

Абракітов В.Э. Аналоговое та квазіаналогове моделювання процесів розповсюдження звуку в просторі для прогнозування шумового режиму на об'єкті, що захищається. Друге видання, перероблене та доповнене. — Харків: , 2007. — 108 с.: іл. — Бібліогр.



ПЕРЕДМОВА

Перше видання цієї книги вийшло в світ в 1997 р [1, 2]. На той період це була майже єдина книга, цілісна й самостійна окрема наукова робота, присвячена саме проблемі аналогового та квазіаналогового моделювання акустичних процесів. Не дивно, що за тією причиною вона визвала широке зацікавлення фахівців.

За 10 років, що пройшли з тих часів, наука зробила великий крок уперед. Йдучи назустріч побажанням читачів, враховуючи їхню зацікавленість первісно піднятою темою, бажаючи поділитися накопиченим досвідом та новими набутими відомостями, автор не просто перевидав існуючий текст десятирічної давнини із тодішніми ілюстраціями (з перекладом на державну мову), а ще й дуже критично переглянув його, вніс великі й значні зміни, доповнивши старі дані даними новітніх власних наукових досліджень. Обсяг матеріалу, що вийшов до другого видання, збільшений більш, ніж в три рази в порівнянні із першим виданням, що свідчить про майже повну переробку вже існуючої книги, та створення на її основі принципово нового наукового твору: із врахуванням чисельних інновацій в освітлюваній автором галузі, повністю на сучасному науковому рівні.

Прогнозування й оцінка шумового режиму на об'єкті, що, захищається — наприклад, робочому місці промислового підприємства, у контрольній точці селитьби міста й ін., є актуальним завданням. Кількісна і якісна оцінка поширення шуму, вивчення закономірностей цього поширення в складних умовах, з урахуванням безлічі супутніх факторів і хвильових явищ, що неминуче проявляються при тому (інтерференція, дифракція й ін.), може бути отримана шляхом побудови моделей, що базуються на аналогії акустичних й оптичних процесів. Ця аналогія була виявлена автором у результаті досліджень.

1. Різновиди моделювання та їх застосування в акустиці

1.1. Загальні відомості

При дослідженні шумового режиму найрізноманітніших об'єктів міського господарства, де людина піддається впливу шуму, а також при дослідженні шляхів його оптимізації, розробці шумозахисних заходів, визначенні їхньої ефективності та ін., важливо мати інформацію про кількісні і якісні характеристики акустичних процесів, що відбуваються [3].

Разом з тим натурні дослідження звукового поля, зокрема, виміри акустичної ефективності шумозахисних заходів і засобів, можуть бути здійснені тільки на вже реально існуючому об'єкті. У той же час практично за всіма відомими критеріями зручніше й вигідніше передбачати (проекувати, конструювати) шумозахисні заходи й засоби на стадії проектування або реконструкції цього об'єкта, щоб мати змогу підбирати різні заходи й засоби, варіювати їхніми параметрами й т.п. Тому на стадії проектування або реконструкції будь-якого об'єкта міського господарства дослідження процесів поширення звукових хвиль (шуму) для вдосконалення умов акустичної безпеки в процесі життєдіяльності людини можна здійснити тільки шляхом моделювання [4].

Роль моделювання при вивченні шкідливого впливу об'єктів техніки на людину, принципи й варіанти побудови моделей таких об'єктів розглянуті в роботі [5, с.20], де прямо зазначено: «Использование визуальных моделей позволяет представить разработчику эффективных технических решений все факторы в их взаимосвязи, влияющие на экологическое равновесие... В связи с этим требуется максимальный охват моделированием всех объектов, задач и проблем.»

Моделювання, у т.ч. аналогове, може бути застосоване при вирішенні наступних завдань охорони праці [6]:

- прогнозування, картографування, оцінки шумового режиму на об'єкті, що захищається;
- вивчення шляхів оптимізації шумового режиму на об'єкті, що захищається, шляхом підбору різних варіантів шумозахисних заходів і засобів, їхніх конструктивних параметрів;
- розробка вдосконалених конструкцій засобів боротьби із шумом та ін.

Завдання аналізу та прогнозування шумового режиму практично на будь-якому об'єкті, у т.ч. завдання оцінки ефективності шумозахисних заходів та засобів, може бути зведено до побудови моделі, що відповідним чином відбиває поведінку натурального об'єкту (та натурних явищ та процесів, що характерні для нього).

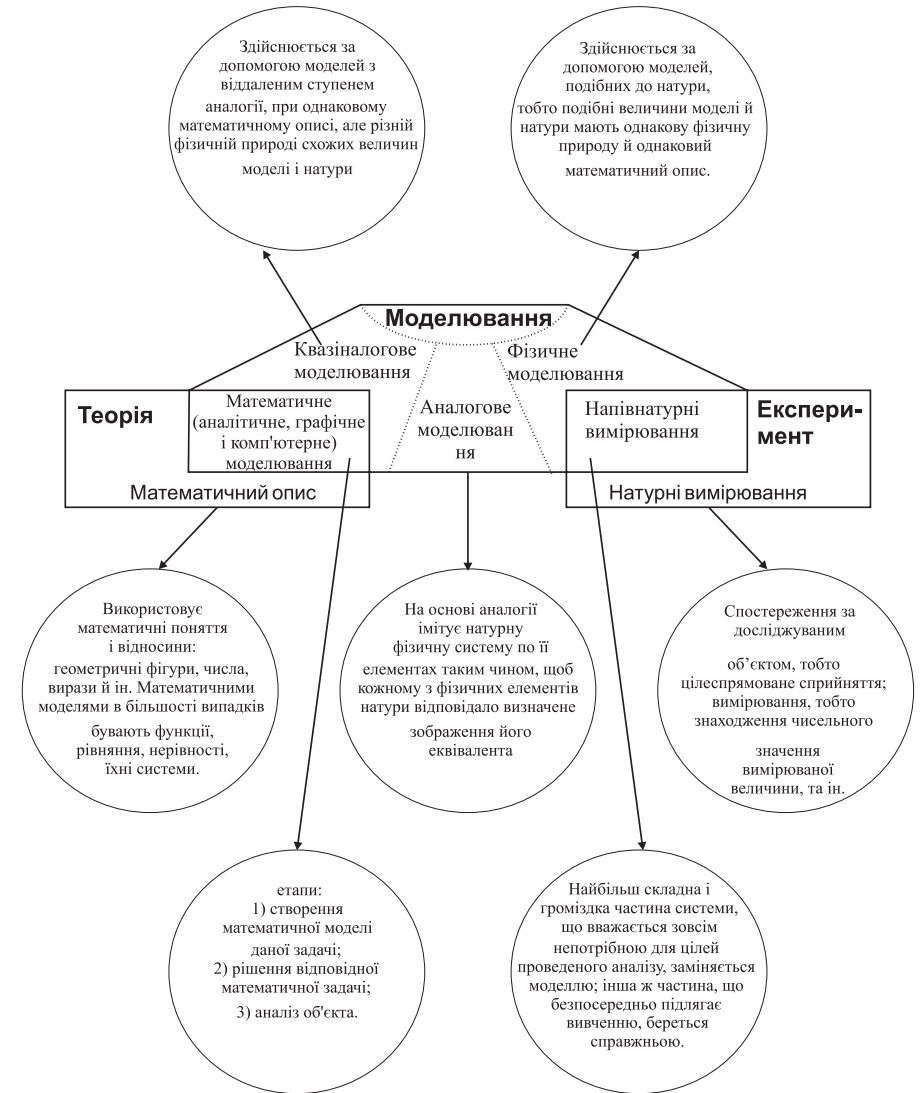


Рис. 1.1. Моделі, — як метод наукового пізнання, та їхні різновиди.

