

АКУСТИЧНА ЗАХИЩЕНІСТЬ ВИДІЛЕНИХ ПРИМІЩЕНЬ У СВІТЛІ СТАТИСТИЧНОЇ ТА ХВИЛЬОВОЇ ТЕОРІЙ

© Галина Кеньо, Володимир Хома

Коротко викладено суть статистичної та хвильової теорій поширення звукових хвиль. Показано переваги хвильової теорії при розрахунку основних параметрів акустичного поля та перспективи застосування сучасних систем фізико-технічного моделювання для оцінки захищеності виділених приміщень.

The essence of statistical and wave theories of sound-waves distribution is shortly expounded. The wave theory advantages for calculating the acoustic field basic parameters are described. Also application prospect of the modern physicotchnical simulation systems for the estimation of the security protected workrooms is accentuated.

Вступ

Мовлення є природним способом спілкування людей і неодмінно супроводжує процес їх діяльності. Часом мовлення використовують в обміні конфіденційною інформацією. У зв'язку із наявністю високоефективних технічних засобів підслуховування розмов актуальним є розроблення і застосування адекватних заходів захисту мовної інформації від витоку технічними каналами [1-4].

Найчастіше обмін конфіденційною інформацією відбувається у закритих приміщеннях, де акустичні хвилі поширюються заповнюючи увесь його простір. Приміщення істотно впливає на процес поширення звукових хвиль через багаторазові відбиття звукових хвиль від меж приміщення (стін, стелі і підлоги), а також від предметів інтер'єру. На відміну від відкритого простору структура акустичного поля у приміщенні є складною і залежить не лише від джерела звуку, але також від геометричних розмірів і форми приміщення, властивості стін, дверей, вікон відбивати та поглинати акустичну енергію [5, 6].

Акустичне поле у кожній його точці визначається зміною параметрів звукової хвилі, яка є носієм інформації, а отже може поширюватися за межі приміщення, перехоплюватися та оброблятися засобами технічної розвідки. Захист мовної інформації від витоку є досить складним та дорогим заходом. Багато організацій для ведення конфіденційних розмов обладнують спеціальні виділені приміщення, що забезпечують гарантований рівень захисту мовної інформації [7]. З метою документального підтвердження захищеності виділених приміщень проводять спеціальні інструментальні вимірювання рівня небезпечних сигналів у можливих технічних каналах витоку мовної інформації. За відсутності спеціальної контрольно-вимірювальної апаратури або задля оперативного оцінювання рівня захищеності приміщення застосовують спеціальні методики розрахунку. Підвищення точності таких розрахунків є актуальним завданням інформаційної безпеки, вирішення якого може підвищити достовірність результатів оцінки акустичної захищеності виділених приміщень, виявити вразливості та удосконалити методики інструментального контролю, а на етапі організації виділених приміщень – виробити рекомендації щодо розташування елементів інтер'єру, в тому числі засобів передавання та оброблення інформації.

Статистична теорія та її застосування до акустичного розрахунку приміщень

Для акустичного розрахунку приміщень, зокрема і у сфері інформаційної безпеки користуються статистичною теорією реверберації, розробленою У.Себіном, Ф.Ейрінгом та їх

послідовниками [8, 9]. В основу цієї теорії покладено модель ідеального приміщення, за якою акустичне поле після припинення дії джерела звуку розраховується на основі статистичного опису процесу згасання звукових хвиль. При цьому припускається, що амплітуди і фази відбитих звукових хвиль розподілені хаотично, тобто у хвильовому русі немає переважаючих напрямків потоків і симетрії в розподілі амплітуд, тобто акустичне поле є дифузним. Крім того вважається, що звукова енергія поглинається межами приміщення безперервно [5, 6].

