обставини в приміщеннях з незадовільним візуальним контролем (НВК). Чітких обмежень щодо вільної забудови площі приміщень квартир, будинків не має [2]. В разі настання НС використання традиційних методів орієнтування рятувальників в умовах незадовільного візуального контролю стає малоефективним.

Порушується питання орієнтування рятувальника у незнайомому просторі при проведенні пошуково-рятувальних робіт. Фахівець має бути готовим до безпечного та впевненого пересування в забудовах, будівлях та спорудах нестандартного планування. Структурний підхід для зменшення ризику при проведенні рятувальних робіт будь-якого змісту (пожежа, руйнування, військові події, техногенні катастрофи, завали та ін.) є надзвичайно важливим для збереження життя рятувальників та ефективності виконання робіт, зазвичай пов'язаних з різними, такими, що неконкретизовані екстремальними ситуаціями. Будь-яке розширення переліку індивідуальних засобів захисту та/або пристроїв у спорядженні сприяє більш точному, швидкому та ефективному вирішенню перманентної проблеми збереження людських життів в кожному конкретному випадку. Порятунок постраждалих в замкненому просторі являє собою окремий випадок великого ризику. Такі випадки можуть бути не абияким викликом для найдосвідченіших професіональних пожежних та рятувальників.

Таким чином, недосконалість сучасного екіпірування рятувальників для орієнтування у просторі в складних умовах є актуальною проблемою.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В наукових та інженерних дослідженнях останніх 2-х, 3-х десятиліть широко використовується явище акустичної емісії, стосується це й орієнтації в просторі людини, роботехнічних платформ, систем в цілому.

В роботі [3] проаналізовано існуючі та перспективні методи орієнтування і навігації автономних роботизованих платформ та конструктивних елементів аналогічного автономного пристрою. Запропонований активний спосіб акустичного методу орієнтації у просторі. Активний спосіб передбачає застосування різноманітних акустичних датчиків, розташованих на корпусі пристрою, як у зафіксованому положенні, так і в рухомому стані, який передбачає сканування простору по азимуту. Використовуються результати вимірювань ультразвуковим датчиком відстаней до перешкод, як у нерухомому стані, так і при русі оператора вибраним маршрутом. Наявність перешкоди розраховується блоком управління пристрою за часом вимірювань відстаней від випромінювача (приймача) до перешкоди. Однак, для застосування акустичних пристроїв при проведенні аварійно-рятувальних робіт залишається невирішеним питання впливу факторів НС на фізичні властивості акустичних хвиль. До таких факторів відносяться: температурний градієнт навколишнього середовища і температура перешкод з різних матеріалів, зміна хвильового опору середовища від кількості зважених частинок та ін.).

В роботі [4] з метою порівняння оптимальних коефіцієнтів затінення амплітуди решітки гідролокатора проведено дослід, а також проаналізовано залежність швидкості звуку від середовища, в якому поширюється звукова хвиля, а також вплив температурного градієнту середовища на поширення акустичних хвиль. Розміщено мікрофонні підсилювачі та джерело звуку на одній лінії. Сигнали з акустичних датчиків поступають на секундомір, що з'єднаний через паралельний порт з комп'ютером. Датчики звуку перетворюють механічні коливання мембрани

мікрофона в цифровий сигнал, який підсилюється транзистором VT1. Далі сигнал випрямляється і поступає на вхід операційного підсилювача DA1, що виконує роль компаратора. Світлодіод VD3 служить для візуального контролю сигналу. Підвищення температури викликає збільшення частоти взаємодій між частинками, які несуть коливання, а збільшення цієї активності збільшує швидкість. Для аналізу результатів розглядається залежність швидкості звуку в повітрі, від температури, тиску і вологості. Залежність швидкості від температури практично лінійна: при 0 С швидкість дорівнює 331,5 м/с (тиск становить 101,3 кПа) і зростає з підвищенням температури на градус на 0,59 м/с. Даний експеримент чітко пояснює залежність швидкості поширення акустичних хвиль від зміни температурного градієнту середовища, вологості повітря та атмосферного тиску. Однак, при проведенні даного досліду не розглянуто вплив температури перешкоди з різних матеріалів на поширення акустичних хвиль.

До екіпірування пошуково-рятувальних підрозділів, поряд з оптичними, радіолокаційними, тепловізорними, входять також і акустичні прилади. Однак, такі акустичні прилади (Пеленг-1, Пеленг-1М, АПП1, TRL 310В) призначені для виявлення сигналів постраждалих та їх місця знаходження за характерними акустичними ознаками, виділеними з загального спектра шумів та проблему орієнтації людини в просторі з НВК вони не вирішують.

Переважно для вибору методів орієнтації, навігації та контролю використовуються телевізійні пристрої, оптико-електронні перетворювачі, пристрої НВЧ (надвисокочастотні), лазерні та ультразвукові далекоміри, тактильні сенсори, силомоментні, індуктивні та ємнісні датчики положення у просторі, швидкості, прискорення та взаємодії з навколишнім середовищем. Однак, відомості про особисте екіпірування рятувальників акустичними пристроями орієнтації в просторі при проведенні аналізу в доступних джерелах та повідомленнях не встановлені.

Для покращення характеристик моніторингу пересування в 3-х вимірному просторі розглядається метод адаптації акустичного датчика й уявляється, що об'єкт, який рухається, передає сигнали, спотворені «гаусовським» шумом [4]. Зростаючий інтерес отримав розвиток використання віртуального луноакустичного простору для орієнтації сліпих [5]. Для людей з обмеженими можливостями по зору або цілком сліпих розроблено прилад орієнтації в довколишньому просторі, надаючи скановану перед ним глибину простору [6]. Але залишилися не вирішеними питання зон розміщення акустичних пристроїв та їх кількість на тілі (спорядженні) оператора.