Найбільш сприятливі умови для вирішення таких завдань створюють експерименти з використанням аналогового моделювання як одного з найбільш ефективних і економічних методів дослідження, що дозволяє проводити їх в умовах, максимально наближених до реальних. Достоїнство експериментальних досліджень на моделях — здійснення фізичних спостере-

жень на основі ідеальних умов, що неможливо забезпечити в природі. Не слід забувати, що мова йде про складні дифракційні процеси на території міської забудови, де будинки, дерева, рельєф місцевості викликають несподівані ефекти, що важко піддаються математичному опису.

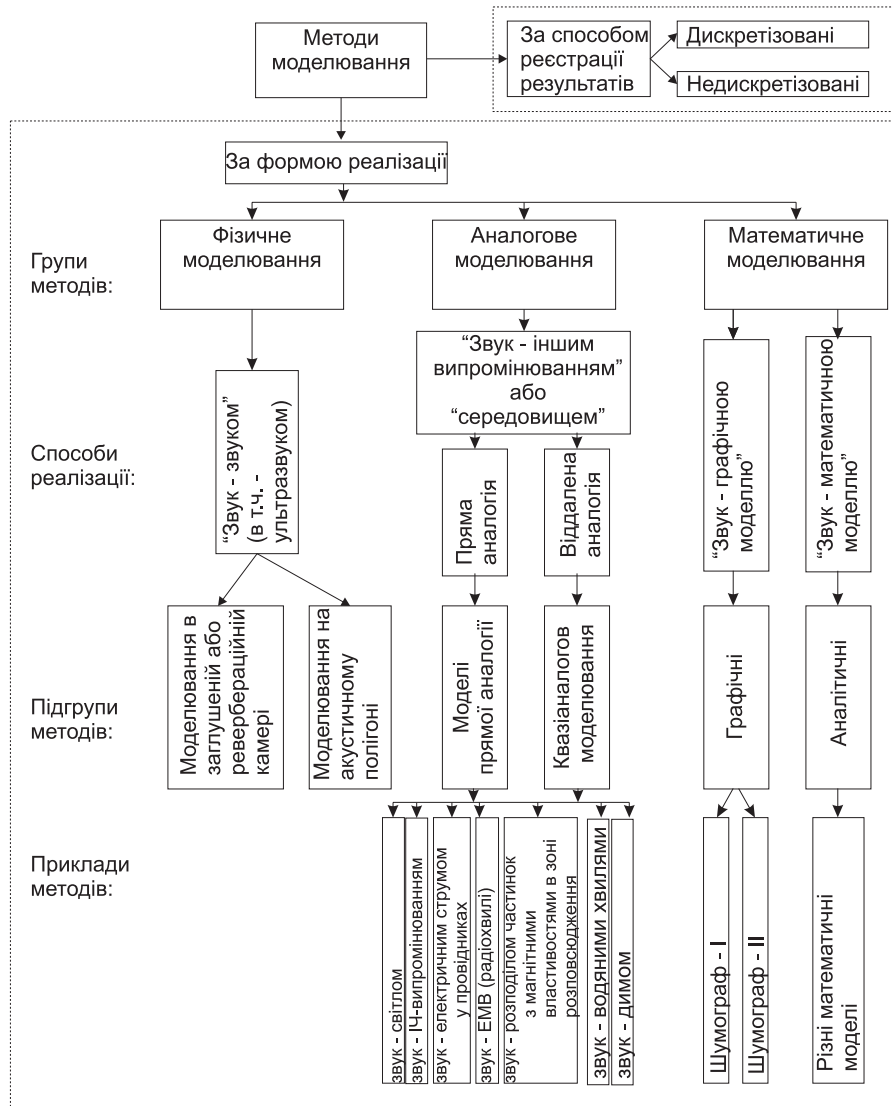


Рис. 1.2. Укрупнена класифікація методів акустичного моделювання.

На підставі аналізу літературних джерел нами зроблена класифікація методів моделювання, що застосовуються в акустиці.

Найбільш точну і достовірну (хоча, безумовно, не зовсім повну) інформацію про досліджуваний процес, явище можна одержати тільки шляхом натурних вимірів [7, 8]. У ряді випадків найбільш складна і громіздка частина системи, замінюється моделлю; інша ж частина, що безпосередньо підлягає вивченню, береться справжньою (півнатурні виміри). І ті, й інші, на жаль, просто незастосовні для дослідження більшості неіснуючих (наприклад, проєктованих) об'єктів. Апроксимація даних натурального виміру характеристик одного об'єкта під характеристики іншого подібного до нього об'єкта можлива тільки у вкрай рідких випадках. Тому при дослідженні найскладніших процесів неминуче виникає необхідність моделювання.

1.2. Фізичне моделювання в акустиці

Фізичне моделювання здійснюється за допомогою моделей, подібних до природи, тобто подібні величини моделі й природи мають однакову фізичну природу й однаковий математичний опис. При цьому зберігаються особливості натурального експерименту, але полегшується одержання результатів, тому що первісно обрані зручні діапазони виміру фізичного поля. Стосовно до акустичного моделювання з метою боротьби із шумом здійснюються два різновиди моделювання:

- моделювання процесів випромінювання (або джерел шуму),
- моделювання процесів поширення звуку [10].

Відомий спосіб досягнення подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів, відповідно до якого при цьому висувуються наступні вимоги подібності [11, 12]:

1. Геометрична подібність моделі природі (що досягається шляхом виготовлення зменшеної чи збільшеної у c_L разів моделі, що зберігає особливості, розташування, конфігурацію і т.п. ознаки елементів, подібних до натурних, (де $c_L = n:1; \dots; 2:1; 1:1; 1:2; \dots; 1:n$) — масштаб лінійних розмірів).

Лінійні розміри моделі L_m зв'язані з лінійними розмірами природи L_n співвідношенням:

$$L_m = c_L \cdot L_n, \text{ м}, \quad (1.1)$$

де c_L — константа подібності (див. вище).

Площі моделі S_m і природи S_n зв'язані співвідношенням:

$$S_m = c_L^2 \cdot S_n, \text{ м}^2, \quad (1.2)$$

Адекватні обсяги в моделі і природі зв'язані як:

$$V_m = c_L^3 \cdot V_n, \text{ м}^3. \quad (1.3)$$

2. Дотримання рівності відносин лінійних розмірів L до довжини хвилі λ у моделі (індекс $_m$) і в природі (індекс $_n$) (що досягається шляхом зміни довжини хвилі λ_m і частоти f_m звуку в моделі стосовно натурних λ_n і f_n) при рівності швидкості розповсюдження звуку в моделі c_m та в природі c_n . Тобто, при побудові такої моделі мислено вважаємо, що звук в моделі розповсюджується з такою ж швидкістю, як і в природі. Вимоги подібності наведено згідно з [10]:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_m &= \lambda_n c_{L,M}, \\ f_m &= f_n c_{L,\Gamma}, \\ c_m &= c_n M/c \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

У загальному випадку умови (1.1) не зовсім коректні [13, 14]. Вони діють тільки при наявності останнього, третього пункту з вищезгаданої системи рівнянь. Покажемо, що в цієї триєдності має рацію, а що — ні. Насправді, для моделювання явища дифракції необхідно дотриматися подібності відносин лінійних розмірів досліджуваного об'єкта до довжини хвилі натурального випромінювання й аналогічного відношення відповідних параметрів моделі:

$$L_n/\lambda_n = L_m/\lambda_m, \quad (1.5)$$

де L_n і L_m — розміри моделі відповідно в природі й моделі, м, (див. вище);

λ_n, λ_m — довжина хвилі відповідно в природі і моделі, м.