Статистична теорія дає змогу обчислити енергетичні властивості дифузного акустичного поля з урахуванням часткового поглинання звукових хвиль у приміщенні. Якщо у приміщенні джерело звуку з акустичною потужністю P_a створює дифузне звукове поле, то за законом збереження енергії зміна звукової енергії буде визначатись різницею енергій випроміненої джерелом та поглинутої стінками:

$$E(t) = \frac{4 \cdot P_a \cdot V}{c \cdot \alpha \cdot S} \left[1 - \exp \left(\frac{c \cdot S \cdot \ln(1 - \alpha)}{4 \cdot V} \cdot t \right) \right], \quad (1)$$

де c – швидкість поширення звуку в повітряному середовищі; $S = \sum_i S_i$ – площа меж приміщення;

S_i – площа i -тої межі; V – об'єм приміщення; α – середній коефіцієнт поглинання.

Потрапляючи на межі приміщення енергія звукових хвиль частково поглинаються. У приміщенні обмеженому однорідною за своїми властивостями поверхнею, питомий коефіцієнт поглинання α визначається відношенням поглинутої поверхнею енергії до енергії звукових хвиль, що падають на неї. Коефіцієнт поглинання α залежить не лише від фізичної природи покриття меж приміщення, а також від частоти звуку. Якщо межі приміщення мають різні питомі коефіцієнти поглинання $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$, а площі цих меж – $S_1, S_2, S_3, \dots$, то загальне поглинання визначається сумою

$$A = \sum_i \alpha_i S_i, \quad (2)$$

причому середній коефіцієнт поглинання дорівнюватиме:

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot S_i}{\sum_i S_i}. \quad (3)$$

Отже коефіцієнт поглинання $\alpha=1$ характеризує поверхню площею 1 м^2 із повним поглинанням енергії звуку.

Із виразу (1) можна визначити акустичну енергію в усталеному режимі, коли втрати енергії зумовлені поглинанням повністю компенсуються енергією, що надходить від джерела звуку

$$E_0 = \frac{4 \cdot P_a \cdot V}{c \cdot \alpha \cdot S}. \quad (4)$$

та час реверберації (тривалість перехідного процесу – зниження рівня звукової енергії на 60 дБ)

$$T = -\frac{0,16V}{S \ln(1 - \alpha)}. \quad (5)$$

Крім того у рамках статистичної теорії є можливість розрахувати основні акустичні характеристики приміщення:

- акустичне співвідношення, за яким оцінюється вплив приміщення на сприйняття звуку;
- коефіцієнт чіткості, який дає змогу оцінити погіршення розбірливості мови, через створення ревербераційним сигналом перешкоджаючого фону.

Стандартний час реверберації характеризує зміну густини енергії дифузного поля в приміщенні в цілому. Однак дифузними можна вважати лише сукупність відбитих хвиль, крім яких є ще і прямі. Акустичне співвідношення приміщення R є характеристикою дифузного поля в приміщенні і визначається відношенням густини енергій відбитого і прямого звуку та залежить від розташування джерела та приймача. Якщо джерело звуку створює сферичні хвилі, акустичне співвідношення дорівнює

$$R = \frac{4\pi r^2(1-\alpha)}{A}, \quad (6)$$

де r – відстань від джерела до точки приймання.

Акустичне співвідношення зростає у міру віддалення від джерела і залежить від направленості випромінювання. Відстань, за якої $R=1$, називається радіусом лункості. Внутрішній простір сфери із радіусом лункості є зоною, в якій вплив приміщення є незначним.

Ревербераційний сигнал є неоднорідним, а повний час після звучання ділять на дві частини:

- 1) проміжок до 50 мкс (корисна складова ревербераційного сигналу), коли ефект реверберації створює відчуття чіткості звуку;
- 2) інтервал часу понад 50 мкс, упродовж якого наступні звукові сигнали сприймаються на тлі попередніх ревербераційних, причому цей фон є завадою, що погіршує розбірливість.

Якість звучання в окремих точках приміщення може бути різною. Для кількісного оцінювання цієї величини використовують коефіцієнт чіткості, що визначається відношенням середньої густини енергії корисної частини ревербераційного сигналу до середньої густини енергії повного сигналу реверберації:

$$D = \frac{\frac{1}{50} \int_0^{50} E(t) dt}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt}. \quad (7)$$

Чим меншим є значення коефіцієнта чіткості D , тим гірша якість сприйняття звуку. Допустимі значення коефіцієнта чіткості знаходяться в межах від 70 до 30%.

