

УДК 351.861:504.064:614.8

*О. А. Левтеров, д.т.н., професор, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-5926-7146)**Є. С. Стативка, ад'юнкт (ORCID 0000-0003-1536-2031)**Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ОРІЄНТУВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ З НЕЗАДОВІЛЬНИМ ВІЗУАЛЬНИМ КОНТРОЛЕМ

Обґрунтовано, що в умовах незадовільного візуального контролю, спричиненого пожежами, задимленням, руйнуванням конструкцій та іншими проявами надзвичайної ситуації пожежного або техногенного характеру, акустичний канал доцільно використовувати як додаткове джерело навігаційної інформації під час виконання аварійно-рятувальних робіт. Визначено вплив факторів надзвичайної ситуації на параметри поширення і відбиття акустичного сигналу. Встановлено особливості розповсюдження акустичних хвиль з урахуванням температурного градієнта, концентрації зважених частинок, акустичного імпедансу середовища і перешкоди, а також кута падіння акустичної хвилі на поверхню об'єкта. Показано, що зазначені фактори змінюють кінематичні та енергетичні характеристики сигналу, що безпосередньо впливає на точність визначення відстані до перешкоди та відновлення конфігурації середовища. Розроблено математичну модель акустичного методу орієнтування, яка враховує сукупний вплив факторів надзвичайної ситуації на фізичні властивості акустичних хвиль і поєднує часові та амплітудні характеристики відбитого сигналу в межах єдиної оптимізаційної процедури. Запропоновано алгоритм визначення конфігурації середовища, що реалізує секторне зонування простору, багатоканальне опитування сенсорів, корекцію параметрів середовища, формування скоригованих відстаней та міжсекторне узгодження результатів. Наукова новизна полягає у формалізації сукупного впливу факторів надзвичайної ситуації на параметри акустичного сигналу в межах єдиної математичної моделі орієнтування. Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні теоретичної основи для побудови носимої системи акустичного орієнтування рятувальника в умовах незадовільного візуального контролю.

Ключові слова: акустичний метод орієнтування, незадовільний візуальний контроль, математична модель, акустичні хвилі

1. Вступ

Виконання аварійно-рятувальних робіт під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій значною мірою пов'язане з діями у складному внутрішньому середовищі будівель і споруд, де дим, пил, аерозольні продукти горіння, відсутність освітлення та складна планувальна структура істотно ускладнюють орієнтування оператора. Актуальність цієї проблеми підтверджується статистичними даними ДСНС: упродовж 2025 року в державі зареєстровано 99 298 пожеж, що свідчить про значний масштаб подій, у межах яких підрозділи цивільного захисту вимушені діяти в небезпечному та інформаційно обмеженому середовищі. Водночас нормативно встановлено, що під час пожеж у будівлях і спорудах характерними ускладнювальними чинниками є складне планування приміщень, швидке розповсюдження вогню і продуктів горіння, а також підвищення температури до небезпечного для людей рівня за обмеженої кількості дверних і віконних прорізів, що безпосередньо впливає на безпеку та ефективність дій [1].

У таких умовах ключовою проблемою стає не лише виявлення осередку небезпеки чи перешкод, а й забезпечення стійкого просторового орієнтування особового складу. Сучасні дослідження показують, що під час роботи в умовах незадовільного візуального контролю (далі – НВК) фахівці рятувальних служб змушені значною мірою покладатися на пам'ять про пройдений маршрут, а обмежена ситуаційна обізнаність підвищує ризик помилки, травмування або втрати орієнтації, особ-

ливо зі зростанням складності траєкторії руху [2]. Додатково встановлено, що недостатня видимість у задимленому середовищі є одним із визначальних чинників, які впливають на характер руху, а в умовах відсутності оптичної прозорості середовища змінюється сама структура поведінки фахівців під час переміщення [3].

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності орієнтування в таких умовах є використання акустичного каналу як додаткового засобу отримання навігаційної інформації. Вітчизняні дослідження показали, що застосування ультразвуку для орієнтування у задимленому середовищі є доцільним, а експериментальна перевірка розробленої системи в теплодимокамері підтвердила її практичну ефективність [4]. Разом з тим нові зарубіжні дослідження свідчать, що точність ультразвукових далекомірних сенсорів у середовищі диму та полум'я істотно залежить від фізичного стану середовища, а отже їх використання потребує спеціальної математичної обробки та корекції сигналів [5].

Таким чином, наукова проблема полягає в тому, що для застосування акустичного методу орієнтування в умовах незадовільного візуального контролю недостатньо використовувати спрощені моделі поширення хвиль в однорідному повітряному середовищі. Необхідною є розробка математичної моделі, яка б урахувала вплив температурного градієнта, концентрації зважених частинок, акустичного імпедансу перешкод і змінного кута падіння акустичної хвилі на параметри відбитого сигналу та точність визначення конфігурації простору.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У вітчизняних дослідженнях проблема роботи підрозділів у задимлених і складних внутрішніх просторах найчастіше розглядається через застосування технічних засобів візуальної підтримки, насамперед пожежних тепловізорів. Показано, що такі засоби підвищують ефективність розвідки, пошуку постраждалих і виявлення небезпечних зон, однак не усувають повністю проблему стійкого просторового орієнтування в умовах швидкої зміни середовища та обмеженого огляду [6].

Акустичний підхід у вітчизняній літературі представлений меншою кількістю праць. Установлено доцільність використання ультразвуку [7] для орієнтування у задимленому середовищі та підтверджено працездатність відповідного експериментального рішення. Також окремо обґрунтовано необхідність урахування коригувальних коефіцієнтів для параметрів акустичного пристрою під час аварійно-рятувальних робіт, що наближає дослідження до математичного опису процесу.

Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із переходом від опису окремого пристрою до опису фізики середовища, в якому працює акустична система. У дослідженнях [8] показано, що для застосування акустичного методу в умовах горіння і задимлення принципове значення мають температура, концентрація зважених частинок, кут падіння хвилі та хвильовий опір середовища і перешкоди. Це означає, що акустичний канал не можна розглядати як нейтральний: середовище здатне змінювати параметри акустичного сигналу, а отже повинно бути включене до математичної моделі.

Першою складовою, без урахування якої неможливо побудувати адекватну математичну модель акустичного методу орієнтування, є температурна неоднорідність середовища. У дослідженні [9] показано, що проходження акустичних хвиль через області з неоднорідним температурним полем у газовому середовищі супроводжується зміною параметрів поширення, відбиття й проходження хвиль. Також доведено, що температурні градієнти породжують акустичну анізотропію

та викривлення ультразвукових променів, а ігнорування цих ефектів призводить до помилок позиціонування. Для задачі орієнтування це означає, що швидкість звуку не може вважатися сталою, а час проходження сигналу в середовищі пожежі потребує корекції за локальним температурним станом.