Для дотримання цієї вимоги при умові основної залежності (1.1) при дотриманні умови рівності швидкості розповсюдження звуку в моделі c_m та в природі c_n потрібно змінити довжину хвилі джерела випромінювання (на моделі). Це значить, що при зменшенні моделі щодо природи доводиться переходити в область короткохвильових випромінювань, а при збільшенні — у довгохвильову область. При недотриманні цієї немаловажної умови не дотримується подібність в явищах дифракції.

3. Дотримання рівності імпедансів у моделі й у природі. Як указується, наприклад, у [15], ця вимога практично нездійсненна і на практиці замінюється рівністю коефіцієнтів звукопоглинання $\alpha_m = \alpha_n$ (що досягається шляхом підбору при конструюванні моделі адекватних матеріалів задля виготовлення подібних натурним (за призначенням) поверхонь в моделі, що відбивають енергію, кутів падіння звуку і т.п.).

Відомими загальноновизнаними недоліками фізичного моделювання є:

- за п. 1 — складність випромінювання й особливо прийому (реєстрації) випромінювання звуку, що моделюється (наприклад, у масштабі $c_L = 1:10$ обсяг мікрофонного капсуля повинен бути зменшений у 1000 разів стосовно натурального). Докладно це розглянуто автором в роботі [10].

- за п. 2 — як правило, під фізичним моделюванням в акустиці розуміють саме «крупномасштабное моделирование на акустических полигонах и заглушенных камерах» згідно з [10]; оскільки зменшення масштабу моделі менше $c_L = 1:20$ неможливо через перехід в область ультразвукових і гіперзвукових частот, де висока частота f_m і мала довжина хвилі λ_m визначають специфічні особливості поширення модельного випромінювання [15]. (Треба зневажити, що взагалі звук з $f > 2 \cdot 10^5$ Гц фізично нездатний поширюватися в повітрі). У такий спосіб істотно обмежений діапазон можливих масштабів моделювання.

- за п. 3 — невідповідність у моделі й у природі акустичних і механічних властивостей матеріалів, причому згідно з [15] їхню подібність на сучасному рівні науки і техніки забезпечити неможливо з наступних причин:

- 1) необхідність витримувати строго визначені кути падіння звуку; саме по собі поняття «імпеданс» неконкретизоване;

- 2) вимогу рівності $\alpha_m = \alpha_n$ не так просто витримати, тому що зазначений коефіцієнт звукопоглинання залежить не тільки від різновиду, а також товщини матеріалу, тобто для одного й того ж самого матеріалу в моделі й в природі коефіцієнти звукопоглинання будуть різні, якщо товщини шарів цього матеріалу в подібних елементах моделі й природи різні (що впливає з п. 1);

- 3) неконкретизовані вимоги до енергетичних характеристик моделей джерел шуму (далі — ДШ) стосовно натурних ДШ. Унаслідок цього область застосування фізичного моделювання обмежена.

Фізичне моделювання акустичних процесів (та його болісні проблеми) докладно описані, наприклад, у [11].

Вищевказані п. 1, 2, 3 являють собою не що інше, як формулювання критеріїв подібності. Але це зроблено частково, що представляє значні незручності при практичній реалізації моделей, де бажано мати масштабні співвідношення в дохідливому вигляді, а критерії та індикатори подібності використовувати для їхньої перевірки.

Деякі недоліки фізичного моделювання виявлені персонально автором. Ніким дотепер майже не зверталася увага на необхідність зміни параметрів газоподібного середовища поширення звукових хвиль, а особливо таких з них, як атмосферний тиск (у неявному вигляді ця вимога впливає з п.3 вищевказаного відомого способу досягнення подібності). Це питання у відомих літературних джерелах пояснюється дуже незрозуміло. Наприклад, в [16] в підрозділі «Моделирование механического шума» на с. 35 фігурує: «Условия возбуждения звука должны быть одинаковыми. Воздух, окружающий модель, должен иметь те же плотность и температуру, что и в натуральных»

условиях». Але в тому ж самому довіднику [16] на с. 31 в іншому підрозділі «Моделирование распространения шума в помещениях» його автори собі ж суперечать, пишучи протилежне: «Не обязательно иметь одну и ту же среду в модели и в натуре — иногда в модели удобнее применить фреон или водород, скорости звука в которых существенно отличаются от скорости звука в воздухе». Вважаючи, що моделювання розповсюдження шуму в приміщеннях включає в себе моделювання механічного шуму як свою невід’ємну складову частину — (шум від моделі механічних джерел розповсюджується в моделі приміщення), та вони співвідносяться між собою як загальне і часткове, — складається враження, що автори [16] самі достовірно не знають, потрібно змінювати параметри газоподібного середовища поширення звукових хвиль при моделюванні, чи ні? — (або ж деякі автори в чисельному колективі розробників довідника [16] просто не знайшли необхідної єдності й взаємопогодженості з іншими?!)

У більшості випадків ця вимога просто замовчується, за винятком роботи [15], де прямо вказується, що тиски в моделі й в натурі повинні бути рівними. Те, що це не так, можна показати різними способами, наприклад, записавши загальновідоме рівняння стану ідеального газу, що зв’яже початковий 1 і кінцевий 2 стани того самого газу через його тиск P , температуру Q і обсяг V для кожного із станів:

$$P_1 V_1 / Q_1 = P_2 V_2 / Q_2 = \text{const} \quad (1.6)$$

і замінивши індекси станів $1, 2$ індексами станів відповідно індексами $н$ (натура) та $м$ (модель). З огляду на те, що при моделюванні c_L не дорівнює 1:1, ізобаричний процес виключений, тобто адекватні обсяги газу в моделі $V_m = V_2$ і в натурі $V_n = V_1$ різні. Рівність тисків у моделі й натурі грубо порушує подібність, — а особливо саме при акустичному моделюванні, де мова йде про передачу звуку саме за рахунок звукового тиску, тобто в різниці тисків в збуреному й незбуреному місцях середовища.

Наприклад, запишемо те саме рівняння стану ідеального газу (1.6), ввівши в усі вхідні в нього величини індекси ($м$ — модель, $н$ — натура):

$$P_m V_m / Q_m = P_n V_n / Q_n, \quad (1.7)$$

де P_n, P_m — тиск відповідно в натурі і моделі, Па; Q_n, Q_m — температура відповідно природи і моделі, К.

Використовуючи залежність взаємозв’язку адекватних обсягів у моделі і в натурі, перепишемо (1.7) у вигляді:

$$P_m c_L^3 V_n / Q_n = P_n V_n / Q_n. \quad (1.8)$$

З цього випливає, що при $Q_m = P_n V_n / Q_n = \text{const}$ величини тиску в моделі й натурі взаємозалежні:

$$P_n = P_m c_L^3. \quad (1.9)$$

При однаковому тиску $P_n = P_m = \text{const}$ у моделі й натурі взаємозалежні температури:

$$Q_m = Q_n c_L^3. \quad (1.10)$$

Це означає, що, зменшуючи модель, ми повинні або збільшувати тиск, або зменшувати температуру в моделі порівняно з натурою для дотримання теорії подібності.

Таким чином, з двох взаємовиключних положень роботи [16] більш правильним є вищенаведений вираз на с. 31 [16], що побічно стверджує наші висновки з цього питання.