Ефективне орієнтування у приміщеннях з НВК залежить від технічного оснащення рятувальника. Як правило, для виявлення перешкод у приміщенні під час виконання АРР використовують пожежні та пошукові ліхтарі [7] й тепловізори [8], наприклад, тепловізор для пожежних DaliF2-G 384X288.

Принцип дії пошукового ліхтаря засновано на явищі проникнення світла через середовище, але у задимленому приміщенні, де висока густина (багато зважених часток), його використання не є ефективним через високий коефіцієнт поглинання середовища. При використанні світла з довжиною хвилі 565–590 нм (жовте) пошукового ліхтаря має незначне підвищення проникаючої здатності. Однак, такі ліхтарі потребують багато енергії з акумуляторів, що призводить до обмеження часу автономної роботи, та збільшенню масо-габаритних показників на відміну від акустичного приладу, який не потребує високої питомої енергії живлення, та має незначні габарити.

Інфрачервоний прилад [9], який застосовується при проведенні пошукових робіт, також потребує значної питомої енергії та має значні габарити та вагу. Слід відзначити, що при несталому температурному градієнті показання цього приладу можуть бути некоректними. Крім того, у своєму складі, цей прилад має чутливі елементи, що знижує його ударостійкість. Також цей прилад потребує складного програмного забезпечення. На відміну у акустичного приладу більше стійкості до пошкодження при виконанні рятувальних робіт та програмне забезпечення засноване на фіксованих емпіричних залежностях, що спрощує його коригування та налаштування.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність наукового, математичного та методичного обґрунтування застосування акустичних приладів, як додаткових, у особистому спорядженні рятувальника для підвищення рівня орієнтування у замкненому 3-вимірному просторі у середовищі з щільним задимленням, заповненням та високою температурою.

### **3. Мета роботи та завдання дослідження**

Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування у особистому спорядженні та пропозиції з розробки акустичного приладу для підвищення рівня орієнтування рятувальника в замкненому 3-вимірному просторі з щільно задимленим, заповненим та з високою температурою середовищем.

Для досягнення мети роботи сформульовано наступні завдання:

– визначити коригуючі параметри та розрахувати поправочні коефіцієнти для врахування кута падіння, об'єму зважених частинок, температури, хвильового опору середовища, що забезпечить ефективне функціонування акустичного приладу в умовах середовища зі щільним задимленням, заповненням та високою температурою;

– експериментально встановити залежність акустичних хвиль від зміни температури перешкоди з різних матеріалів;

– обґрунтувати розміщення акустичних пристроїв та їх кількість на особистому спорядженні рятувальника.

### **4. Матеріали та методи дослідження**

Об'єкт дослідження – вплив чинників надзвичайної ситуації на поширення акустичних хвиль.

Предмет дослідження – акустичні хвилі в умовах надзвичайних ситуацій.

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент, статистична обробка експериментальних даних.

Гіпотеза дослідження – з урахуванням сучасного стану технологій, виробництва компонентної бази, матеріалів, елементів точної механіки, оптики, засобів комунікації, завадостійкого кодування, програмного забезпечення, можливо суттєво покращити тактико-технічні характеристики майбутньої системи позиціонування та навігації рятувальника у НВК при цілком прийнятних апаратних, програмних та фінансових витратах.

Для подолання перерахованих недоліків, притаманних традиційним засобам екіпірування рятувальників, що обмежують їх можливості орієнтування під час проведення АРР в замкненому 3-вимірному просторі з підвищеною температурою, щільним задимленням та заповненням середовища, з великою кількістю перешкод у вигляді уламків будівлі та зруйнованих конструкцій, пропонується обладнати сис-

тему особистого спорядження рятувальника додатковим пристроєм з особливими властивостями, принцип дії якого засновано на явищі лунолокації (відбиті акустичні хвилі). Графічну інтерпретацію роботи пристрою акустичної дії наведено на рис. 1.

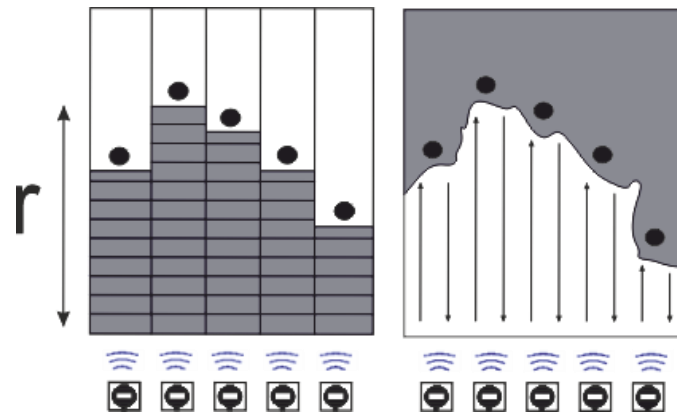


Рис. 1. Схема роботи пристрою акустичної дії (● – перешкода,  $r$  – відстань від датчика до перешкоди, □ – акустичний датчик, ≡ – акустичні хвилі; ↑ ↓ – напрямок руху хвилі, ■ – область з НВК)

Небезпечні фактори НС (задимлення, заповишеність, висока температура) в свою чергу впливають на фізичні властивості акустичних хвиль. У зв'язку з цим, при розробці акустичного приладу, призначеного для ефективного використання в означених умовах, тобто для підвищення чутливості та точності його роботи, необхідно визначити поправочні коефіцієнти, що враховують кут падіння, об'єм зважених частинок, температуру, хвильовий опір середовища.

В залежності від геометричних особливостей простору, наявності перешкод і їх акустичних властивостей необхідно буде обґрунтувати розміщення акустичних пристроїв та їх кількість на особистому спорядженні рятувальника.