Другою критичною складовою є концентрація зважених частинок, тобто аерозольних і димових включень, які змінюють дисипативні властивості середовища. Установлено, що в повітряних суспензіях частинок ультразвукове зондування дає змогу відстежувати локальну концентрацію твердої фази через зміну коефіцієнта загасання та фазової швидкості, причому для відповідних частотних діапазонів в'язка дисипація є домінуючою над розсіюванням і теплопровідними втратами [10]. Також показано, що достовірність показів ультразвукових далекомірів у середовищі диму та полум'я суттєво погіршується зі зміною фізичного стану середовища, а тому потрібні спеціальні алгоритми фільтрації та корекції вимірювань. Тому, концентрація зважених частинок має розглядатися не як другорядна завада, а як повноцінний параметр математичної моделі, що безпосередньо впливає на загасання й фазові характеристики сигналу.

Для практичного визначення відстані до перешкоди суттєвими є також акустичний імпеданс об'єкта та кут падіння хвилі на його поверхню. За даними зарубіжних досліджень [11], відбивальні характеристики ультразвукової хвилі істотно змінюються зі зміною кута падіння, а тому навіть за однакової геометричної відстані інтенсивність відбитого сигналу може бути різною. З прикладної точки зору це дає підстави враховувати акустичний імпеданс і кут падіння у вигляді табличних або каліброваних коефіцієнтів для типових умов відбиття.

Проведений аналіз дає підстави зробити кілька узагальнювальних висновків. По-перше, вітчизняні та зарубіжні дослідження односпайно підтверджують актуальність проблеми орієнтування рятувальника в середовищі з НВК і доводять доцільність використання додаткових технічних каналів навігаційної підтримки. По-друге, ультразвуковий підхід є перспективним, однак більшість наявних робіт або зосереджені на апаратній реалізації пристроїв, або розглядають окремі фізичні ефекти без інтеграції їх у єдину навігаційну модель. По-третє, температура, концентрація зважених частинок, акустичний імпеданс і кут падіння хвилі в дослідженнях вже ідентифіковані як фактори, що суттєво впливають на параметри поширення та відбиття акустичного сигналу, однак ці фактори переважно досліджуються ізольовано або в інших прикладних постановках.

Отже, невирішеною частиною проблеми залишається розробка цілісної математичної моделі акустичного методу орієнтування в середовищі з незадовільним візуальним контролем, яка б одночасно враховувала:

- 1) особливості розповсюдження акустичних хвиль в умовах надзвичайної ситуації, зокрема вплив температурного градієнта, концентрації зважених частинок, акустичного імпедансу та кута падіння хвилі на перешкоду;
- 2) сукупний вплив цих факторів на фізичні властивості акустичних хвиль при визначенні відстані до перешкоди та відновленні конфігурації середовища.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка математичної моделі акустичного методу орієнтування в середовищі з незадовільним візуальним контролем, яка враховує вплив факторів надзвичайної ситуації на фізичні властивості акустичних хвиль і дозволяє підвищити точність визначення відстані до перешкод та відновлення конфігурації середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити особливості розповсюдження акустичних хвиль в умовах надзвичайної ситуації з урахуванням впливу температурного градієнта, концентрації зважених частинок, акустичного імпедансу та кута падіння акустичної хвилі на перешкоду.

2. Розробити математичну модель акустичного методу орієнтування на основі врахування впливу факторів надзвичайної ситуації на параметри поширення та відбиття акустичних хвиль.

3. Розробити алгоритм визначення конфігурації середовища відповідно до математичної моделі для формування навігаційного рішення в умовах незадовільного візуального контролю.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – процес акустичного орієнтування в середовищі з незадовільним візуальним контролем.

Предметом дослідження є вплив температурного градієнта, концентрації зважених частинок, акустичного імпедансу та кута падіння акустичної хвилі на параметри поширення і відбиття акустичного сигналу, а також на точність визначення відстані до перешкод і конфігурації середовища.

Основна гіпотеза полягає в тому, що врахування факторів надзвичайної ситуації, які змінюють фізичні властивості акустичних хвиль, дасть змогу підвищити точність акустичного методу орієнтування та забезпечити більш достовірне визначення конфігурації середовища в умовах незадовільного візуального контролю.

Дослідження проводили аналітичним методом із використанням положень акустики неоднорідних середовищ, математичного моделювання процесів поширення та відбиття хвиль, а також алгоритмічної формалізації процедури визначення конфігурації простору. Під час дослідження розглядали багатоканальну систему акустичного зондування, у межах якої простір перед рятувальником поділявся на п'ять секторів, а оцінювання відстані до перешкод виконувалося за часовими та амплітудними характеристиками відбитого сигналу з урахуванням параметрів середовища.

5. Розробка математичної моделі акустичного методу орієнтування

Розробка математичної моделі акустичного методу орієнтування є ключовим етапом дослідження, оскільки саме вона забезпечує перехід від загального уявлення про придатність акустичного каналу до кількісного опису процесів поширення, відбиття та реєстрації акустичних хвиль у середовищі з незадовільним візуальним контролем. У реальних умовах надзвичайної ситуації параметри середовища не є сталими, що безпосередньо впливає на швидкість звуку, загасання сигналу, характер його відбиття та точність визначення відстані до перешкод.

Необхідність побудови узагальненої математичної моделі зумовлена тим, що в умовах пожежі, задимлення або руйнування конструкцій на акустичний сигнал одночасно впливають кілька фізичних чинників. До них належать температурний градієнт, концентрація зважених частинок, акустичний імпеданс середовища і перешкоди, а також кут падіння акустичної хвилі на відбивальну поверхню. Ігнорування хоча б одного з цих чинників може призводити до похибок у визначенні дистанції, викривлення енергетичних характеристик відбитого сигналу та помилок під час відновлення конфігурації простору.

У зв'язку з цим побудова математичної моделі в даній роботі здійснюється послідовно: спочатку визначаються особливості розповсюдження акустичних хвиль в умовах надзвичайної ситуації, далі формуються часткові залежності для окремих факторів впливу, після чого вони інтегруються в єдину модель акустичного методу орієнтування. Завершальним етапом є алгоритмічна інтерпретація розробленої моделі для визначення конфігурації середовища та формування навігаційного рішення.

5.1. Особливості розповсюдження акустичних хвиль в умовах надзвичайної ситуації

Особливості розповсюдження акустичних хвиль в умовах надзвичайної ситуації визначаються тим, що середовище поширення перестає бути фізично однорідним і стає багатфакторним каналом передавання інформації. У зоні пожежі, задимлення або руйнування повітряне середовище характеризується температурною стратифікацією, наявністю дисперсних частинок, змінними межами розділу середовищ та випадковою орієнтацією поверхонь перешкод. Унаслідок цього змінюються не лише кінематичні параметри сигналу, зокрема швидкість поширення і час прольоту, а й енергетичні характеристики, пов'язані із загасанням, розсіюванням та відбиттям хвилі.

Для задачі акустичного орієнтування це означає, що процес реєстрації перешкоди не може розглядатися лише як вимірювання часової затримки імпульсу. Реальний відбитий сигнал є результатом сукупної дії фізичних властивостей середовища та умов взаємодії хвилі з поверхнею об'єкта. Саме тому далі окремо розглядаються вплив температурного градієнта, концентрації зважених частинок, акустичного імпедансу та кута падіння хвилі як основних чинників, що визначають точність і стійкість акустичного методу орієнтування.