Важливою кількісною характеристикою дифузійного поля в приміщенні є індекс дифузності, який визначають експериментально в певних точках приміщення за різними напрямками:

$$i_d = 1 - \frac{m}{m_0}, \quad (8)$$

де m_0 – відносне відхилення інтенсивності поля від середнього, виміряне в ревербераційній камері, тобто у приміщенні з заглушеними стінками; $m = \frac{\Delta I_{cp}}{I_{cp}}$ – відносне відхилення інтенсивності, усереднене за всіма напрямками.

За повної заглушеності приміщення ($m=m_0$) індекс дифузності дорівнює 0, і навпаки, якщо $m=0$, то індекс дорівнює 1 і поле є абсолютно дифузним.

Статистична теорія реверберації набула найбільшого поширення для акустичних розрахунків великих приміщень - аудиторій і залів. За певного досвіду та інтуїції цю теорію можна застосувати для оцінювання акустичних властивостей невеликих приміщень, зокрема у сфері захисту інформації. При цьому часто спостерігаються численні невідповідності між висновками статистичної теорії та результатами вимірювань.

Найчастіше приміщення, які підлягають захисту є невеликими і мають правильну (прямокутну) форму, тому статистичні формули непридатні для переважної більшості практично важливої ділянки частот. В окремих випадках, наприклад у малих приміщеннях за низьких частот, похибки можуть сягати декількох сотень відсотків. Часто звукові хвилі розподіляються не за випадковими напрямками і не рівномірно по об'єму приміщення. Невеликі неправильності і різкі злами призводять до спотворення ходу згасання звуку, його величина є різною в різних місцях приміщення. Важливою є залежність поглинання звуку акустичним матеріалом як від площі, так і від розташування у приміщенні. Коефіцієнти поглинання матеріалів стінок часто виявляються різними у різних приміщеннях і на різних частотах. Хоча у статистичній теорії враховується енергія прямих хвиль, однак її використання не дозволяє розрахувати реальні зміни параметрів звукової хвилі, які можуть реєструватись відповідними приладами і створювати канали витоку інформації.

Важко врахувати наявність у реальних приміщеннях, що підлягають захисту різних предметів, комунікацій, отворів, шпарин та інших неідеальностей. Оскільки кількісні значення коефіцієнтів поглинання, відбивання та проникнення носять статистичний характер, то в теорії не враховуються властивості матеріалів конструкцій, що утворюють виділені приміщення та предметів, що їх наповнюють. Таким чином, статистичні методи придатні тільки тоді, коли всі ознаки симетрії повністю зникають, тобто коли єдиним параметром, що характеризує процес, є його енергія, тобто тоді, коли процес є ергодичним.

Більшість проблем акустики приміщень можуть вирішитись лише з урахуванням хвильової природи звуку.

Хвильова теорія

Основні положення хвильової теорії розроблені Ф.Морзом, Р.Болтом, Й.Дрейзенем та іншими [10, 11], хоча експериментальні дослідження акустики приміщень із урахуванням хвильової природи звуку проводилися задовго до цього. Ідеї, покладені в основу хвильової теорії, вперше були висловлені Дж.В.Стреттом який подав необхідний математичний апарат із посиланням на розв'язок хвильового рівняння для тривимірного простору [12]. В.Кнудсен вперше експериментально виявив, що звуки реверберації мають не частоту джерела звуку, що збудив ревербераційне явище, а частоти власних коливань приміщення [13].

У теорії хвильової акустики виділяються три основні питання: взаємодія між звуковою хвилею і межами – стінками приміщення, стаціонарний (усталений) звуковий режим у приміщенні і характер процесів установаження, зокрема реверберації. У рамках цієї теорії приміщення розглядається як об'ємний резонатор із великою кількістю власних (резонансних) частот, а акустичні процеси в ньому – як збудження власних коливань, їх встановлення і поступове спадання після вимикання джерела збудження [14].