Результат експерименту важливий для визначення коригуючого поправочного значення показань відстані акустичного пристрою. Розрахунково-теоретичне дослідження являється вагомим аргументом для практичного створення акустичного приладу, який відрізняється від відомих додатковими характеристиками, а саме, здатністю ефективно функціонувати в умовах високої температури, щільного задимлення та заповишення повітря.

Випробування з визначення впливу температурного градієнту середовища на поширення акустичних хвиль у просторі проводилось при порівняльних випробуваннях з допомогою експериментальної установки.

Матеріал, що має не однакову структуру в своїй будові по різному взаємодіятиме з акустичними хвилями, особливо при різноманітному температурному градієнту. У зв'язку з цим, проведено експеримент з допомогою установки, що складалась з таких компонентів: нагрівальний елемент Pro'sKit 9SS-202-SI, скляна колба, блок живлення (БЖ), акустичний датчик HC-SR304, блок управління (БУ) Vega 2560 Controller Board 1PC, мультиметр UT 133 Series, термопара типу К (ТХА – відповідно до [10]), індикатор LCD 1602 та матеріал, що виступав зразком перешкоди (табл. 1).

На одному кінці скляної колби закріплювався акустичний датчик (випромінювач звукових коливань та приймач). На відстані 1 м з протилежної сторони колби розміщувався матеріал, що виступав умовною перешкодою. Скляна колба заповнювалась повітрям, всередині якої на відстані 50 см від датчика встановлюва-

вся нагрівальний елемент. Акустичний датчик генерував акустичні хвилі, які поширювалися уздовж скляної колби та відбивалися від перешкоди потрапляючи до приймача датчика. Показання акустичного пристрою виводилися на індикатор покажчик.

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 5–7 хвилин.

Програмний код для роботи акустичного датчика розроблено в програмі «Arduino.cc». Для точності випробувань задано кількість випромінювання акустичних імпульсів акустичним датчиком. Протягом 1 мкс датчик випромінював 8 коротких імпульсів. Виводи акустичного датчика «Echo» та «Trig» визначено як константи, швидкість роботи моніторингу датчика – «9600».

За допомогою нагрівального елемента підключеного до блоку живлення в середині колби поступово збільшувалась температура повітря температура від +20 °C до +100 °C. Для вимірювання температури всередині установки використовувалась термопара, показання якої реєструвалися мультиметром.

## 5. Визначення коригуючих параметрів та коефіцієнтів акустичного приладу

Для визначення коригуючих коефіцієнтів необхідно враховувати поширення та згасання акустичних хвиль у середовищі з виваженими твердими частинками ПГ або краплинами рідини розглянуті у роботі [11].

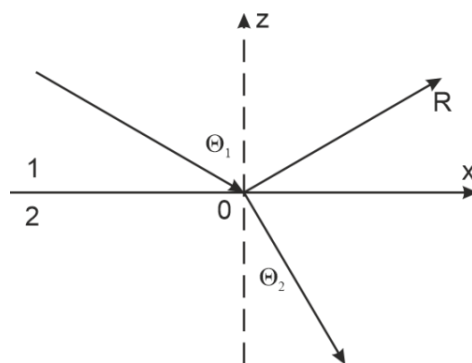


Рис. 2. Схема відображення акустичних хвиль у двофазному середовищі

Нехай акустична хвиля падає із середовища 1 на межу розділу із середовищем 2. Кут, під яким падає хвиля, відряховуватимемо від нормалі (вісь  $z$ ) межі розділу двох середовищ і позначимо його через  $\theta_1$  (рис. 2). Коефіцієнт відображення у цьому випадку можна уявити у вигляді:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (1)$$

де

$$Z_i = \frac{\rho_i c_i}{\cos \theta_i}, \quad (2)$$

$$i = 1, 2;$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{C_2}{C_1} \sin \theta_1\right), \quad (3)$$

де  $Z_i$  – хвильовий опір середовища,  $R$  – коефіцієнт відображення,  $\rho_i$  – щільність,  $C_i$  – швидкість звуку,  $i=1, 2$  – індекс  $i$  означає номер середовища.

У газі з твердими частинками (зола, чадний газ) зі збільшенням їхньої об'ємної частки відбувається монотонне збільшення коефіцієнта згасання. У парогазокапельній суміші (наприклад, у тумані) коефіцієнт загасання може зменшуватися зі зростанням об'ємної частки крапель, тому густіший туман (з великою об'ємною часткою крапель) може виявитися акустично більшим «прозорим».

З формули (1) видно, що визначення коефіцієнту відображення необхідно знати щільність і швидкість звуку в середовищах 1 і 2. Як середовище 2 розглянемо неоднорідне середовище, для якої характерна дисперсія швидкості звуку.

Аналіз показує, що вплив фазових переходів на швидкість в газових суспензіях більшою мірою відбувається за низьких частот [12]. Таким чином, для дослідження впливу фазових переходів на величину коефіцієнта відображення будемо використовувати рівноважну швидкість звуку в парогазокапельній суміші. Рівняння для рівноважної швидкості звуку з двома фракціями включень має вигляд:

$$C_2 = C_1 \left( \frac{y_e}{m_1 y_1} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де

$$y_e = \frac{m_2 R_v (1 - k_v R_v) + L}{(m_2 - 1) R_v + L - L_1 R_v / y_1}, \quad (5)$$

$$R_v = \frac{R_v}{R_1} L = y_1 (y_1 - 1) k_v I_0^{*2}, \quad (6)$$

$$R_1 = k_v R_v + (1 - k_v) R_G, \quad (7)$$

$$y_1 = k_v y_v + (1 - k_v) y_G, \quad (8)$$

$$m_2 = 1 + \frac{m_a c_p 2_b}{c_{p1}} + \frac{m_b c_p 2_b}{c_{p1}}, \quad (9)$$

$$L_1 = k_v (y_v - 1) (2I_0 y_1 - R_v) - 1. \quad (10)$$

Тут індекс  $V$  відноситься до парової компоненти несучої фази,  $G$  – до газової компоненти,  $a$  – до першої фракції,  $b$  – до другої фракції,  $y_i$  – показник адиабати,  $k$  – масова концентрація пари чи газу,  $m$  – масовий вміст,  $R$  – постійна пара чи газу,  $c_p$  – теплоємність,  $L$  – рівень звукового тиску,  $I_0$  – питома теплота пароутворення,  $c_1$  – швидкість звуку у несучій фазі (газ).