5.1.1. Визначення впливу температурного градієнту

Температура є одним із визначальних термодинамічних параметрів газового середовища, оскільки саме вона впливає на швидкість поширення акустичних хвиль. У класичних задачах акустики швидкість звуку c часто приймають сталою величиною, однак в умовах пожежі або техногенної аварії таке припущення втрачає коректність. У зоні надзвичайної ситуації формуються значні просторові перепади температури, що зумовлює неоднорідність середовища поширення та зміну кінематичних параметрів акустичного сигналу [12].

Фізично вплив температурного градієнта проявляється у двох основних ефектах. По-перше, локальне підвищення температури спричиняє збільшення швидкості звуку, внаслідок чого при використанні незмінного номінального значення c виникає систематична похибка визначення відстані до перешкоди. По-друге, просторова неоднорідність температурного поля викликає викривлення траєкторії акустичного променя, оскільки хвиля поширюється в напрямку областей із меншою швидкістю звуку, тобто у бік холодніших шарів повітря. Це призводить до додаткових похибок під час просторової локалізації перешкоди [12, 13].

Базова залежність швидкості звуку від абсолютної температури T для ідеального газу описується рівнянням Лапласа (1):

$$c(T) = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (1)$$

де $c(T)$ – швидкість звуку, що залежить від температури T ; γ – показник адіабати (для двоатомного газу, повітря ≈ 1.4); R – універсальна газова стала (8.314 Дж/(моль·К)); T – абсолютна температура середовища ($T = t^{\circ}\text{C} + 273,15$); M – молярна маса повітря ($\approx 0,029$ кг/моль).

Для інженерних розрахунків доцільно використовувати лінеаризовану залежність у градусах Цельсія, вираз (2):

$$c(t) \approx 331,3 + 0,606t, \quad (2)$$

де t – температура в $^{\circ}\text{C}$.

В умовах надзвичайної ситуації температурне поле середовища, як правило, є просторово неоднорідним. Під час пожежі у верхніх шарах приміщення накопичуються нагріті гази та продукти горіння, тоді як у при поверхневій зоні температура залишається нижчою. Унаслідок цього швидкість звуку стає функцією координат простору, вираз (3):

$$c = c(x, y, z), \quad (3)$$

За таких умов акустична хвиля поширюється вже не в однорідному, а в стратифікованому середовищі, що спричиняє рефракцію акустичних променів. У найпростішому випадку без урахування неоднорідності час проходження хвилі на відстань r описується співвідношенням

$$\tau = \frac{r}{c}, \quad (4)$$

де r – відстань до перешкоди; c – швидкість звуку.

Однак для системи акустичного орієнтування, що працює за принципом реєстрації відбитого сигналу, практичне значення має час подвійного проходження хвилі до перешкоди і назад. У однорідному середовищі він визначається як

$$\tau = \frac{2r}{c}. \quad (5)$$

У середовищі з температурним градієнтом така залежність уже не є точною, оскільки швидкість звуку змінюється вздовж траєкторії поширення хвилі. Тому час проходження сигналу слід визначати інтегрально вздовж реальної траєкторії променю:

$$\tau = \int_{\Gamma} \frac{dS}{c(x, y, z)}, \quad (6)$$

де Γ – траєкторія поширення акустичного променю, dS – елемент довжини цієї траєкторії, $c = c(x, y, z)$ – локальна швидкість звуку у відповідній точці простору.

Для ехолокаційного режиму, коли сигнал проходить шлях до перешкоди і назад, відповідне співвідношення можна подати як

$$\tau = 2 \int_{\Gamma} \frac{dS}{c(x, y, z)}, \quad (7)$$

Отже, у середовищі з температурною стратифікацією час прольоту акустичного сигналу визначається не лише геометричною відстанню до перешкоди, а й просторовим розподілом температури. Ігнорування цього ефекту може призводити до систематичних похибок визначення дистанції та викривлення просторового положення об'єкта. Саме тому в математичній моделі акустичного методу орієнтування доцільно передбачити механізм адаптивної корекції швидкості звуку на основі поточного температурного стану середовища, що дозволяє підвищити точність оцінювання параметрів перешкоди в умовах надзвичайної ситуації.

5.1.2 Визначення впливу концентрації зважених частинок

У середовищі надзвичайної ситуації повітря, насичене продуктами горіння, димом, пилом і аерозольними домішками, перестає бути однорідним газом і набуває властивостей газодисперсної системи. Наявність зважених частинок з концентрацією C_p (кг/м³) спричиняє додаткові механізми дисипації енергії акустичної хвилі, які відсутні в чистому повітрі. Основними з них є в'язкі втрати, зумовлені відносним рухом частинок і навколишнього газу, а також теплові втрати, пов'язані з циклічним нагріванням і охолодженням частинок у фазах стиснення та розрідження хвилі. Саме тому в задимленому середовищі зростає загасання акустичного сигналу, а його амплітуда зменшується швидше, ніж у чистому повітрі [14, 15].

Загасання амплітуди звукового тиску $P(x)$ на відстані X доцільно описувати експоненціальним законом, вираз (8):

$$P(x) = P_0 \cdot e^{-a_{\Sigma} x}, \quad (8)$$

де a_{Σ} – сумарний коефіцієнт загасання. У зоні пожежі або техногенної аварії повітря насичене продуктами горіння, аерозолями та пилом, які формують дисперсне середовище. У такому середовищі загасання сигналу описується залежністю у вигляді суми класичного поглинання в газі (a_{gas}) та додаткового загасання на частинках (a_{part}), вираз (9):

$$a_{\Sigma} = a_{\text{gas}}(f, T, \phi) + a_{\text{part}}(C_p, f, r_p, \rho_p), \quad (9)$$

де a_{Σ} – сумарний коефіцієнт загасання, β – коефіцієнт розсіювання, a_{gas} – загасання в газовій фазі (залежить від f, T, ϕ), f – частота сигналу, T – температура, ϕ – об'ємна частка або концентрація аерозолю, a_{part} – загасання на зважених частинках (залежить від C_p, f, r_p, ρ_p), C_p – концентрація зважених частинок, r_p – радіус частинок, ρ_p – густина матеріалу частинок.

Відповідно до класичних моделей поглинання звуку в суспензіях, внесок зважених частинок у загасання хвилі визначається їх концентрацією, розміром, фізичними властивостями та частотою акустичного сигналу. Для інженерного

опису в межах даної роботи цей внесок доцільно подавати в узагальненій параметричній формі (10):

$$a_{\text{part}} = K_p(C_p, \gamma_p, \rho_p, \mu, \kappa) f^2, \quad (10)$$

де K_p – узагальнений коефіцієнт, що враховує концентрацію частинок, їх розмір, густину, а також в'язкі й теплові властивості середовища; μ – динамічна в'язкість; κ – параметр, що характеризує теплові властивості дисперсної системи.

Таким чином, концентрація зважених частинок у середовищі надзвичайної ситуації безпосередньо впливає на енергетичні характеристики акустичного сигналу, а її ігнорування призводить до помилок під час інтерпретації амплітуди відбитого імпульсу. Саме тому в математичній моделі акустичного методу орієнтування параметр C_p доцільно враховувати як змінну характеристику середовища, що визначає додаткове загасання хвилі.