У результаті багаторазового відбивання звукових хвиль від меж приміщення виникає замкнуте тривимірне звукове поле. Замкнений об'єм являє собою коливальну систему зі спектром власних частот, при цьому кожній власній частоті відповідає свій декремент згасання. Якщо джерело звуку створює звукові сигнали зі спектральним та амплітудним розподілом, що змінюється в часі, то ці сигнали збуджують коливання повітря з частотами, близькими до резонансних, у міру зміни спектра виникають все нові та нові моди власних коливань замкнутого об'єму, які, накладаючись на ті, що виникли раніше, і будучи вищими за поріг чутності, до певної міри спотворюють первинний сигнал. Оскільки декремент згасання складових спектра частот є різним, то кожна із складових частот має свій час реверберації. Таким чином, явище відгону зумовлюється не залишковим коливальним процесом, спричиненим дією зовнішнього джерела звуку, а є згасальним коливанням повітряного об'єму із власними частотами приміщення. Залежно від форми приміщення в замкнутому об'ємі виникають власні коливання з різним набором власних частот у вигляді плоских, циліндричних або сферичних хвиль. Оскільки приміщення, що підлягають захисту, зазвичай мають форму прямокутного паралелепіпеда, то слід розглядати фундаментальні функції та резонансні частоти прямокутного об'єму.

Якщо звукові коливання гармонічні в часі, для яких всі величини, що їх характеризують, змінюються з часом за законом $p_a(t) = p_m \cos(j\omega t)$, де ω – кругова частота, то хвильовий процес у повітряному середовищі закритого приміщення описується хвильовим рівнянням Гельмгольца:

$$\Delta p_a + \frac{\omega^2}{c^2} p_a = 0, \quad (9)$$

де $p_a(t)$ – змінний тиск акустичної хвилі; c – швидкість звуку в середовищі.

Це рівняння може розглядатись як основа задачі визначення власних значень у відповідних граничних задачах або як основа аналізу звукового поля із заданою частотою. За припущення, що межі приміщення є ідеально твердими (відбивають звук без поглинання) і що згасанням звуку в середовищі можна знехтувати, граничні умови рівняння Гельмгольца записуються

$$-\frac{\partial^2 p_a}{\partial x^2} \Big|_{x=0}^{x=l_x} = 0; \quad -\frac{\partial^2 p_a}{\partial y^2} \Big|_{y=0}^{y=l_y} = 0; \quad -\frac{\partial^2 p_a}{\partial z^2} \Big|_{z=0}^{z=l_z} = 0, \quad (10)$$

де l_x, l_y, l_z – лінійні розміри прямокутного приміщення.

Розв'язками такого рівняння будуть частинні розв'язки виду:

$$p_{amnp} = A_{mnp} \cos \frac{m\pi x}{l_x} \cos \frac{n\pi y}{l_y} \cos \frac{p\pi z}{l_z}.$$

Таким чином, у прямокутному приміщенні, обмеженому ідеально твердими стінками, існує дискретний спектр резонансних частот, що визначається виразом:

$$\frac{\omega_{mnp}}{2\pi} = f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{l_x^2} + \frac{n^2}{l_y^2} + \frac{p^2}{l_z^2}}. \quad (11)$$

Комбінаціям цілочислових параметрів m, n і p (причому в часткових випадках один або два з них можуть мати значення нуль) відповідає певна власна частота приміщення.

Всі моди вільних коливань закритого об'єму можна поділити на три групи: осьові, дотичні і косі. Якщо два із параметрів (наприклад n і p) дорівнюють нулю, то розв'язок рівняння (9) дає плоску стоячу хвилю, яка називається осьовою, вектор коливальної швидкості якої спрямований паралельно до ребер приміщення. Якщо один з цілочислових параметрів набуває нульового значення, то стоячі хвилі називаються дотичними, а вектор коливальної швидкості спрямований паралельно стінам приміщення. Осьові хвилі відбиваються тільки від одної пари стінок, тоді як дотичні відбиваються від двох пар стінок. Стоячі хвилі з частотами, для яких жоден із параметрів m, n і p не дорівнює нулю, мають вектор швидкості з трьома відмінними від нуля компонентами. Такі хвилі називаються косими і відбиваються від всіх стінок приміщення.