На рис. 3 наведено результати порівняння коефіцієнта відображення в залежності від об'ємного вмісту часток (крапель) першої фракції, або виважених частинок при різних кутах падіння  $\theta_1$ . Тут початкова концентрація пари  $k_{v0} = 0,01$ , об'ємний вміст частинок другої фракції  $\alpha_b = 0,005$ .

При нормальному падінні ( $\theta_1=0^\circ$ ) акустичної хвилі крива є монотонною, а при збільшенні кута падіння хвилі до  $60^\circ$  і до  $75^\circ$  монотонність пропадає. Так, при падінні хвилі під кутом  $\theta_1=60^\circ$  величина практично не змінюється при об'ємних вмістах крапель  $\alpha_{2a}<10^{-3}$  і набуває деякого постійного значення. Тобто, за об'ємного вмісту крапель першої фракції, або виважених частинок від  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$  коефіцієнт відображення практично не змінюється. Тільки після збільшення об'ємного вмісту до  $10^{-2}$  простежується зміна коефіцієнту відображення акустичних хвиль.

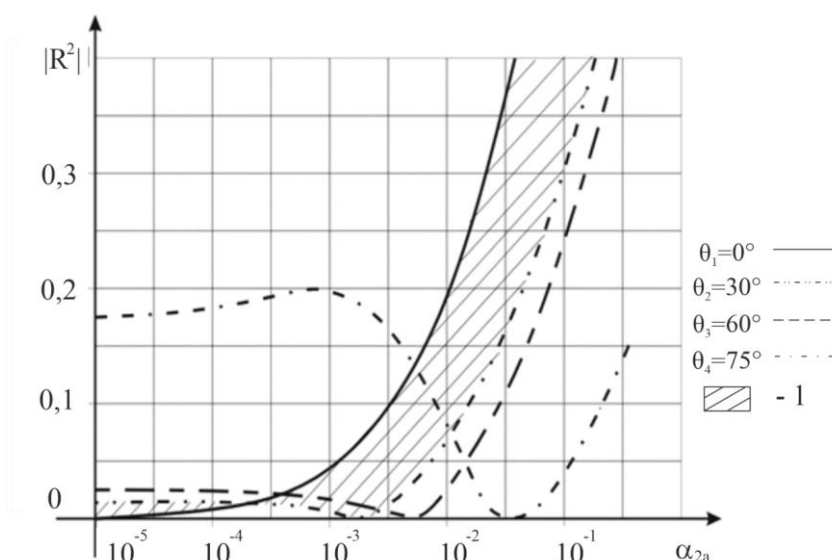


Рис. 3. Криві залежності коефіцієнта відображення акустичних хвиль від об'ємного вмісту включень при різних кутах падіння

Таким чином, з формул (1), (2) та (3) отримуємо:

$$k = \frac{\rho_2 C_2 / \cos \theta_2 - \rho_1 C_1 / \cos \theta_1}{\rho_2 C_2 / \cos \theta_2 + \rho_1 C_1 / \cos \theta_1}, \quad (11)$$

$$\theta_2 = \arcsin \left( \frac{C_2 \sin \theta_1}{C_1} \right). \quad (12)$$

На рис. 4 представлений графік залежностей коефіцієнта відображення від кута падіння хвилі  $\theta_1$  при різних об'ємних вмістах крапель першої фракції.

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  $0^\circ$ - $30^\circ$ . Тому параметри, що враховують вплив на акустичні хвилі в умовах НС внаслідок пожежі (коригуючі коефіцієнти) знаходяться у заштрихованій області 1 (рис. 3–4). Ці параметри будуть задані у вигляді поліному, для подальшого використання у програмних засобах блоку управління додатковим пристроєм акустичної дії.

## 6. Визначення впливу температури перешкоди на фізичні властивості акустичних хвиль

У зв'язку з тим, що у просторі безперервно змінюються швидкість, сила, напрям потоку (вплив температурного градієнту), а також температура, тому поши-



рення звукових хвиль відбувається постійно в нових умовах, згасання звуку зростає внаслідок відбиття, розсіювання та подовження шляху, що проходить звуком (при температурі  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  звук проходить  $318\text{ м/с}$ , а за температури  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $-344\text{ м/с}$ ). Слід брати до уваги, що для ідеального (у відношенні термодинаміки) газу справедливе рівняння Клапейрона.

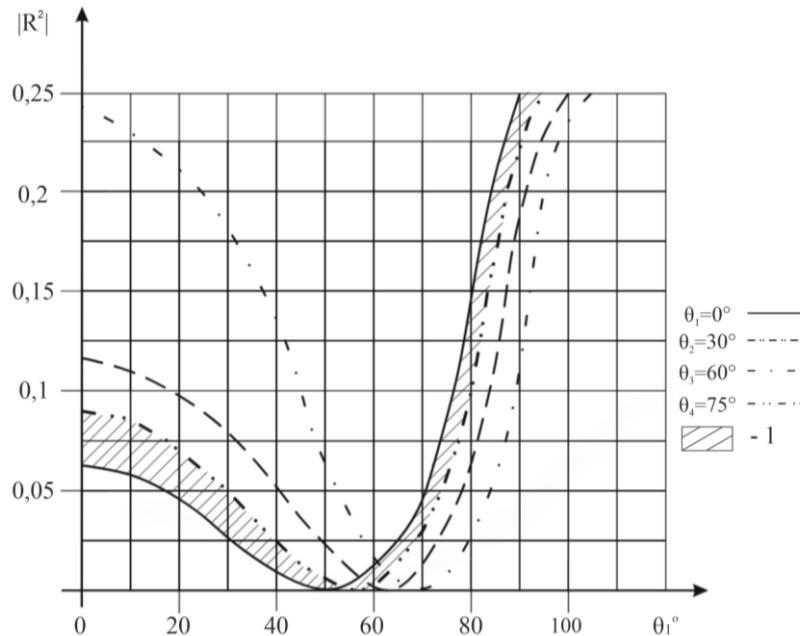


Рис. 4. Криві залежності коефіцієнта відображення акустичних хвиль від кута падіння при об'ємному вмісті включень