5.1.3 Визначення впливу акустичного імпедансу

Акустичний імпеданс є фундаментальною характеристикою середовища або матеріалу, що визначає його опір поширенню акустичних хвиль. Він задається співвідношенням (11):

$$Z = \rho c, \quad (11)$$

де Z – акустичний імпеданс; ρ – густина середовища; c – швидкість звуку в ньому.

Для задачі акустичного орієнтування визначальним є не саме значення імпедансу, а ступінь неузгодженості імпедансів на межі розділу двох середовищ, наприклад «повітря — перешкода». Саме ця неузгодженість формує відбитий сигнал, який далі використовується для визначення відстані до об'єкта та оцінювання його властивостей. У разі нормального падіння акустичної хвилі коефіцієнт відбиття за тиском визначається як

$$R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (12)$$

де Z_1 – акустичний імпеданс середовища поширення; Z_2 – акустичний імпеданс матеріалу перешкоди.

Для оцінювання частки енергії, що повертається до приймача, доцільно використовувати енергетичний коефіцієнт відбиття

$$\beta_E = |R|^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad (13)$$

За значної різниці між Z_1 і Z_2 , що характерно для межі «повітря – тверде тіло», більша частина енергії хвилі відбивається назад у середовище поширення. Натомість для матеріалів із меншим імпедансом або близькими значеннями Z_1 і Z_2 рівень відбиття зменшується, а відбитий сигнал стає слабшим. Це безпосередньо

впливає на порогові умови детектування перешкоди та на стійкість роботи алгоритму в реальному середовищі [16].

Для цілей даної статті акустичний імпеданс перешкод доцільно враховувати у вигляді табличних або каліброваних значень для типових матеріалів – бетону, металу, деревини, текстилю, елементів спорядження тощо. Такий підхід дозволяє перейти від загального опису хвильового процесу до практичного урахування фізичної природи перешкоди в математичній моделі акустичного методу орієнтування.

5.1.4 Визначення впливу кута падіння акустичної хвилі на перешкоду

Кут падіння акустичної хвилі на поверхню перешкоди є одним із ключових факторів, що визначають інтенсивність відбитого сигналу. У реальних умовах надзвичайної ситуації цей кут не є сталим, оскільки залежить від взаємного положення рятувальника, сенсорного модуля та поверхні об'єкта. Для гладких поверхонь за косоного падіння значна частина енергії відбивається у напрямку, відмінному від положення приймача, що призводить до зменшення амплітуди корисного ехосигналу. Для шорстких поверхонь, навпаки, частина енергії переходить у дифузне розсіювання, і відбитий сигнал формується як результат суперпозиції дзеркальної та розсіяної складових [17].

З огляду на це вплив кута падіння доцільно вводити в модель через спеціальний коригувальний коефіцієнт анізотропії розсіювання $K(\theta)$, який відображає зміну енергетичного потенціалу відбитого сигналу залежно від геометрії взаємодії хвилі з поверхнею. В інженерному наближенні такий коефіцієнт можна записати у вигляді виразу (14):

$$K(\theta) = \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \cdot \cos(\theta), \quad (14)$$

де θ – кут падіння хвилі (кут між нормаллю до поверхні та вектором поширення); σ_θ – параметр, що характеризує ширину пелюстки зворотного розсіювання (залежить від шорсткості поверхні).

Тоді амплітуда прийнятого сигналу в моностатичній конфігурації може бути подана у вигляді пропорційності (15):

$$P_{rx}(\theta) \propto P_{inc} \cdot R_p \cdot K_\theta, \quad (15)$$

де P_{inc} – амплітуда падаючої хвилі; R_p – коефіцієнт відбиття за тиском; K_θ – кутовий коефіцієнт анізотропії розсіювання.

З рівняння (15) випливає, що зі збільшенням кута падіння, особливо при наближенні до ковзного режиму, амплітуда корисного відбитого сигналу зменшується. Це створює зони «акустичної тіні» та обумовлює необхідність використання просторово рознесених сенсорів. Для практичної реалізації системи орієнтування кут падіння доцільно враховувати або як табличний параметр для типових сценаріїв відбиття, або як функцію геометрії взаємного положення сенсора і перешкоди.

5.2. Математична модель акустичного методу орієнтування

Завдання побудови математичної моделі акустичного методу орієнтування

полягає у формалізації сукупного впливу температурного градієнта, концентрації зважених частинок, акустичного імпедансу середовища та перешкоди, а також кута падіння акустичної хвилі на параметри відбитого сигналу. На відміну від класичних імпульсних далекомірних підходів, у яких відстань визначається лише за часовою затримкою сигналу, у даній роботі вимірювальний тракт розглядається як частина системи «середовище – перешкода – сенсорний модуль». У такій постановці середовище не є пасивним каналом передавання, а виступає активним фізичним фільтром, що змінює кінематичні та енергетичні характеристики акустичної хвилі.

Основою моделі є часткові залежності, одержані в підрозділах 5.1.1–5.1.4. Температурний градієнт визначає ефективну швидкість поширення хвилі, концентрація зважених частинок – сумарний коефіцієнт загасання, акустичний імпеданс – рівень відбиття на межі розділу середовищ, а кут падіння – кутову втрату енергії при поверненні сигналу до приймача. Таким чином, математична модель повинна поєднувати часову та амплітудну інформацію в єдиній процедурі оцінювання відстані до перешкоди.

Для врахування просторової неоднорідності температурного поля введемо ефективну швидкість поширення акустичної хвилі вздовж реальної траєкторії променю Γ , вираз (16):

$$c_{\text{ef}} = \left(\frac{1}{L} \int_{\Gamma} \frac{dS}{c(x, y, z)} \right)^{-1}, \quad (16)$$

де L – довжина траєкторії поширення хвилі; $c(x, y, z)$ – локальна швидкість звуку, визначена виразами (1–3).

Тоді модельна часова затримка відбитого сигналу для перешкоди, розташованої на відстані r , визначається як вираз (17):

$$\tau_{\text{mod}}(r) = \frac{2r}{c_{\text{ef}}}, \quad (17)$$

Енергетичну складову моделі доцільно описувати через узагальнену передавальну функцію середовища і відбиття (18):

$$H(r) = \frac{\sqrt{\beta_E(Z_1, Z_2) K_\theta(\theta)}}{r^2} \exp[-2a_\Sigma(C_p, T)r], \quad (18)$$

де $\beta_E(Z_1, Z_2)$ – енергетичний коефіцієнт відбиття, визначений виразом (13); $K_\theta(\theta)$ – кутовий коефіцієнт анізотропії розсіювання, визначений виразом (14); $a_\Sigma(C_p, T)$ – сумарний коефіцієнт загасання, що враховує газову фазу та зважені частинки; $\frac{1}{r^2}$ – геометричний множник ослаблення сигналу внаслідок розходження хвильового фронту.

Відповідно, модельна амплітуда відбитого сигналу може бути подана у вигляді (19):

$$A_{\text{mod}}(r) = A_{\text{ref}} H(r), \quad (19)$$

де A_{ref} – калібрувальна константа амплітуди, що відповідає еталонному сигналу за стандартних умов вимірювання.