В розподілі власних частот прямокутного приміщення можна спостерігати такі особливості: по-перше, спектр власних частот зі збільшенням частоти стає щільнішим; по-друге, деякі власні частоти є виродженими, тобто одній частоті відповідають декілька мод коливань. Загальна кількість мод коливань прямокутного приміщення для частот менших за f , виражається сумою всіх частот:

$$N = \frac{Lf}{8c} + \frac{\pi S}{4c^2} f^2 + \frac{4\pi V}{3c^3} f^3, \quad (12)$$

де $L = l_x + l_y + l_z$, S – загальна площа поверхонь, V – об'єм приміщення.

Кількість власних частот прямокутного приміщення, що лежать в інтервалі частот від f до $f + \Delta f$, дорівнює:

$$\Delta N = \left(\frac{L}{8c} + \frac{\pi S}{2c^2} f + \frac{4\pi V}{c^3} f^2 \right) \Delta f. \quad (13)$$

Цей вираз показує, що спектр власних частот приміщення дуже швидко ущільнюється із збільшенням частоти; якщо в ділянці низьких частот ($f \cong \frac{c}{3\sqrt{V}}$) власні частоти відокремлені одна

від одної різними інтервалами, то в ділянці середніх частот, не кажучи вже про високі, на частотний інтервал порядку декількох герц припадає багато власних частот, дуже близьких одна до одної, причому більшість з них відповідає косим хвилям.

Таким чином, яким би не був спектральний склад звуку, що випромінюється джерелом у приміщеннях, серед власних частот приміщення обов'язково знайдуться такі або дуже близькі до них компоненти, які збуджуватимуться джерелом та резонуватимуть. У процесі реверберації коливання цих частот будуть згасати, даючи залишкове звучання з таким приблизно спектральним складом, який був у стаціонарному режимі заданий джерелом звуку. Висока щільність спектра власних частот приміщень великих розмірів є необхідною (проте не достатньою) умовою прийнятності статистичного трактування процесу реверберації.

Хвильова теорія показує, що коефіцієнт поглинання поверхні залежить як від фізичних властивостей природи її матеріалу, так і від типу хвилі. Коефіцієнт поглинання не є однозначною характеристикою акустичних властивостей поверхні стінки. Більш фундаментальною кількісною характеристикою поверхні є її акустичний імпеданс Z . Ця комплексна величина визначається як відношення звукового тиску біля поверхні межі до нормальної складової швидкості повітря у безпосередній близькості від поверхні. В обох випадках кажуть про малий акустичний імпеданс за м'якої (податливої) стінки і про великий акустичний імпеданс за твердої (жорсткої) стінки. Якщо імпеданс має тільки дійсну складову, то стінка поглинає звукову енергію, а чисто реактивний імпеданс означає, що при відбиванні хвилі стрибком змінюється її фаза.

Щоб врахувати поглинання звукової енергії стінами приміщення, в рівнянні Гельмгольца потрібно задати граничні умови, в яких враховується комплексний імпеданс меж:

$$n \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p_a \right) + \frac{j\omega}{Z} p_a = 0. \quad (14)$$

де ρ_0 – рівноважна густина середовища за відсутності хвилі.

Якщо припустити, що на кожній грані паралелепіпеда поверхня однорідна, але провідність (податливість) $\sigma = 1/Z$ змінюється від однієї грані до іншої, то розв'язок рівняння (14) за таких граничних умов для різного типу хвиль буде різним.

У випадку осьових хвиль кожна стіна буде вносити свій внесок у коефіцієнт поглинання, який пропорційний повній провідності стіни. Однак, за однакових провідностей ті стіни приміщення, по яких хвилі ковзають, менше поглинають звукову енергію порівняно з тими, на які хвильовий фронт набігає прямо. Ефективність поглинання для тангенціальних хвиль окремими поверхнями прямокутного приміщення залежить від орієнтації хвильового вектора щодо поверхні стіни. Ті поверхні, нормаль до яких складає кут 90° з хвильовим вектором, поглинатимуть акустичну енергію вдвічі менше, ніж інші. І лише для косих хвиль коефіцієнт дифузного поглинання поверхні однозначно пов'язаний з її активною провідністю простим співвідношенням:

$$\alpha = 8\rho c \frac{\sum \sigma_i S_i}{S}. \quad (15)$$

Отримані результати показують передусім, що в полі дотичних і осьових хвиль не існує певного зв'язку між коефіцієнтом поглинання і активною провідністю поверхні. Іншими словами, коефіцієнт дифузного поглинання поверхні, яким оперує статистична теорія реверберації, є величиною, що не має однозначного змісту. Залежно від типу стоячих хвиль, що збуджуються в закритому приміщенні, та від місця розташування досліджуваної поверхні, в результаті вимірювань можна одержати різні значення α . За наявності лише косих хвиль, коли звукове поле у приміщенні задовольняє умові ергодичності, коефіцієнт дифузного поглинання може бути однозначно пов'язаний з фізичними характеристиками поглинальної поверхні, тобто із складовими її акустичного опору.

Якщо відомий повний коефіцієнт поглинання $\bar{\alpha}_{mnp}$ для того чи іншого типу хвиль, то за хвильовою теорією можна розрахувати час реверберації. За наявності поглинання густина енергії звукового поля зменшується за законом:

$$E_{mnp} = E_0 \exp(-2\delta_{mnp}t), \quad (16)$$

де δ_{mnp} – декремент згасання окремої звукової хвилі.

Із рівняння (16) можна визначити так званий стандартний час реверберації, що відповідає згасанню 60 дБ:

$$60 = 10 \lg \frac{E_0}{E_{mnp}} = 20\delta_{mnp}t \lg e = 4,34 \cdot 2\delta_{mnp}t. \quad (17)$$

Отже, із урахуванням декремента згасання

$$2\delta_{mnp} = \bar{\alpha}_{mnp} \frac{c \sum S}{4V}, \quad (18)$$

стандартний час реверберації становить

$$T = \frac{60 \cdot 4V}{4,34 \cdot c \bar{\alpha}_{mnp} \sum S} = \frac{0,162 \cdot 4V}{\bar{\alpha}_{mnp} \sum S}. \quad (19)$$

Час реверберації для різних типів стоячих хвиль буде різний через відмінність коефіцієнтів поглинання у наведеному виразі. Якщо межі приміщення однаково поглинають енергію, тобто провідності всіх стінок є приблизно однаковими, то згасання буде найбільшим для косих хвиль. Менше згасання властиве дотичним і осьовим хвилям. Випадок косих хвиль відповідає дифузному полю, а формула часу реверберації для цих хвиль збігається із класичною формулою Себіна (5).

За низьких частот, де незначна зміна частоти може викликати резонанси на сусідніх формах коливань, спостерігається різка зміна часу реверберації для різних частот. На середніх частотах крива рівня інтенсивності може мати злами і відхилення від прямої; спочатку крива спадає швидко, що є результатом впливу осьових хвиль. На високих частотах, коли щільність спектру висока і переважаюча роль у згасанні належить косим стоячим хвилям, згасання звуку в широкому діапазоні рівнів (~30 дБ) має логарифмічний характер.

З хвильової теорії випливає, що у приміщеннях прямокутної форми з гладкими стінками звук не є статистично дифузним. Після припинення дії джерела звуку у приміщенні спостерігаються лише власні коливання, які згасають в міру поглинання енергії. Для низьких частот, тобто за довжин хвиль сумірних із розмірами приміщення, відстань між резонансними частотами є великою, сила звуку на цих частотах істотно змінюється з частотою. Вона є великою при резонансі і малою, коли частота, що збуджує коливання, не збігається із жодною із резонансних частот. Гранична частота, нижче якої окремі стоячі хвилі можуть бути збуджені незалежно одна від одної визначається рівнянням (11). За середніх і високих частот (від 200 до 5000 Гц) у приміщеннях звичайного розміру резонансні частоти так щільно розташовані одна від одної, що одне джерело звуку може викликати декілька стоячих хвиль з майже однаковими амплітудами. У такому випадку для розрахунку можна користуватись статистичними методами.