Згідно [13] та Закону Бойля-Маріотта [14] вираз для швидкості акустичних хвиль у повітрі виглядає наступним чином:

$$c = \sqrt{\frac{\chi R}{\mu} T}, \quad (13)$$

де  $\chi = c_p / c_v$  – відношення теплоємностей при постійному тиску та постійному об'ємі,  $\mu$  – молекулярна вага газу;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{K}$ . Тому що матеріали з різною структурою в своїй будові по різному взаємодіють з акустичними хвилями, особливо при різноманітному температурному градієнті. То відповідно [14], з метою визначення середнього значення коригуючого параметру встановлення відстані акустичним датчиком проведено експеримент.

Під дією газового нагрівача поступово збільшувалась температура матеріалу від  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для вимірювання температури використовувалась термопара типу К (діапазон температури  $0-700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), показання якої реєструвалися стандартизованим пристроєм.

Результати експерименту наведені в табл. 1.

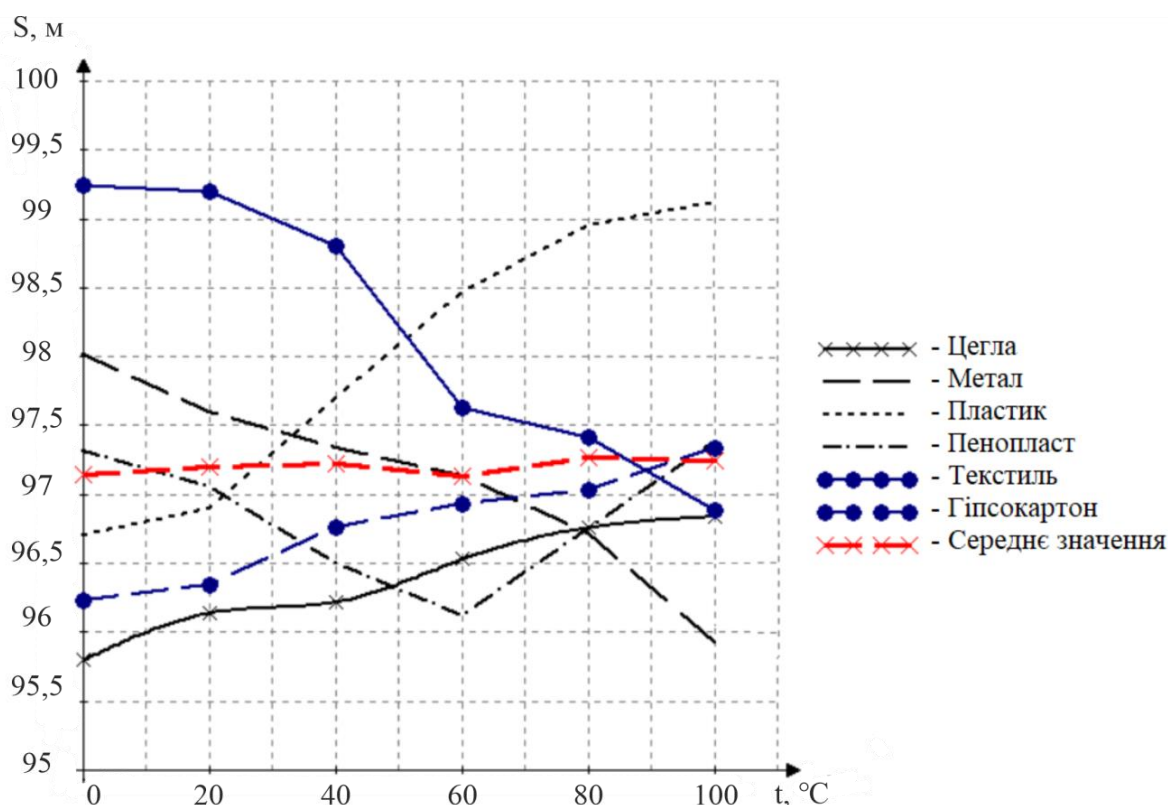
Згідно отриманих даних, побудована графічна залежність (рис. 5), на якій можна побачити зміну значень відстані від акустичного датчика до перешкоди при різній температурі досліджуваного матеріалу.

За результатами розрахунків визначено середнє значення коригуючого параметру відстані акустичного пристрою ( $r\Delta_{\text{ср.}} = 2,84\text{ см}$ ) на відстані  $1,0\text{ м}$ . Даний

параметр буде внесено в розрахунковий поліном блоку управління пристроєм. Похибка вимірювання температури за швидкістю звуку (через відмінність повітря від ідеального газу) при користуванні формулою 1 має порядок 0,1 для нормального тиску та зменшується з його зниженням.