З урахуванням вищесказаного, нами були запропоновані скориговані відомі вимоги подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів, що призвело до створення невідомого раніше способу досягнення подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів, захищеного патентом України [17]. Таким чином, у рамках наших власних досліджень, створений (і апробований) спосіб досягнення подоби при фізичному моделюванні акустичних процесів [17], що включає дотримання геометричної подоби моделі і природи, дотримання рівності відношенні лінійних розмірів до довжини хвилі в моделі й у натурі, дотримання рівності імпедансів чи коефіцієнтів звукопоглинання в моделі й у натурі, який, відповідно до запатентованої формули винаходу, відрізняється тим, що моделювання проводять у реальному масштабі часу, дотримуючи рівності адекватних проміжків часу в моделі і у натурі, за рахунок того, що забезпечують у моделі швидкість поширення звуку, рівну добутку швидкості поширення звуку в натурі на масштаб лінійних розмірів.

Передбачено також, що у визначених формах використання (чи конкретних видах реалізації) відповідно до запатентованої нами формули винаходу запропоновані такі варіанти:

- при рівності газових постійних у моделі й у натурі і рівності в них постійних адиабати, тобто при використанні як середовище поширення звукових хвиль того самого газу як у моделі, так і в натурі, (наприклад, повітря), забезпечують температуру цього газу в моделі, рівну добутку температури цього газу в натурі на масштаб лінійних розмірів, зведений у другий ступінь, при однакових тисках газу в них.
- при рівності газових постійних у моделі й у натурі і рівності в них постійних адиабати, тобто при використанні як середовище поширення звукових хвиль того самого газу як у моделі, так і в натурі, наприклад, повітря, забезпечують тиск цього газу в моделі, рівний відношенню тиску цього газу в натурі до масштабу лінійних розмірів, зведеному в другий ступінь, при однакових значеннях температур у них.

- як середовище поширення звукових хвиль у моделі використовують газ з хімічним складом, відмінним від хімічного складу газу, що є середовищем поширення звукових хвиль у природі, наприклад, повітря.

Альтернативне (а не спільне) дотримання одних (і, відповідно, недотримання інших) форм його реалізації (тобто коли всі 4 вищевказані формулювання розглядаються не в комплексі, а як взаємно несумісні альтернативні варіанти) є частковим випадком загальної закономірності і базується на свідомо ідеалізованому представленні про ізобаричний плин процесів, — (припускає рівняння одиниці комплексу значень $c_m \cdot c_T^{-2} \cdot c_L^{-1}$ при величині P_n у виведеній автором формулі, що зв'язує адекватні величини тисків у моделі P_m і природі P_n):

$$P_m = c_m \cdot c_T^{-2} \cdot c_L^{-1} \cdot P_n.$$

Хоча, звичайно ж, це значно полегшує життя експериментаторам, які на практиці будують фізичні моделі.

З врахуванням вищевказаного, треба доповнити систему відомих вимог подоби при аналоговому і фізичному моделюванні, що сформульовані вище. Згідно з системою вимог подоби при аналоговому і фізичному моделюванні, описаною там, додається ще один пункт (додаткові критерій і індикатор подоби згідно [17]):

«Проведення моделювання у реальному масштабі часу, дотримуючи рівності адекватних проміжків часу в моделі і у природі, за рахунок того, що забезпечують у моделі швидкість поширення звуку, рівну добутку швидкості поширення звуку в природі на масштаб лінійних розмірів.»

Додаткові критерій і індикатор подоби згідно [17]:

Критерій подоби	Індикатор подоби
$\frac{P_m V_m}{Q_m} = \frac{c_L^{-1} c_m c_T^{-2} P_n c_L^3 V_n}{c_Q Q_n} =$ $= \frac{c_L^2 c_m c_T^{-2} P_n V_n}{c_Q Q_n}$	$\frac{P_n V_n Q_m}{Q_n P_m V_m} = 1$ $\frac{(P_n V_n)(c_Q Q_n)}{Q_n (c_m c_L^2 c_T^{-2} P_n V_n)} = 1$ $\frac{c_Q}{c_m c_L^2 c_T^{-2}} = 1$

де позначення констант подоби c_L , c_m , c_Q див. у табл. 3.1.

1.3. Аналогове моделювання в акустиці

Наші власні дослідження велися в області аналогового і квазіаналогового моделювання, що, поряд з фізичним, також може вірогідно врахувати характерні риси хвильових явищ при поширенні звуку: наприклад, таких, як інтерференція, дифракція та ін.

На рис. 1.3 представлено конкретизовану класифікацію методів такого моделювання, застосовуваних для прогнозування стану акустичної безпеки об'єктів, що захищаються, відповідно до роботи [18], і інших, пізніших та новіших досліджень автора.

Методи аналогового і квазіаналогового моделювання	
Групи	Способи реалізації
Пневматичні	Заміна звуку витіканням газу (диму)
Оптичні	Заміна звуку світлом (видимого діапазону)
Теплові	Заміна звуку ІЧ випромінюванням
Радіохвильовий	Заміна звуку радіохвилями
Вихреструмові	Заміна звуку рухом електрично заряджених часток
Гідравлічні	Заміна звуку витіканням рідини

Рис. 1.3. Класифікація методів аналогового і квазіаналогового моделювання, використовуваних у прикладній акустиці.

Аналогове моделювання стосовно до акустики означає заміну звуку іншим моделюючим середовищем; при цьому також повинні дотримуватися вимоги подібності. Найбільш старим з такого роду способів є моделювання на плоских водяних моделях за допомогою поверхневих хвиль — так званий метод «хвильових брижів» [9]. Щоб забезпечити досить близьку аналогію між простими гармонійними брижами, глибина повинна бути більше 1/2 довжини брижі. Недолік методу — швидке загасання брижі, можливість одержати тільки плоске зображення, ні про яку кількісну оцінку не може бути й мови.

Інша спроба замінити розповсюдження звуку витіканням якоїсь речовини пропонує застосувати дим як хвильове середовище [9]. Тут можливо одержати не тільки плоске, а й просторове розповсюдження випромінювання, що моделюється, дим добре візуалізується, — але аналогія між звуком та димом в повітрі дуже мала, розповсюдження диму більш статичне, і така аналогова модель просто не витримує критики.

Такі оригінальні, але практично не застосовані спроби знайдення аналогії між звуком та якимось іншим середовищем ми наводимо для того, щоб показати, що пошук такої аналогії проводився з давніх часів, та займав розум багатьох вчених.

Відомі спроби моделювання звукових хвиль електромагнітним способом (розподіл часток металевого порошку в магнітному полі, що відповідає звуковому полю), але практичного застосування цей спосіб не одержав через його технічну складність при здійсненні [10].

Одна з ідей автора полягала в тому, що зневажити тиском газоподібного середовища поширення звукових хвиль, а заодно й іншими його параметрами (температурою, газовою постійною і ін.) (необхідність зміни цих

параметрів у моделі стосовно природи була показана раніше) в принципі можливо, якщо використовувати такий параметр, як інтенсивність звуку I_n , Вт/м², (а не дійсний звуковий тиск, Па), у природі; і такий параметр, як інтенсивність випромінювання I_m , Вт/м² у моделі, причому передача цього випромінювання повинна здійснюватися не за рахунок зміни тиску газоподібного середовища поширення в моделі. Цій умові ідеально задовольняє електромагнітне випромінювання (далі -ЕМВ), — (у т.ч. світло і теплове випромінювання), передача якого здійснюється квантами поля — фотонами за рахунок електромагнітної взаємодії.