Оскільки в реальному середовищі часові та амплітудні характеристики сигналу спотворюються по-різному, оцінювання істинної відстані до перешкоди доцільно звести до задачі оптимізації. кориговане значення відстані \hat{R} визначається як таке, що мінімізує функцію нев'язки між вимірними параметрами сигналу та їх модельними значеннями, вираз (20):

$$\hat{R} = \arg \min_{r>0} J(r), \quad (20)$$

де цільова функція має вигляд (21):

$$J(r) = \omega_1 (t_{\text{meas}} - \tau_{\text{mod}}(r))^2 + \omega_2 [\ln A_{\text{meas}} - \ln A_{\text{mod}}(r)]^2, \quad (21)$$

Після підстановки формул (17) і (19) одержуємо розгорнутий вигляд функції оптимізації, вираз (22):

$$J(r) = \omega_1 \left(t_{\text{meas}} - \frac{2r}{C_{\text{ef}}} \right)^2 + \omega_2 \left[\ln A_{\text{meas}} - \ln \left(A_{\text{ref}} \frac{\sqrt{\beta_E(Z_1, Z_2) K_\theta(\theta)}}{r^2} e^{-2a \sum (C_p, T)r} \right) \right]^2, \quad (22)$$

де τ_{meas} і A_{meas} – вимірні значення часу затримки та амплітуди відбитого сигналу; ω_1 , ω_2 – коефіцієнти узгодження часової та амплітудної складових цільової функції.

Запропонована модель має кілька принципових переваг. По-перше, вона забезпечує параметричну корекцію вимірювань відповідно до фізичного стану середовища. По-друге, вона реалізує комплексування часової та енергетичної інформації, завдяки чому зменшується ймовірність хибної інтерпретації сигналу в неоднорідному середовищі. По-третє, включення до моделі імпедансного та кутового множників створює основу для подальшого якісного розпізнавання типу перешкоди та уточнення просторової конфігурації середовища.

Отже, математична модель акустичного методу орієнтування дозволяє перейти від первинних вимірювальних даних до скоригованої оцінки відстані до перешкоди, яка враховує сукупний вплив факторів надзвичайної ситуації. Разом з тим для практичного використання цієї моделі у складі носимого пристрою необхідно реалізувати послідовність обчислювальних процедур, що забезпечують інтерпретацію багатоканальних вимірювань у реальному часі.

5.3. Алгоритм визначення конфігурації середовища відповідно до математичної моделі

Для практичної реалізації фізичних принципів у обчислювальному модулі системи орієнтування необхідно трансформувати отримані рівняння у чітку послідовність логічних операцій. Це вимагає розробки процедури, яка б у режимі реального часу інтерпретувала вхідний потік даних для реконструкції просторової картини.

Алгоритм визначення конфігурації середовища є прикладною реалізацією розробленої математичної моделі акустичного методу орієнтування. Його призначення полягає у переході від первинних вимірювальних даних, отриманих від сенсорного модуля, до просторово узгодженого подання середовища перед оператором. На відміну від спрощеного підходу, за якого визначається лише факт наявності перешкоди, запропонований алгоритм забезпечує оцінювання відстані до об'єкта, локалізацію перешкоди в межах відповідного сектора та формування навігаційного рішення, придатного для використання в умовах незадовільного візуального контролю.

Функціонування алгоритму безпосередньо пов'язане з конструкцією розроблюваного пристрою. На шоломному модулі оператора розміщено п'ять акустичних сенсорів, просторове рознесення яких забезпечує секторне зонування простору перед оператором у межах кута близько 120° . Кожний сенсор контролює сектор орієнтовно 24° , унаслідок чого формується п'ятиканальна система вимірювання, де кожен канал оцінює стан свого локального напрямку. Така конфігурація дає змогу перейти від одиничного визначення відстані до багатоканального аналізу акустичного простору та подальшого відновлення конфігурації середовища.

Блок-схема алгоритму відображає циклічний характер його роботи, зображена на рис. 1.

У межах одного циклу здійснюються ініціалізація службових змінних, послідовне опитування сенсорів, перевірка наявності відбитого сигналу, обчислення сирої та скоригованої відстані, завершення циклу обробки всіх каналів і перевірка достатності отриманих даних для стійкої роботи системи. Якщо кількість інформативних вимірювань є недостатньою, виконується повторна перевірка працездатності; за достатньої кількості валідних відгуків система переходить до стадії формування конфігурації середовища.

Функціонування алгоритму пов'язане з роботою п'яти акустичних сенсорів, розміщених на шоломному модулі оператора. Простір перед рятувальником поділяється на п'ять суміжних секторів, кожному з яких відповідає окремий канал зондування. Такий підхід забезпечує перехід від одиничного вимірювання відстані до багатоканального аналізу акустичного простору та дозволяє відновлювати конфігурацію середовища у фронтальній зоні руху.

Алгоритм працює циклічно. На початковому етапі здійснюється ініціалізація службових змінних та запуск послідовного опитування сенсорів. Для кожного каналу виконується перевірка наявності відбитого сигналу. Якщо ехосигнал відсутній, сектор інтерпретується як невизначений, після чого алгоритм переходить до наступного каналу. Якщо сигнал отримано, за результатами вимірювання часу прольоту та амплітуди формуються первинна оцінка дальності та її скориговане значення відповідно до математичної моделі, наведеної в підрозділі 5.2.

У межах одного циклу формується вектор скоригованих відстаней, вираз (23):

$$E = \{\hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{R}_3, \hat{R}_4, \hat{R}_5\}, \quad (23)$$

де \hat{R}_i – скоригована відстань до найближчої перешкоди у відповідному секторі. Паралельно формується вектор логічних станів, вираз (24):

$$K = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}, \quad (24)$$

де K_i відображає стан сектора: вільний простір, наявність перешкоди, акустично поглинаюча поверхня або невизначений сектор.