**Табл. 1. Залежності температури перешкоди з різних матеріалів на показання акустичного пристрою**

№	Матеріал	Показник відстані від пристрою до перешкоди за різної температури, см					Середній показник похибки показань пристроїв		Середнє значення коригуючого параметру відстані, см
		20 °С	40 °С	60 °С	80 °С	100 °С	Δ, см	Б, %	
1.	Цегла	96,14	96,22	96,53	96,76	96,84	0,478	0,55	3,7
2.	Метал	97,60	97,34	97,13	96,72	95,93	0,611	0,612	3,05
3.	Пластик	96,91	97,7	98,46	98,95	99,13	0,60	0,61	1,99
4.	Пінопласт	97,05	96,52	96,11	96,75	98,15	0,72	0,745	3,45
5.	Текстиль	99,20	98,83	97,6	97,12	96,78	1,13	1,15	1,47
6.	Картон	96,34	96,76	96,93	97,07	97,34	0,29	0,27	3,37



**Рис. 5. Графік залежності температури перешкоди з різних матеріалів на показання акустичного пристрою**

Поняття хвильового опору (імпедансу) в акустиці, відповідно [15], використовують для характеристики середовища, в якому поширюються хвильові збурення та для опису властивостей випромінювачів звуку. Величина хвильового опору визначається відношенням амплітуди тиску до амплітуди швидкості руху частинок середовища в напрямку, перпендикулярному фронту хвилі. Із виразів для вказаних характеристик плоскої хвилі одержуємо:

$$|Z| = \rho c, \quad (14)$$

де відповідно:  $\rho$  – густина середовища та  $c$  – швидкість звуку в ньому.

Оскільки швидкість є величина векторна, її проекція на вибрані осі координат може бути додатною або від'ємною, в залежності від напрямку поширення хвилі, то для хвильового опору часто використовують вираз  $Z = \pm \rho c$ . Про те, що саме такий добуток густини на швидкість звуку є важливою характеристикою акустичного середовища, свідчить той факт, що при нормальному падінні плоскої хвилі на границю контакту різних середовищ з однаковим хвильовим опором відбита хвиля не виникає. Плоска хвиля не "розрізняє" середовища, які мають однакові хвильові опори [16], [17].

Тоді, відстань до перешкоди визначається наступною формулою:

$$r = \frac{\sqrt{\frac{\chi R}{\mu}} T_{kt}}{2} = \frac{|Z|}{2\rho} kt. \quad (15)$$

Таким чином, для визначення відстані до перешкоди та її форми необхідно застосовувати коефіцієнт відображення  $k$ , хвильовий імпеданс  $Z$ , температуру середовища  $T$ ,  $K$ .

## 7. Обґрунтування кількості та розміщення акустичних пристроїв на спорядженні рятувальника

Рятувальник під час виконання робіт з ліквідації наслідків НС працює в екстремальних умовах, здебільшого виконуючи поставлені задачі в захисному одязі, в засобах індивідуального захисту органів дихання зі спеціальним рятувальним оснащенням. З додаванням системи акустичної дії, для орієнтування у приміщеннях з НВК, до оснащення рятувальника його загальна вага й габарити практично не зміняться. Це дозволить не втрачати показник мобільності. Також, через малу вартість, є можливість розмістити достатньо велику кількість датчиків акустичної дії (сонари) на захисному одязі рятувальника (рис. 6). Місця розміщення акустичних датчиків будуть отримані за результатами натурних експериментів.



Рис. 6. Схема розміщення акустичних датчиків на захисному шоломі рятувальника (⊗ – акустичний датчик)

Основною функцією даного пристрою є визначення відстані до перешкоди, а при використанні декількох акустичних сенсорів на захисному одязі рятувальника можливо встановити розміри перешкоди, що трапляється на шляху слідування рятувальника.

Таким чином, розміщення пристроїв акустичної дії на захисному одязі, умовно, на рівні колін знизить ризик травмування рятувальника під час виконання АРР, бо більшість завалів, уламків, перешкод розміщені саме на висоті 30–50 см (рис. 5). Достатньо застосувати датчик, що розрахований на порогове значення відстані до перешкоди. При наближенні датчика до перешкоди спрацьовує звуковий сигнал або на цифровому індикаторі з'являється попередження.

Запропонований пристрій акустичної дії як додатковий елемент спорядження рятувальника дозволить:

- підвищити рівень орієнтування рятувальників в приміщеннях з незадовільним візуальним контролем;
- визначити відстань до перешкоди та її форму;
- зменшити час пошуку постраждалого;
- знизити рівень травматизму рятувальника при виконанні оперативно-рятувальних робіт.

## 8. Обговорення результатів визначення параметрів акустичного приладу екіпірування рятувальників

Доведено, що урахування впливу факторів надзвичайної ситуації (задимлення, загороженість, висока температура та інші.) 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.

Відзначимо, що для визначення поправочного коефіцієнта, що враховує вплив температурного градієнту пропонується коефіцієнт відношення швидкості до температури середовища у секторі випромінювання акустичних хвиль. Похибка має порядок 0,1 для нормального тиску та зменшується з його зниженням. Доведено, що врахування впливів на акустичний промінь буде більш точніше визначати відстань до перешкоди, або її відсутність, а також форму перешкоди на шляху пересування рятувальника.

Для врахування найбільш впливових факторів надзвичайної ситуації на акустичні хвилі при визначенні відстані до перешкоди та її форми запропоновано застосовувати: коефіцієнт відображення, хвильовий імпеданс, температуру середовища. Основним параметром запропонованого пристрою є визначення відстані до перешкоди, а при використанні декількох акустичних сенсорів на захисному одязі рятувальника можливо встановити розміри перешкоди, що трапляється на шляху слідування рятувальника.

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. Результатами виконаних досліджень є визначення коригуючих параметрів середовища, в якому функціонує прилад та алгоритм розрахунків поправочних коефіцієнтів для програми керування приладу.

У якості коригуючих параметрів розглянуті: хвильовий опір акустичній хвилі, який залежить від щільності задимлення та загороженості середовища; температурний градієнт, який впливає на характеристики акустичної хвилі. За результатами досліджень впливу параметрів середовища на характеристики акустичних хвиль отримано залежність, яка дозволяє визначити відстань до перешкоди та її форму.