Моделювання оптичними методами засновано на імітації джерела звуку джерелом світла і заміні виміру рівня звуку виміром освітленості в контрольних точках моделі досліджуваного об'єкта. Перевагою такого роду моделювання є те, що розподіл світла на моделі значно легше зафіксувати, аніж розподіл звуку.

Первісні відомості про можливість такого моделювання містяться в роботі [19]. Робота [15], що датована ще 1964 р., містить строгу критику [19], і прямо вказує, що таких ненадійних методів моделювання треба уникати. В роботі наших попередників [20] відзначається, що застосування світлових моделей для дослідження характеристик випромінюючих систем базується на тотожності законів переносу енергії видимого спектра та інших видів випромінювання, що математично полягає в ідентичності рівнянь, які описують процес у тому і іншому випадку. Проблема моделювання звукового випромінювання світловим випромінюванням (попередньо нашим дослідженням) невдалим чином була вирішена у [21]. Таким чином, відомий спосіб аналогового моделювання процесів поширення звукових хвиль усередині приміщення, що включає моделювання процесу поширення звукової енергії на моделі і вимір її величини в контрольованих точках моделі, реалізований у вищевказаному пристрої по [21], що містить імітатор звукового випромінювання, що складається з точкового і мнимого джерел світла (далі — ДС), і засіб реєстрації з блоків фотодіодів зі світлодіодами для установки на точковому і мнимому ДС, а також поверхні, що відбивають світло. З формули й опису прототипу явно випливає, що моделювання процесу поширення звукової енергії здійснюється поширенням світлової енергії, причому у видимому діапазоні довжин світлових хвиль, а вимір її величини в контрольованих точках моделі приміщення відбувається шляхом реєстрації освітленості.

Найбільш вичерпно й докладно ця проблема розглядалася в власній кандидатській дисертації автора [22], але стан запропонованих технічних засобів її реалізації (на рівні початку 90-х років, без застосування комп'ютерної техніки і матеріалів сучасних наукових досліджень) свідчить про те, що цю проблему треба вирішувати заново, із залученням сучасних

підходів. Тому кандидатська дисертація автора [22], як найбільш докладна і повна наукова праця, присвячена проблемам такого роду моделювання, була взята за прототип наших подальших досліджень.

Єдиним реальним зразком апробованих, налагоджених, впорядкованих пристроїв щодо моделювання процесів розповсюдження звуку оптичними методами на сучасному етапі є наш власний винахід — так званий пристрій для візуалізації картини зашумованості міської забудови [23].

1.4. Пристрій для візуалізації картини зашумованості міської забудови (фотографічний недискретний спосіб реєстрації)

У рамках досліджень [1, 2], нами був запатентований так званий пристрій для візуалізації картини зашумованості міської забудови згідно [24, 25], що застосовує заміну реального звукового випромінювання оптичним (видиме світло або інфрачервоне (ІЧ) випромінювання на моделі). Зони натурної звукової тіні представляються в моделі міської забудови зонами звичайних, світлових тіней, що легко спостерігаються неозброєним поглядом. Пристрій поданий на кресленні — (рис. 1.4).

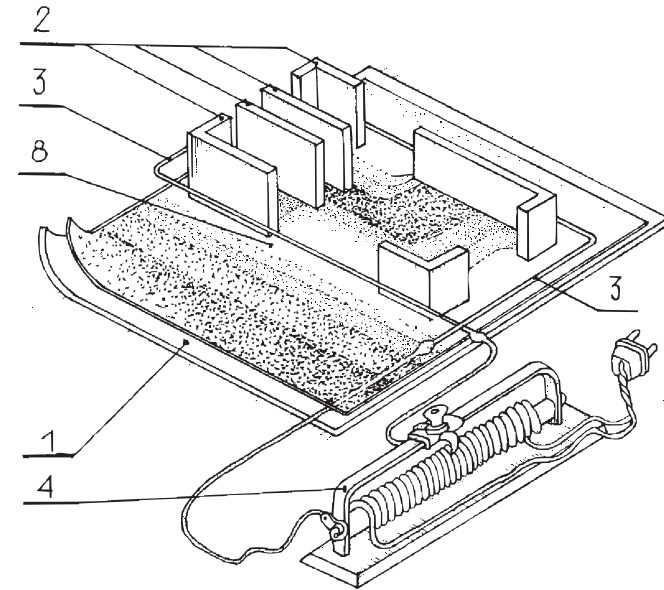


Рис. 1.4.а. Пристрій візуалізації картини зашумованості міської забудови. Загальний вигляд. (безпосередньо при проведенні експериментальних досліджень).

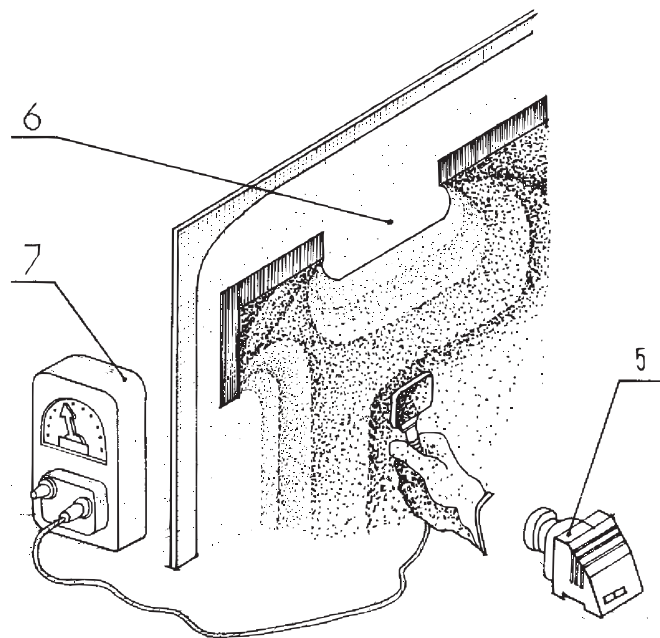


Рис. 1.4.6. Пристрій візуалізації картини зашумованості міської забудови. Другий етап досліджень: обробка результатів. (проводиться вимір освітленості в контрольних точках моделі).

Склад пристрою:

1 — засіб оцінки енергії, що розподіляється; 2 — модель міської забудови; 3 — модель джерела звукової енергії; 4 — реостат; 5 — діапроектор; 6 — проекційний екран; 7 — люксметр; 8 — розподіл світлової енергії на поверхні моделі (світлові тіні, що відповідають зонам акустичної тіні).

Пристрій [23, 24, 25] містить: модель джерела звукової енергії 3, модель міської забудови 2 і засіб оцінки енергії, що розподіляється, 1. Модель джерела звукової енергії виконана у вигляді ніхромової нитки 3, з'єднаної з джерелом струму і реостатом 4, а засіб оцінки енергії, що розподіляється, виконано у вигляді фотопластинки 7, що сполучена з основою моделі міської забудови 2, при цьому лінійні розміри підстави (моделі території) і моделей будинків вибираються з певного співвідношення, що впливає з вимог подібності (1.5). Таким чином, з погляду дотримання максимальної подібності моделі натурі масштаб виконання моделей обраний із найважливішого співвідношення, що вже багаторазово вказувалося раніше (співвідношення остаточно запатентоване саме нами в 1996-1997 рр):

$$\lambda_m = \lambda_n \cdot c_L, \quad (1.11)$$

де $c_L = L_m / L_n$ — коефіцієнт масштабності, L_m і L_n — відповідно, лінійні розміри об'єктів міської забудови в моделі й натурі, м; λ_m і λ_n — відповідно, довжини хвиль випромінювання в моделі й натурі, м.