Наявність податливої межі, наприклад, вікна, суттєво спотворює форму стоячої хвилі в приміщенні, а поглинання межі, протилежної до податливої, є не адитивним. У деяких випадках тиск на податливій межі має більшу амплітуду, ніж біля протилежної жорсткої і залежить від імпедансу податливої межі. Згасання акустичних хвиль залежить від акустичного імпедансу межі. Найбільше згасання властиве косим хвилям, найменше – осьовим. Згасання тангенціальних і осьових коливань крім того залежить від розмірів приміщення. Розташування всього поглинального матеріалу на одній тільки стінці прямокутного приміщення не дає повного його використання, оскільки осьові та тангенціальні коливання слабо ним поглинаються.

Сутністю реверберації є не багаторазові відбивання звукових хвиль у приміщенні, а поступово згасаючі власні коливання об'ємного резонатора. Час реверберації є різним для різних типів хвиль і залежить від розмірів приміщення, поглинальних властивостей стін приміщення та місця їх розташування.

Висновки

Статистична та хвильова теорії акустики приміщень доповнюють одна одну, проте, хвильова теорія є точнішою і дає достовірніші результати, хоча математичні моделі акустики приміщень є громіздкими. Сучасні системи фізико-технічного моделювання такі як Femlab і COMSOL Multiphysics дозволяють розраховувати акустичні властивості приміщень за цією теорією, у тому числі і у сфері захисту інформації.

Окрім можливості визначення резонансних частот приміщення, часу реверберації з урахуванням поглинання звукових хвиль різними поверхнями, за допомогою хвильової теорії можна досліджувати стаціонарні та динамічні процеси в приміщеннях, тобто розраховувати розподіл акустичного поля у просторі.

Таким чином, хвильова теорія дозволяє розраховувати фізичні та енергетичні показники акустичного поля та їх зміни залежно від особливостей приміщення, які внаслідок різного роду перетворень можуть бути вимірними, зареєстрованими та записаними контрольно-вимірною апаратурою або засобами акустичної розвідки. Крім зазначеного, хвильову теорію можна застосувати для розрахунку проникнення енергії крізь поверхні та поширення акустичних хвиль у твердих середовищах, що є важливим для оцінювання віброакустичних каналів витоку інформації.

Література

1. Халятин Д.Б. *Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь!* – М. НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.
2. А.А. Торокин. *Инженерно-техническая защита информации* – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 960 с.
3. *Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов/ Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под. ред. А.П. Зайцева, А.А. Шелупанова.* – М.б ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
4. Хорошко В.А., Чекатков А.А. *Методи й засоби захисту інформації (за редакцією Ковтанюка) К.: Видавництво Юніор, 2003 р. – 504 с.*
5. Лепендин Л.Ф. *Акустика.* – М. «Высшая школа», 1978 – 448 с.
6. Фурдуев Б.Б. *Электроакустика.* – М. 1947 – 512 с.
7. Столяров Н.В. *Защита акустической информации при проведении совещаний.* <http://www.bre.ru/security/>.
8. Wallace Clement Sabine, *Collected Papers on Acoustics* (New York: Dover Publications, 1964) [first published by Harvard University Press, 1922].
9. C.F. Eyring, *Reverberation time in «dead» rooms*, *J. Acous. Soc. Am.* 1, 217 – 241. (1930).
10. Морз Ф., Болт Р. *Звуковые волны в помещениях . Успехи физических наук. Т. XXXII, 1947, вып.2, с.185-238; вып.3, с.333–375; вып.4, с.417-463.*
11. Дрейзен И.Г. *Курс электроакустики.* – М.: Связьиздат. 1940. – 291 с.
12. Дж. В. Стрэтт (Лорд Рэлей). *Теория звука. пер. с англ. в 2-х томах. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1940. – т. 1 – 500 с., т. 2 – 476 с.*
13. Верн О. Кнудсен . *Современное развитие архитектурной акустики . Успехи физических наук. Т. XIV, 1934, вып. 7 с.857-893.*
14. Ефимов А.П. *Три взгляда на акустику помещений.* <http://www.acoustic.ua/>.