З метою зменшення травмування рятувальника під час виконання аварійно-рятувальних робіт, обґрунтовано доцільність та можливість розташування пристрою, що налаштовано на порогове значення відстані до перешкоди. Визначено мінімальну кількість сенсорів приладу, яка має бути більше 4. Запропоновано технічне рішення з розміщення сенсорів приладу акустичної дії на особистому спорядженні рятувальника.

Застосування такого пристрою перспективне, але потребує додаткових досліджень по коефіцієнтам, що коригують (залежність від температури, хвильового опору середовища, кута падіння акустичного променя та ін.), які можуть бути враховані у реальному часі у блоку управління пристроєм.

Розміщення декількох акустичних датчиків на захисному шоломі рятувальника дозволить отримувати не тільки інформацію про відстань до перешкоди, а й визначати форму перешкоди, шляхи обходу.

Також, слід відмітити, що при застосуванні такого типу додаткового обладнання можуть виникати апаратні та програмні відмови, пов'язані з недостатньою точністю акустичних сенсорів і надійністю приладу в цілому. Усунення таких відмов можливе при застосуванні більш надійних елементів та внесення до програмного забезпечення корегуючих алгоритмів.

## 9. Висновки

1. Визначено коригуючі параметри та розраховані поправочні коефіцієнти для розробки сенсорів акустичної дії: кут падіння, хвильовий опір середовища, концентрація зважених частинок. Визначено діапазон зміни кута падіння акустичної хвилі приладу, як  $0^{\circ}$ – $30^{\circ}$ . Визначено мінімальну кількість сенсорів приладу, яка має бути більше 4. Запропоновано технічне рішення з розміщення сенсорів приладу акустичної дії на особистому спорядженні рятувальника.

2. Визначено залежності від температурного градієнту перешкоди з різних матеріалів, коригуюче поправочне значення показань відстані акустичного пристрою, яке дорівнює +2,8 см. 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 заповнення повітря. За результатами огляду публікацій проаналізовано рівень розробок зі створення акустичних приладів, що використовуються в різних галузях. З'ясовано, що акустичні прилади в особистому спорядженні рятувальників для підвищення рівня їх орієнтації в середовищі з незадовільним візуальним контролем не використовуються і не створені.

3. Обґрунтовано доцільність та можливість застосування пристрою акустичної дії, розміщеного на особистому спорядженні рятувальника, як додаткового ефективного засобу для покращення його орієнтації при пересуванні в замкненому 3-вимірному просторі зі складними пошкодженнями (обвалами, зруйнованими конструкціями та іншими перешкодами), з незадовільним візуальним контролем через високу температуру, щільне задимлення та заповненість середовища, особливо у воєнний час. Це дозволить скоротити час пошуку постраждалого, убезпечити рятувальника від травм та ризику загибелі, знизити загальний час проведення рятувально-пошукових робіт та робіт з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

## Література

1. Brushlinsky N., Sokolov S. International Fire Statistics of the International Association of Rescue Services. International Technical Committee for the Prevention and Extinction of Fire. 2021. Vol. 66. P. 34. URL: <https://www.ctif.org>
2. ДБН В.2.2-15: 2019. Житлові будинки. Основні положення. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0087858-19#Text>
3. Карташов В. М., Цехмистро Р. И., Колендовская М. Р. Методы ориентации, навигации и контроля мобильных робототехнических платформ. Радиотехника. 2019. С. 38–44. doi: <https://doi.org/10.30837/rt.2019.4.199.04>
4. Cray B., Kirsteins I. A Comparison of Optimal Sonar Array Amplitude Shading Coefficients. Naval Undersea Warfare Center. Acoustics. 2019. Vol. 1. P. 808–815. doi: <https://doi.org/10.3390/acoustics1040047>
5. Wallmeier L., Wiegrebe L. Self-motion facilitates echo-acoustic orientation in humans. Royal Society Open Science. 2014. Vol. 1. Iss. 3. doi: <https://doi.org/10.1098/rsos.140185>
6. Mariusz K., Bobulski J. Device for Acoustic Support of Orientation in the Surroundings for Blind People. Physical Sensors. 2018. P. 12. doi: <https://doi.org/10.3390/s18124309>
7. Rosenbauer International AG. Fire & Safety Equipment. Rosenbauer equipment catalog. LED lighting system. 2019. P. 111–115. URL: <https://www.rosenbauer.com>
8. Meola C. Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends. Department of Aerospace Engineering University of Naples Federico II. 2012. P. 173–224. doi: <https://doi.org/10.2174/97816080514341120101>
9. Bañuls A., Mandow A., Vázquez-Martín A., Morales J., Alfonso J. Object Detection from Thermal Infrared and Visible Light Cameras in Search and Rescue Scenes. IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). 2020. P. 380–386. doi: <https://doi.org/10.1109/1742-6596/1058/1/012054>
10. ДСТУ 3622-97 Перетворювачі термоелектричні. Основні вимоги щодо вибору та використання. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=82382](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82382)
11. Gubaidullin D. A., Fedorov Yu. V., Zaripov R. R. Reflection of acoustic waves from the boundary of contaminated fog. Journal of Physics. 2018. Conf. Ser. 1058. doi: <https://doi.org/10.1088/SSRR50563.2020.9292593>
12. 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: <https://doi.org/10.3390/sym13071299>
13. Knight R. D. Physics for Scientists and Engineers. Third Edition. 2013. P. 572–574. ISBN 10: 0321765656
14. Allan D. Pierce. Acoustics. An Introduction to Its Physical Principles and Applications. Springer Nature Switzerland. 2019. P. 158-255. ISBN: 978-3-030-11214-1
15. Wang J., Pfeiffer L. N., West K. W. Surface acoustic wave detection of robust zero-resistance states under microwaves. Physical Review J. 2020. Vol. 101. Iss. 16. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevJ.101.165413>
16. Shagapov V. Sh., Sarapulova V. V. Reflection and refraction of acoustic waves at the interface between a gas and a disperse systems. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. Vol. 56. P. 838–847. doi: <https://doi.org/10.1134/civil.security>. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-21