Ця основна залежність теоретично обґрунтована рядом наших попередніх робіт, у т.ч. захищена кількома російськими і українськими патентами на винаходи, де вона була задіяна. Авторські права Абракітова В.Е. (в співавторстві з іншими фундаторами акустичного моделювання на цю залежність захищені [24, 25]).

Моделі джерел шуму (ДШ) у вигляді джерел світла (ДС) і моделі будинків вміщують на фотопластинку, що служить основою моделі. Підбирають необхідну яскравість світіння ламп, і забезпечують задану величину довжини світлової хвилі (за рахунок застосування світлофільтрів). Потім експонують фотопластинку в межах досліджуваної забудови, фіксуючи час експозиції. Проявлена фотопластинка є результатом експерименту і зберігає в собі дані про розподіл шумового випромінювання, що моделюється, на моделі досліджуваного об'єкта.

За ступенем освітленості кожної ділянки зображення судять про ступінь зашумованості міської забудови. Освітленість у досліджуваних точках зображення, що проектується на екран, вимірюють люксметром, тарованим у децибелах. Для тарування та градування люксметра використовують відомі закономірності відносного зниження звуку в просторі.

Переваги винаходу полягають у можливості моделювати ДШ будь-якої самої складної конфігурації з можливістю регулювання амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) світлового випромінювання пропорційно адекватним АЧХ звукового випромінювання в натурі за допомогою реостата 4 і різноманітних світлофільтрів, що вдягається на модель ДШ у вигляді ДС 3. При цьому можуть бути змодельовані, наприклад, криво- і прямолінійні, одно- і багаторядні потоки автотранспорту в одному, двох, трьох і більше рівнях, а з досить густої сітки ниток 3 (чи з використанням інших типів ламп) — просторові і точкові ДШ. Досягнуто можливість здійснення моделювання на маленьких моделях у лабораторних умовах, домагаючись при цьому ідеальних умов (наприклад, відсутності фонових перешкод), що неможливо забезпечити при моделюванні іншими методами, дотримуючись вищевикладеної подібності.

Моделювати поширення звуку всередині приміщень таким способом важко, але моделювати поширення звуку на території міської забудови з дотриманням подібності цілком можливо. Наприклад, довжина звукової хвилі в повітрі при частоті $f_n = 10$ кГц буде $\lambda_n = 340/10000 = 0,034$ м. Відомо, що довжина світлової хвилі, що відповідає зеленому кольору спектра, складає $\lambda_m = 5,5 \cdot 10^{-7}$ м, звідки:

$$L_m / 5,5 \cdot 10^{-7} = L_n / 3,4 \cdot 10^{-3} = \text{const};$$

$$L_m = 1,67 \cdot 10^{-4} L_n, \text{ м.}$$

При масштабі лінійних розмірів моделі, рівному $c_L = 1,6 \cdot 10^{-4}$ м, модель житлового будинку із шести дванадцятиповерхових секцій з лінійними розмірами 134 x 48 x 14 м має розміри 2,2 x 0,8 x 0,23 мм, що цілком прийнятно, з огляду на ту обставину, що моделюється, наприклад, житлова забудова цілого району чи мікрорайону міста.

Вищеописаний пристрій [24, 25] використовує недискретні способи реєстрації, і реалізує їхні переваги. Так, на фотопластинці 1 явно видний спад енергії, що моделюється, в міру видалення від ДШ, зони акустичної тіні, утворені будинками, спорудами і шумозахисними засобами, з можливістю кількісної оцінки в акустичних величинах (дБ) розподілу енергії, що моделюється, по території моделі об'єкта [26]. Дослідження такої візуалізованої картини зашумованості, що зафіксувалося на фотопластинці, показане на рис. 1.4.б.

Незалежні сучасні дослідження інших авторів цієї галузі також мали місце. Наш попередній винахід підштовхнув інших авторів до досліджень в цьому напрямку. Так, в 2001-2004 рр. вийшло декілька робіт, присвячених цій тематиці [27, 28, 29] (альтернативно до наших досліджень). У них показана принципова можливість визначення оптико-геометричних характеристик шумовипромінюючих систем за допомогою світлових моделей, і розрахунку їх за допомогою енергетичних параметрів елементів систем. Автори [27, 28, 29] описують власні експерименти на світлових аналогових моделях, і доповнюють створену нами теорію важливими подробицями щодо застосування в якості моделі ДШ люмінесцентних ламп типу ЛБ-40, визначення оптичних властивостей поверхонь системи, що моделюється, і строгого забезпечення тотожності цих властивостей на відповідних поверхнях моделі, що є необхідною умовою одержання достовірних результатів на світлових моделях.

Головним недоліком таких методів моделювання є відсутність чіткого, узгодженого взаємозв'язку між характеристиками моделі (освітленість вимірюється в лк) та натурі (рівні звуку вимірюються в дБ). Рання робота автора [26] не вирішує проблеми повністю.

1.5. Математичне моделювання в акустиці

Математичні моделі можуть бути аналітичними, побудованими за відомими фізичними законами, що розкривають фізичну сутність явища, і експериментально-статистичними, котрі відповідають наборові експериментальних даних, отриманих у результаті спостереження за входом і виходом

системи. Зокрема, в технічній акустиці панують три теорії: хвильова, геометрична, статистична [30]. Хвильова теорія дає точні рішення, але характеризується складністю математичного апарата навіть при використанні ЕОМ. Геометрична акустика ближче до геометричної оптики. Існує також статистична теорія акустики, але її набір експериментальних даних, природно, не може охопити всі можливі випадки.

Різниця між хвильовою і геометричною акустикою бути пояснена таким чином. Відомо, що при віддаленні від ДШ звук поступово зменшується, і, нарешті, перестає бути чутним. Поширення звукових коливань у повітряному середовищі відбувається у формі подовжніх хвиль об'ємних деформацій, тобто згущення і розрідження середовища. Простір, в якому поширюються ці хвилі, називається звуковим полем. Вид фронту звукових хвиль, що поширюються від ДШ, залежить від типу джерела, співвідношення між його розмірами і довжиною випромінюваної звукової хвилі, а також відстані між ним і місцем, що розглядається. Для кожного ДШ можуть бути визначені ближнє (хвильова зона) і далеке звукове поле. У ближньому звуковому полі напрямок руху часток середовища може не збігатися з напрямком потоку звукової енергії, тут можуть спостерігатися значні зміни рівнів звукового тиску від точки до точки. Довжина ближнього поля залежить від частоти, розмірів джерела і фаз випромінювання окремих його поверхонь. Для точкових ДШ ближнє звукове поле простирається на відстань, рівну їхньому подвоєному найбільшому розміру. Далеке звукове поле знаходиться на великих відстанях від ДШ, і тільки там можна говорити про закономірності поширення шуму. Ближнє звукове поле найбільш сприятливо розглядається так званою хвильовою теорією акустики; а далеке — з достатньою для практичної мети точністю апроксимується геометричною.

Оскільки при вирішенні вищезгаданих прикладних завдань (картографування шумового режиму, та ін.) мають справу, як правило, з відстанями, що перевищують подвійний найбільший розмір ДШ, — для вирішення наших завдань, певна річ, найбільшу роль має насамперед геометрична теорія акустики. Розглянемо її детальніше.