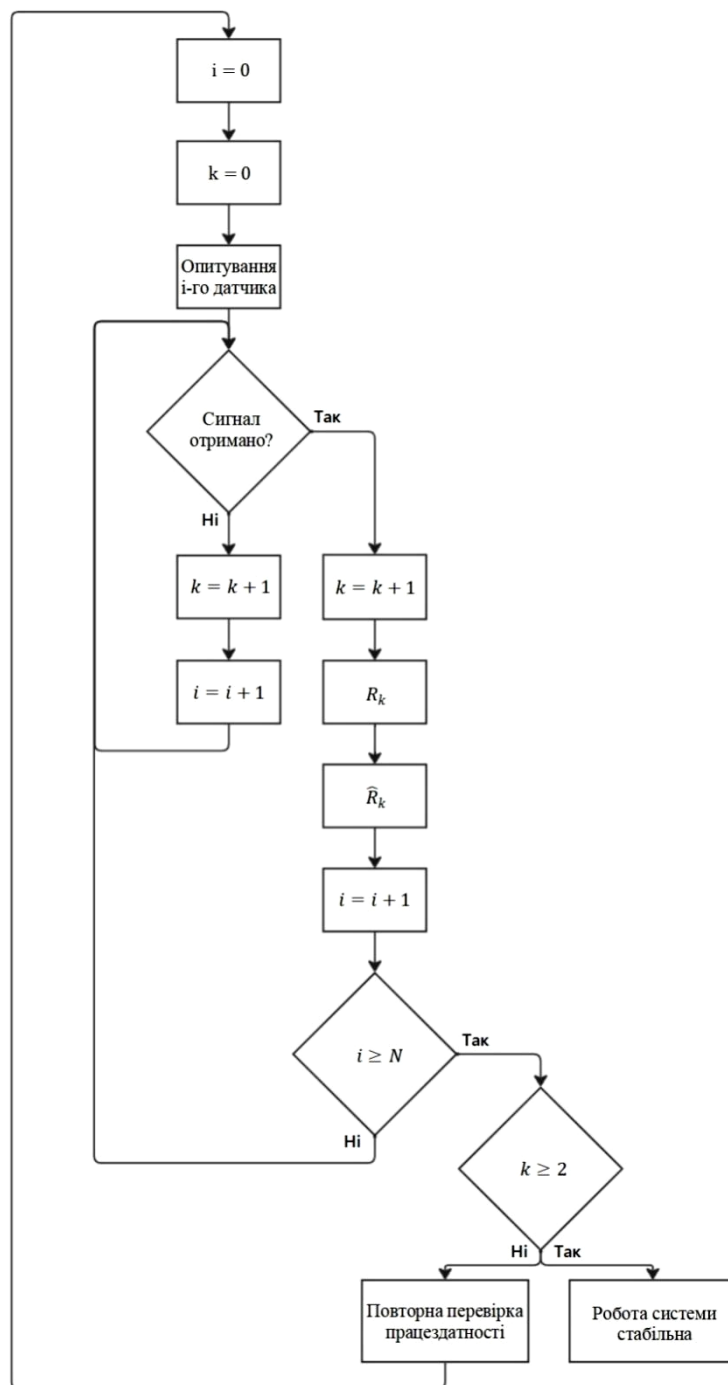


Рис. 1. Блок-схема алгоритму визначення конфігурації середовища

Після завершення опитування всіх каналів виконується перевірка достатності отриманих інформативних відгуків для стійкого функціонування системи. Якщо кількість валідних вимірювань є недостатньою, алгоритм формує команду повторної перевірки працездатності та запускає новий цикл зонування. Якщо ж кількість інформативних сигналів є достатньою, здійснюється міжсекторне узгодження результатів і відновлення конфігурації середовища.

Узагальнене подання середовища перед оператором формується у вигляді

секторної акустичної карти, вираз (25):

$$M = \{(S_i, \hat{R}_i, K_i)\}_{i=1}^5, \quad (25)$$

де S_i – номер сектора, \hat{R}_i – скоригована відстань, K_i – логічний статус сектора.

На основі цієї карти формується навігаційне рішення: прямолінійний рух, обхід ліворуч, обхід праворуч, небезпечний напрям або необхідність повторного зонування.

Таким чином, запропонований алгоритм забезпечує поєднання секторного принципу зонування, корекції параметрів середовища, багатоканального оцінювання дальності та міжсекторного узгодження результатів. Це дає змогу використовувати акустичну систему як додатковий засіб орієнтування рятувальника в умовах незадовільного візуального контролю.

6. Обговорення результатів моделювання процесу визначення конфігурації середовища

Отримані результати підтверджують, що побудова акустичного методу орієнтування в середовищі з незадовільним візуальним контролем потребує переходу від спрощеного далекомірного підходу до фізично узгодженої моделі, у якій параметри середовища розглядаються як активні фактори формування відбитого сигналу. На відміну від класичної схеми, де відстань оцінюється лише за часовою затримкою імпульсу, у розробленій постановці враховано, що в умовах пожежі, задимлення або руйнування конструкцій швидкість поширення хвилі, її загасання, енергетика відбиття та просторовий характер повернення сигналу змінюються одночасно.

Показано, що температурний градієнт є одним із ключових джерел систематичної похибки. Його вплив проявляється не тільки через зміну швидкості звуку, а й через викривлення траєкторії поширення хвилі. У межах моделі це обґрунтовує відмову від використання сталої швидкості звуку та перехід до ефективної швидкості, що визначається поточним станом середовища. Такий підхід є принципово важливим для задач орієнтування, оскільки навіть незначне відхилення в оцінці часу прольоту в умовах неоднорідного температурного поля призводить до помилки у визначенні дальності та сектора розташування перешкоди.

Встановлено також, що концентрація зважених частинок не може розглядатися як другорядна завада. У задимленому або запиленому середовищі вона формує додатковий канал дисипації акустичної енергії, унаслідок чого амплітуда відбитого сигналу зменшується швидше, ніж це передбачено моделями для чистого повітря. Саме тому введення сумарного коефіцієнта загасання є необхідним елементом математичної моделі. Це особливо важливо для алгоритму, який використовує не лише часові, а й амплітудні ознаки сигналу, оскільки без урахування втрат у середовищі амплітудний канал давав би фізично некоректну інформацію про відстань або властивості перешкоди.

Окреме значення для інтерпретації ехосигналу мають акустичний імпеданс і кут падіння хвилі на поверхню перешкоди. У роботі показано, що ці фактори визначають енергетику відбиття та, відповідно, придатність сигналу до подальшого використання в алгоритмі. Імпедансне узгодження дозволяє враховувати фізичну природу поверхні, тоді як кут падіння визначає геометричну ефективність

повернення хвилі до приймача. Це означає, що навіть за однакової геометричної відстані амплітуда сигналу може істотно змінюватися залежно від матеріалу та орієнтації перешкоди. З цієї точки зору доцільним є введення табличних або каліброваних параметрів для типових поверхонь і характерних режимів відбиття.

Суттєвою перевагою запропонованої математичної моделі є комплексування часової та амплітудної інформації в межах єдиної оптимізаційної постановки. Такий підхід підвищує робастність оцінювання порівняно з класичними імпульсними далекомірними методами, оскільки часовий канал забезпечує базову геометричну оцінку дальності, а амплітудний – виконує її фізичну верифікацію з урахуванням параметрів середовища та умов відбиття. У цьому полягає одна з головних відмінностей розробленої моделі: вона не лише обчислює відстань, а й дозволяє інтерпретувати відбитий сигнал як носій додаткової інформації про тип перешкоди та характер взаємодії хвилі з поверхнею.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що математична модель стала основою для побудови алгоритму визначення конфігурації середовища. Запропонований алгоритм реалізує секторне подання простору, багатоканальне опитування сенсорів, корекцію параметрів середовища, формування скоригованих відстаней і міжсекторне узгодження результатів. У результаті акустична система переходить від рівня окремих вимірювань до формування просторово узгодженої секторної карти середовища, що вже може бути використана для прийняття навігаційного рішення.