S0021894415050107

17. Sun D., Zhang X., Fang L. Coupling effect of gas jet and acoustic wave on inhalable particle agglomeration. *Journal of Aerosol Science*. Vol. 66. P. 12–23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.08.008>

*O. Levterow, DSc, Senior Researcher, Associate Professor of the Department*

*Y. Statyvka, Lecturer of the Department*

*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

## DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE ACOUSTIC DEVICE FOR RESCUER EQUIPMENT

As part of the use of the effect of acoustic emission, the article considers the possibility of creating spatial orientation devices for equipping rescuers. The introduction of an acoustic device placed on the rescuer's equipment as an additional element of equipment to increase the efficiency of orientation in an environment unsatisfactory for visual control in order to reduce the time of searching for the victim and the time required for evacuation is substantiated. The introduction of an acoustic device to reduce the number of cases of injury to rescuers during emergency rescue operations indoors and in conditions with unsatisfactory visual control, especially in wartime, is substantiated, which will reduce the time of searching for a victim, protect the rescuer from injuries, and reduce the total time spent searching. -rescue works and works to eliminate emergency situations. The most influential characteristics of the emergency situation due to fire on acoustic waves have been determined. It is proposed to use correction coefficients that take into account the influence of the characteristics of the emergency situation on acoustic waves: angle of incidence, concentration of suspended particles, temperature, wave resistance of the medium when determining the parameters of the obstacle and the distance to it in order to increase the accuracy of the measurements. It is proposed to use: reflection coefficient, wave impedance, temperature of the medium. A dependence is proposed that takes into account the effect on the propagation of acoustic waves when determining the shape of the obstacle. A technical solution and a scheme for placing sensors of the acoustic action device on the rescuer's equipment to determine the shape of the obstacle are proposed. Placing acoustic devices on the rescuer's equipment at knee level to reduce injuries when moving in conditions of unsatisfactory visual control is substantiated.

**Keywords:** acoustic device, sensor, impedance, reflection coefficient, wrecking, unsatisfactory visual control

### References

1. Brushlinsky, N., Sokolov, S. (2021). International Fire Statistics of the International Association of Rescue Services. International Technical Committee for the Prevention and Extinction of Fire, 66, 34. URL: <https://www.ctif.org>
2. DBN V.2.2-15: 2019. Zhytlovbudynky. Osnovnipolozhennia. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0087858-19#Text>
3. Kartashov, V., Tsekhmystro, R., Kolendovskaia, M. R. (2019). Metody oryentatsyy, navyhatsyy y kontrolia mobylnykh robototekhnicheskyykh platform. *Radyotekhnika*, 199, 38–44. doi: <https://doi.org/10.30837/rt.2019.4.199.04>
4. Cray, B., Kirsteins, I. (2019). Comparison of Optimal Sonar Array Amplitude Shading Coefficients. *Naval Undersea Warfare Center. Acoustics*, 1, 808–815. doi: <https://doi.org/10.3390/acoustics1040047>
5. Wallmeier, L., Wiegrebe, L. (2014). Self-motion facilitates echo-acoustic orientation in humans. *Royal Society Open Science*, 1, 3. doi: <https://doi.org/10.1098/rsos.140185>
6. Mariusz, K., Bobulski, J. (2018). Device for Acoustic Support of Orientation in the Surroundings for Blind People. *Physical Sensors*, 18(12), 4309. 2. doi: <https://doi.org/10.3390/s18124309>

7. Rosenbauer International AG. (2019). Fire & Safety Equipment. Rosenbauer equipment catalog LED lighting system, 111–115. URL: [https:// www.rosenbauer.com](https://www.rosenbauer.com)
8. Meola, C. (2012). Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends. Department of Aerospace Engineering University of Naples Federico II, 173–224. doi: <https://doi.org/10.2174/97816080514341120101>
9. Bañuls Mandow, A., Vázquez-Martín, A., Morales, J., Garcia, J. (2020). Object Detection from Thermal Infrared and Visible Light Cameras in Search and Rescue Scenes. IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 380–386. doi: <https://doi.org/10.1109/1742-6596/1058/1/012054>
10. Peretvoriuvachi termoelektrychni. Osnovni vymohy shchodo vyboru ta vykorystannia. (2019). DSTU 3622-97. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=82382](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82382)
11. Gubaidullin, D., Fedorov, Yu., Zaripov, R. (2018). Reflection of acoustic waves from the boundary of contaminated fog. Journal of Physics, 1058. doi: <https://doi.org/10.1088/SSRR50563.2020.9292593>
12. 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: <https://doi.org/10.3390/sym13071299>
13. Knight, R. (2013). Physics for Scientists and Engineers, Third Edition. USA, New York, 16, 270. ISBN 10: 0321765656
14. Allan, D. (2019). Acoustics. An Introduction to Its Physical Principles and Applications. Springer Nature Switzerland, 158-255. ISBN: 978-3-030-11214-1
15. Wang Pfeiffer, L. N., West, K. W. (2020). Surface acoustic wave detection of robust zero-resistance states under microwaves. J. Physical Review, 101, 16. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.165413>
16. Shagapov, V., Sarapulova, V. (2015). Reflection and refraction of acoustic waves at the interface between a gas and a disperse systems. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 56(5), 838–847. doi: <https://doi.org/10.1134/S0021894415050107>
17. Sun, D., Zhang, X., Fang, L. Coupling effect of gas jet and acoustic wave on inhalable particle agglomeration. Journal of Aerosol Science, 66, 12–23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.08.008>

Надійшла до редколегії: 20.10.2022

Прийнята до друку: 16.11.2022