ДШ в умовах міської забудови можуть бути умовно розділені на такі різновиди: точкові, лінійні, лінійно-переривчасті, плоскі і просторові. До точкових джерел відносять окремі засоби автомобільного транспорту, трансформатори, дитячі і спортивні майданчики, вихлопні й забірні шахти вентиляційних і компресорних установок, літаки, пароплави і т.д. До лінійних — поїзди і безперервні потоки автомобільного транспорту. Перервні потоки автомобільного транспорту — лінійно-переривчасті ДШ.

Точкове джерело, що може бути представлене у вигляді сферичного випромінювача, створює сферичні звукові хвилі, які поширюються від джерела шуму рівномірно.

Лінійне джерело, що може бути подане у вигляді рівномірно випромінюючої прямої лінії, створює циліндричні звукові хвилі, які можна розглядати як двовимірний аналог сферичних хвиль. Переривчасте джерело займає проміжне місце між лінійним і точковим, і може бути представлено як лінійна система некогерентних джерел, розташованих на кінцевій відстані одне від одного.

Ключовим поняттям геометричної теорії акустики є:

— «фронт хвилі» — безупинна поверхня в просторі, всі точки якої в розглянутий момент часу мають однакову фазу коливань (насправді це не так: якщо аналізувати графіки АЧХ хвилі, явно видно, що в той самий момент часу та сама хвиля в одній і тій же точці має безліч фронтів, кожний для своєї дискретної частоти, що розрізняються між собою фразами коливань, а однакову фазу вона має відповідно до графіка гіперболічної залежності:

$$T=R / (\lambda f), \text{ с,}$$

де R — відстань, м, пройдена хвилею, що має довжину хвилі λ , м, і частоту f , Гц, за час T , с.);

— «звукові промені» — лінії, перпендикулярні до фронту у всіх точках і відповідні напрямку його поширення.

Ця теорія застосовна до опису акустичних процесів на відстанях, що багаторазово (не менш 2-5 разів) перевищують довжину хвилі. У зв'язку з розглянутими закономірностями поширення шуму в повітряному просторі слід зазначити, що всі вказані характеристики рівнів звуку чи звукового тиску представляються звичайно функціями тільки геометричних причин: форм джерела, особливостей його випромінювання і форм поширення звуку.

Різниця проміж різними типами ДШ може бути пояснена таким чином. Точкові джерела характеризуються рівнем звукової потужності і характеристикою спрямованості, а лінійні і переривчасті — рівнем звуку на визначеній відстані від ДШ. У деяких випадках точкове ДШ також може характеризуватися рівнем звуку на певній відстані від нього.

В ідеальному необмеженому і непоглинаючому середовищі інтенсивність звуку I , Вт/м² плоскої хвилі може вважатися незалежною від відстані r , м до ДШ. У реальних умовах, — тобто в містобудуванні, — з поширенням плоских хвиль практично не доводиться зустрічатися.

У тому же середовищі при поширенні сферичної хвилі сила звуку змінюється назад пропорційно квадрату відстані — r^2 , м; а при поширенні циліндричних хвиль — назад пропорційно відстані r , м. Інтенсивність звуку, створюваного точковим ДШ, у вільному звуковому полі, дорівнює:

$$I = P\Phi/(\Omega r^2), \text{ Вт/м}^2;$$

де P — звукова потужність джерела, Вт; Φ — фактор спрямованості за розглянутим напрямком (відношення інтенсивності звуку в даному місці до інтенсивності, що створило би джерело з тією же потужністю при рівномірному випромінюванні); r — відстань від центра випромінювання до даної точки; Ω — просторовий кут випромінювання у стерадіанах (у випадку випромінювання в нескінченний простір дорівнює 4π , а в півпросторі — 2π). З формули видно, що зі збільшенням r в результаті поширення (розсіювання) звукової енергії по більшому обсязі відбувається зменшення сили звуку назад пропорційно квадрату відстані r . Розділивши обидві частини цього виразу на граничні величини інтенсивності і звукової потужності і логарифмуючи їх, знайдемо:

$$L=L_p + 10\lg\Phi - 20\lg r - 10\lg\Omega, \text{ дБ}$$

де L — рівень інтенсивності звуку, дорівнює рівню звукового тиску L , дБ, L_p — рівень звукової потужності джерела шуму, дБ.

За цією формулою можуть бути розраховані рівні звукового тиску на різних відстанях від точкового ДШ із заданою звуковою потужністю (без урахування поглинання звуку в повітрі). Якщо рівень звукового тиску чи рівень звуку L_1 на певній відстані r_1 від точкового ДШ заданий, то рівень L_n на відстані r_n (без урахування поглинання в повітрі) обчислюється за формулою [31]:

$$L_n=L_1 - 20\lg(r_n/r_1), \text{ дБ.} \quad (1.12)$$

З формули видно, що при кожному подвоєнні відстані від точкового джерела рівень звукового тиску чи рівень звуку знижується на 6 дБ. Наприклад, якщо рівень звуку на відстані 7,5 м від точкового ДШ складе 90 дБА, то на відстані 15 м рівень звуку знизиться на 6 дБ, і абсолютне значення буде відповідати: 90-6=84 дБА, (вважаючи, що поглинання в повітрі практично дорівнює 0, а вплив інших факторів відсутній).

Для лінійного джерела формула прийме вид [31]:

$$L_n=L_1 - 10\lg(r_n/r_1), \text{ дБ} \quad (1.13)$$

З формули видно, що при кожному подвоєнні відстані від лінійного джерела рівень звукового тиску чи рівень звуку знижується на 3 дБ.

У випадку, коли лінійне джерело має кінцеву довжину l , та при відстані r_n до спостерігача, що знаходиться на перпендикулярі, проведеному із середини прямої l , і при $r_n < l$ буде спостерігатися циліндрична хвиля, а при $r_n \gg l$ — сферична.

Інтегральне значення звукової енергії $E_{\text{сум}}$ у точці М, (вважаючи, що лінійне джерело складене з безупинного ряду некогерентних випромінювачів звуку), чи щільність енергії, можуть бути знайдені за формулою:

$$E_{\text{сум}} = \frac{1}{r} \cdot \arctg \frac{1}{2r}$$

Таблиця 1.1

Інтегральне значення звукової енергії $E_{\text{сум}}$ у різних випадках

Значення аргументу	Звукова енергія	Форма хвилі
$1/(2r) \ll \pi/4$	$E_{\text{сум}} \Rightarrow 1/(2r^2)$	сферична
$1/(2r) \gg \pi/4$	$E_{\text{сум}} \Rightarrow \pi/(2r)$	циліндрична

Границя переходу хвиль у сферичні буде розташована на відстані $r_{\text{гр}} = 1/\pi$.

При вирішенні багатьох практичних задач, пов'язаних з математичним моделюванням процесів поширення різноманітних за фізичною природою випромінювань, виникає необхідність охарактеризувати конфігурацію, розміри і площу хвильового фронту, що розходиться від джерела. Дуже часто їхня умова виглядає приблизно так: визначити величину інтенсивності I , Вт/м² на деякій відстані джерела випромінювання R , м при постійній потужності джерела P , Вт, що випромінює у вільному просторі чи напівпросторі. Нагадаємо, що I , Вт/м² є відношення потужності P , до площі поверхні поширення енергії хвилі S , м²:

$$I = P/S, \text{ Вт/м}^2.$$

Можливо виконати ранжирування умов розташування джерела, а саме: воно може бути розташоване або у вільному просторі, або в півпросторі (можливі також деякі особливі випадки — розташування джерела в двогранному куті, утвореному поверхнями, що відбивають, причому вважається, що ці поверхні, що відбивають, практично не пропускають крізь себе випромінювання; аналогічним чином — розташування джерела в тригранному куті і т.п.). Типологія такого розташування джерел випромінювання на прикладі ДШ наведена в роботі [32]. У роботі [33] здійснена спроба описати можливі типологічні ситуації форми самого хвильового фронту на додаток до цього.