Разом з тим запропонована модель має певні обмеження. По-перше, вона передбачає наявність каліброваних або табличних значень для акустичного імпедансу типових перешкод і кутових характеристик відбиття, що потребує окремого експериментального уточнення. По-друге, модель орієнтована на ближню зону акустичного зондування та моностатичну конфігурацію роботи сенсора, тому для складних багатовідбитих середовищ може потребувати розширення. По-третє, подальшого дослідження потребує експериментальна верифікація параметрів узгодження часової та амплітудної складових цільової функції.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні теоретичної основи для побудови носимої системи акустичного орієнтування рятувальника, здатної функціонувати в умовах пожежі, задимлення та складної просторової конфігурації середовища. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну верифікацію моделі, уточнення табличних параметрів для типових матеріалів перешкод і відпрацювання алгоритму в реальних або модельованих умовах надзвичайної ситуації.

Отже, результати дослідження свідчать, що запропонований підхід є обґрунтованим з фізичної та алгоритмічної точок зору. Його перевага полягає в інтеграції основних факторів надзвичайної ситуації в єдину математичну схему, яка придатна для подальшої реалізації у носимій системі акустичного орієнтування рятувальника.

Висновки

1. У результаті дослідження встановлено, що визначальними факторами, які змінюють параметри поширення та відбиття акустичного сигналу в умовах надзвичайної ситуації, є температурний градієнт, концентрація зважених частинок, акустичний імпеданс та кут падіння акустичної хвилі на перешкоду. Показано, що

температурний чинник безпосередньо впливає на швидкість звуку відповідно до залежності $c(t) \approx 331,3 + 0,606t$, тобто збільшення температури на 1°C змінює швидкість поширення хвилі приблизно на $0,606$ м/с. Це означає, що за підвищення температури від 20°C до 100°C швидкість звуку зростає приблизно від $343,4$ м/с до $391,9$ м/с, тобто на $48,5$ м/с. За таких умов використання сталої швидкості звуку призводить до систематичного викривлення дальномірної оцінки. Якщо істинна відстань до перешкоди становить 5 м, а фактична температура середовища дорівнює 100°C , то при обробці сигналу з використанням номінального значення швидкості звуку для 20°C оцінена відстань становитиме близько $4,38$ м, тобто похибка перевищить $0,6$ м. Це підтверджує, що температурна корекція є обов'язковою складовою моделі. Одночасно встановлено, що концентрація зважених частинок визначає додаткове загасання сигналу, а акустичний імпеданс і кут падіння формують енергетику відбиття та впливають на достовірність ідентифікації перешкоди.

2. Розроблено математичну модель акустичного методу орієнтування, у якій оцінювання відстані до перешкоди здійснюється не лише за часовою затримкою, а на основі комплексного врахування кінематичних та енергетичних характеристик відбитого сигналу. У моделі використано ефективну швидкість поширення хвилі c_{ef} , сумарний коефіцієнт загасання a_{Σ} , енергетичний коефіцієнт відбиття β_E та кутовий коефіцієнт анізотропії розсіювання K_{θ} . Показано, що амплітудна складова сигналу зменшується не лише внаслідок поглинання в середовищі, а й через геометричне ослаблення, яке для відбитого сигналу містить множник $\frac{1}{r^2}$.

Це означає, що навіть без урахування дисипативних втрат збільшення відстані від 1 м до 3 м призводить до зменшення амплітуди щонайменше у 999 разів лише за рахунок просторового розходження хвильового фронту. На відміну від класичних імпульсних підходів, де дальність оцінюється лише за співвідношенням $\tau = \frac{2r}{c}$, у

запропонованій моделі істинна відстань \hat{R} визначається як результат мінімізації цільової функції, що узгоджує часову та амплітудну нев'язки. Це підвищує фізичну узгодженість моделі та стійкість оцінювання в неоднорідному середовищі.

3. Розроблено алгоритм визначення конфігурації середовища відповідно до побудованої математичної моделі. Алгоритм реалізує секторне зонування простору перед оператором за допомогою п'яти акустичних каналів, що формують фронтальний сектор спостереження близько 120° з орієнтовною шириною одного сектора 24° . У межах одного циклу формується вектор скоригованих відстаней $E = \{\hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{R}_3, \hat{R}_4, \hat{R}_5\}$ та логічний вектор стані $K = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$, після чого виконується міжсекторне узгодження результатів. Важливою умовою стійкої роботи алгоритму є наявність не менше двох інформативних секторних відгуків $k \geq 2$, що дає змогу перейти від окремих вимірювань до просторово узгодженого подання середовища. У підсумку алгоритм забезпечує формування секторної акустичної карти M та навігаційного рішення типу «рух прямо», «обхід ліворуч», «обхід праворуч» або «небезпечний напрям». Це створює основу для практичного використання носимої акустичної системи орієнтування в умовах незадовільного візуального контролю.

Література

1. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2025 року [Електронний ресурс]. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf>
2. Slater A. E., Ferris S., Dixon J. A., Renshaw C., Moore T. E., Frady G., Harrison S. J. Navigating in zero-visibility: A haptic guidance system for improving egress and situation awareness of professional firefighters. *Human Factors*. 2025. Vol. 67. № 11. P. 1152–1169. doi: 10.1177/00187208251348020
3. Tao Y., Yu H., Song W., Song X., Zhang J. Dynamic analysis of firefighter movement in single-file experiment at different visibility levels. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2025. Art. 130716. doi: 10.1016/j.physa.2025.130716
4. Бас О., Лагно Д., Ножко І., Пелипенко М. Використання ультразвуку для орієнтування у задимленому середовищі. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2021. Т. 5. № 1. С. 15–26. doi: 10.31731/2524-2636.2021.5.1.-15-26
5. Muhammad S., Adeel H., Khattak T. S., Rao I. R., Hayat S. Assessing the fidelity of ultrasonic distance sensors in a fire-and-smoke environment. *Asian Journal of Science, Engineering and Technology*. 2024. Vol. 3. № 1. P. 135–150. doi: 10.47264/idea.ajset/3.1.9
6. Луц В. І., Войтович Д. П., Лазаренко О. В., Штангрет Н. О. Розроблення методики оцінки параметрів пожежних теплових зорів. *Пожежна безпека*. 2019. № 35. С. 41–48. doi: 10.32447/20786662.35.2019.07
7. Стативка Є. С. Визначення коригуючих коефіцієнтів параметрів акустичного пристрою системи орієнтування при аварійно-рятувальних роботах. *Проблеми пожежної безпеки 2022 : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Харків. 2022*. С. 227.
8. Loboichenko V., Wilk-Jakubowski J. L., Levterov A., Wilk-Jakubowski G., Statyvka Y., Shevchenko O. Using the burning of polymer compounds to determine the applicability of the acoustic method in fire extinguishing. *Polymers*. 2024. Vol. 16. № 23. Art. 3413. doi: 10.3390/polym16233413
9. Slongo J. S., Gund J., Passarin T. A. R., Pipa D. R., Ramos J. E., Arruda L. V., Junior F. N. Effects of thermal gradients in high-temperature ultrasonic non-destructive tests. *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 7. Art. 2799. doi: 10.3390/s22072799
10. van den Wildenberg S., Jia X., Roche O. Acoustic probing of the particle concentration in turbulent granular suspensions in air. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Art. 16544. doi: 10.1038/s41598-020-73427-z
11. Shang F., Sun B., Zhang H. Measurement of air layer thickness under multi-angle incidence conditions based on ultrasonic resonance reflection theory for flange fasteners. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. № 10. Art. 6057. doi: 10.3390/app13106057
12. Tarau C., Ötügen M. V. Propagation of acoustic waves through regions of non-uniform temperature. *International Journal of Aeroacoustics*. 2002. Vol. 1. № 2. P. 165–181. doi: 10.1260/147547202760236950
13. Sánchez-Dehesa J., Angelov M. I., Cervera F., Cai L.-W. Sound control by temperature gradients. *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 95. № 20. Art. 204102. doi: 10.1063/1.3263949
14. Epstein P. S., Carhart R. R. The absorption of sound in suspensions and emulsions. I. Water fog in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1953. Vol. 25. № 3. P. 553–565. doi: 10.1121/1.1907107

15. Morfey C. L. Sound attenuation by small particles in a fluid. *Journal of Sound and Vibration*. 1968. Vol. 8. № 1. P. 156–170. doi: 10.1016/0022-460X(68)90202-2

16. Rathod V. T., et al. A review of acoustic impedance matching techniques for piezoelectric sensors and transducers. *Sensors*. 2020. Vol. 20. № 14. Art. 4051. doi: 10.3390/s20144051

17. Darmon M., Dorval V., Baqué F. Acoustic scattering models from rough surfaces: A brief review and recent advances. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. № 22. Art. 8305. doi: 10.3390/app10228305

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

Y. Statyvka, Adjunct

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF ACOUSTIC METHOD OF ORIENTATION IN AN ENVIRONMENT WITH UNSATISFACTORY VISUAL CONTROL

It is substantiated that, under conditions of poor visual control caused by fires, smoke, structural collapse, and other manifestations of emergency situations of fire-related or technogenic origin, the acoustic channel should be considered as an additional source of navigation information during rescue operations. The influence of emergency factors on the propagation and reflection parameters of the acoustic signal is determined. The features of acoustic wave propagation are established with regard to the temperature gradient, concentration of suspended particles, acoustic impedance of the medium and the obstacle, as well as the angle of incidence of the acoustic wave on the object surface. It is shown that these factors modify the kinematic and energy characteristics of the signal, which directly affects the accuracy of obstacle distance estimation and environment configuration reconstruction. A mathematical model of the acoustic orientation method is developed, which accounts for the combined influence of emergency factors on the physical properties of acoustic waves and integrates the time and amplitude characteristics of the reflected signal within a unified optimization procedure. An algorithm for determining the environment configuration is proposed, which implements sector-based space zoning, multichannel sensor interrogation, correction of environmental parameters, formation of corrected distances, and inter-sector coordination of results. The scientific novelty lies in the formalization of the combined influence of emergency factors on acoustic signal parameters within a unified mathematical model of orientation. The practical significance of the obtained results lies in creating a theoretical basis for the development of a wearable acoustic orientation system for rescuers under conditions of poor visual control.

Keywords: acoustic orientation method, poor visual control, mathematical model, acoustic waves

References

1. State Emergency Service of Ukraine. (n.d.). Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2025. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf>

2. Slater, A. E., Ferris, S., Dixon, J. A., Renshaw, C., Moore, T. E., Frady, G., Harrison, S. J. (2025). Navigating in zero-visibility: A haptic guidance system for improving egress and situation awareness of professional firefighters. *Human Factors*, 67(11), 1152–1169. doi: 10.1177/00187208251348020

3. Tao, Y., Yu, H., Song, W., Song, X., Zhang, J. (2025). Dynamic analysis of firefighter movement in single-file experiment at different visibility levels. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 673, 130716. doi: 10.1016/j.physa.2025.130716

4. Bas, O., Lahno, D., Nozhko, I., Pelypenko, M. (2021). Vykorystannia ultrazvuku dlia oriientuvannia u zadymnomu seredovyshchi. *Nadzvychni sytuatsii: Poperedzhennia ta likvidatsiia*, 5(1), 15–26. doi: 10.31731/2524-2636.2021.5.1.-15-26

5. Muhammad, S., Adeel, H., Khattak, T. S., Rao, I. R., Hayat, S. (2024). Assessing the fidelity of ultrasonic distance sensors in a fire-and-smoke environment. *Asian Journal of Science, Engineering and Technology*, 3(1), 135–150. doi: 10.47264/idea.ajset/3.1.9
6. Lushch, V. I., Voitovych, D. P., Lazarenko, O. V., Shtanhret, N. O. (2019). Rozroblennia metodyky otsinky parametriv pozhezhnykh teplovizoriv. *Pozhezhna bezpeka*, 35, 41–48. doi: 10.32447/20786662.35.2019.07
7. Statyvka, Ye. S. (2022). Vyznachennia koryhuiuchykh koefitsientiv parametriv akustychnoho prystroiu systemy oriientuvannia pry avariino-riatuvalnykh robotakh. In *Problemy pozhezhnoi bezpeky 2022: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Kharkiv, Ukraine, 227.
8. Loboichenko, V., Wilk-Jakubowski, J. L., Levterov, A., Wilk-Jakubowski, G., Statyvka, Y., Shevchenko, O. (2024). Using the burning of polymer compounds to determine the applicability of the acoustic method in fire extinguishing. *Polymers*, 16(23), 3413. doi: 10.3390/polym16233413
9. Slongo, J. S., Gund, J., Passarin, T. A. R., Pipa, D. R., Ramos, J. E., Arruda, L. V., Junior, F. N. (2022). Effects of thermal gradients in high-temperature ultrasonic non-destructive tests. *Sensors*, 22(7), 2799. doi: 10.3390/s22072799
10. van den Wildenberg, S., Jia, X., Roche, O. (2020). Acoustic probing of the particle concentration in turbulent granular suspensions in air. *Scientific Reports*, 10, 16544. doi: 10.1038/s41598-020-73427-z
11. Shang, F., Sun, B., Zhang, H. (2023). Measurement of air layer thickness under multi-angle incidence conditions based on ultrasonic resonance reflection theory for flange fasteners. *Applied Sciences*, 13(10), 6057. doi: 10.3390/app13106057
12. Tarau, C., Ötügen, M. V. (2002). Propagation of acoustic waves through regions of non-uniform temperature. *International Journal of Aeroacoustics*, 1(2), 165–181. doi: 10.1260/147547202760236950
13. Sánchez-Dehesa, J., Angelov, M. I., Cervera, F., Cai, L.-W. (2009). Sound control by temperature gradients. *Applied Physics Letters*, 95(20), 204102. doi: 10.1063/1.3263949
14. Epstein, P. S., Carhart, R. R. (1953). The absorption of sound in suspensions and emulsions. I. Water fog in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(3), 553–565. doi: 10.1121/1.1907107
15. Morfey, C. L. (1968). Sound attenuation by small particles in a fluid. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1), 156–170. doi: 10.1016/0022-460X(68)90202-2
16. Rathod, V. T., et al. (2020). A review of acoustic impedance matching techniques for piezoelectric sensors and transducers. *Sensors*, 20(14), 4051. doi: 10.3390/s20144051
17. Darmon, M., Dorval, V., Baqué, F. (2020). Acoustic scattering models from rough surfaces: A brief review and recent advances. *Applied Sciences*, 10(22), 8305. doi: 10.3390/app10228305

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026