У різних галузях науки застосовуються, і дуже широко, поняття про точкові, лінійні, плоскі та ін. джерела випромінювання. Так, у світлотехніці [34] лампа розжарювання, (як відомо, що має грушоподібну форму), успішно апроксимується точковим ДС (тобто таку лампу на певному віддаленні від неї цілком можна представити як світну точку). Відповідно трубчаста люмінесцентна лампа апроксимується лінійним ДС (тобто таку лампу на

визначеному віддаленні цілком можна представити як світну лінію). Аналогічно в технічній акустиці [35] одиночний автомобіль розглядають як точкове ДШ, а транспортний потік на вулиці — як лінійне ДШ. Ці приклади можна було б продовжити, поширивши підхід, що викладається, на інші види випромінювань. Але більшість реальних джерел випромінювання — аж ніяк не точкові і не лінійні, і навіть не плоскі (наприклад, промислове підприємство відповідно до роботи [36] представляється, як плоске ДШ), — але просторові, причому дуже складної конфігурації. Раніше [36] панував підхід, при якому ці просторові джерела складної форми апроксимувалися плоским джерелом випромінювання. Це, природно, сильно примітивізує реальну картину, утрудняє отримання достовірних даних при математичному моделюванні процесу випромінювання від них у навколишнє простір хвиль тієї чи іншої фізичної природи.

Автором в роботі [33] запропоновано апроксимувати реальні просторові джерела різних видів випромінювань прямокутним джерелом в формі паралелепіпеда, сторони яких мають розміри A , м; B , м; C , м. Якщо розглядати промислові джерела різноманітних випромінювань, то можна помітити, що їхня реальна форма явно тяжіє до форми прямокутного паралелепіпеда. При цьому, якщо випромінювання відбувається в однорідному ізотропному середовищі з однаковою швидкістю поширення хвиль у різних напрямках, то через однаковий момент часу поверхні поширення енергії випромінювання розходяться, тобто фронти віддаляються на однакову відстань від джерела, а саме відстань R , м.

Просторове джерело випромінювання у формі прямокутного паралелепіпеда, показане на фігурі а прикладеного креслення (рис. 1.5), у вільному просторі характеризується хвильовим фронтом визначеної форми, показаної на фігурі Б рис. 1.5, що має таку площу поверхні:

$$S = 2AC + 2AB + 2CB + 4\pi R^2 + 2\pi RA + 2\pi RB + 2\pi RC, \text{ м}^2 \quad (1.14)$$

Якщо джерело є прямокутним (фігура а рис. 1.5), але тільки опирається однією з граней, зокрема, гранню $A \times B$ на границі розподілу середовищ, (наприклад, аби-яке джерело на земній поверхні, випромінювання спрямовано, в основному, в навколишнє атмосферне середовище), тобто розглядається випадок випромінювання в півпросторі, воно характеризується хвильовим фронтом форми, показаної на фігурі в рис. 1.5, що має таку площу поверхні:

$$S = AB + 2AC + 2CB + 2\pi R^2 + \pi RA + \pi RB + 2\pi RC, \text{ м}^2 \quad (1.15)$$

Якщо випромінювання здійснюється таким просторовим джерелом у формі прямокутного паралелепіпеда, що розташований в двогранному чи тригранному куті (на зразок випадку, наведеного в [32]), площі хвильових

фронтів згідно (1.15) необхідно відповідно зменшити, видаливши з формули (1.15) не потрібні в даному випадку складові.

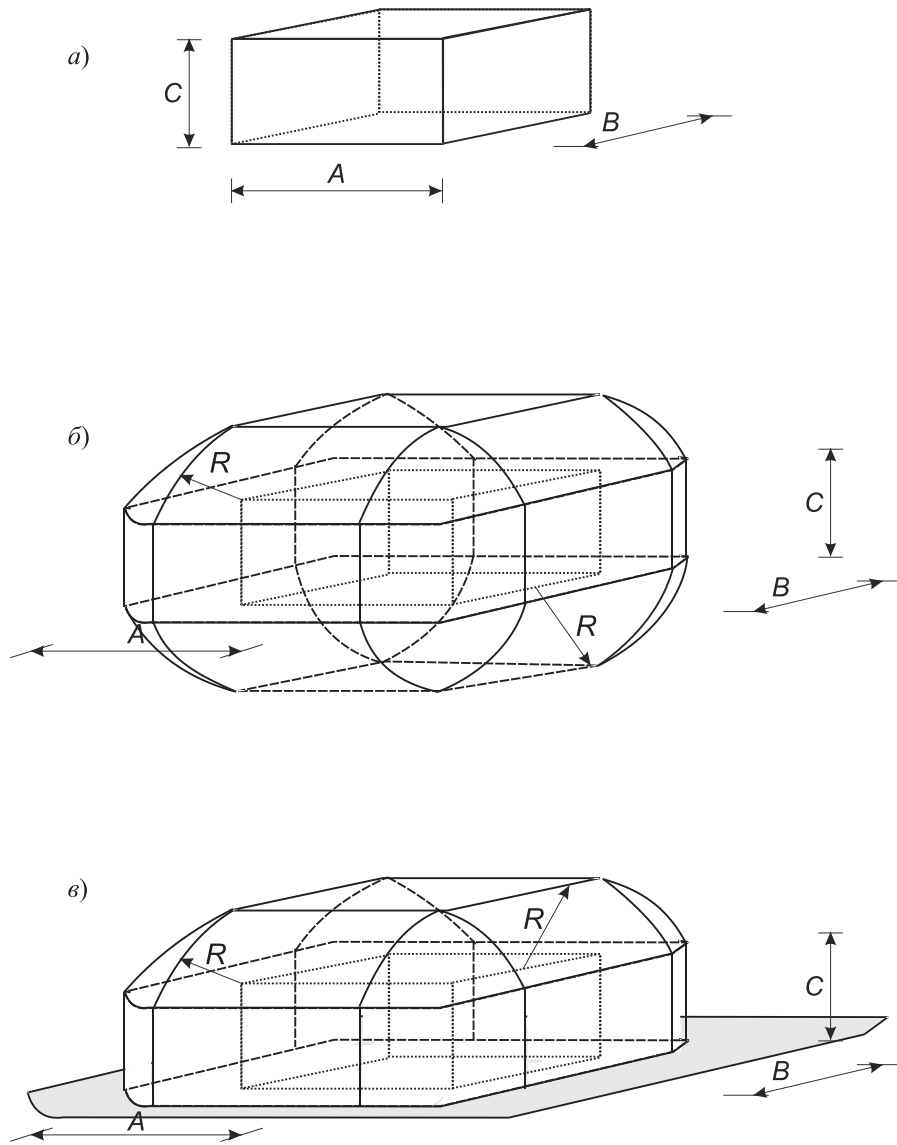


Рис. 1.5. Джерело випромінювання у формі прямокутного паралелепіпеда (а) і форма хвильового фронту від нього: у просторі (б), у півпросторі (в).

Окремими випадками хвильового фронту такого просторового джерела випромінювання у формі прямокутного паралелепіпеда є: точкове джерело ($A \Rightarrow 0, B \Rightarrow 0, C \Rightarrow 0, R = \text{var}$); лінійне джерело ($B \Rightarrow 0, C \Rightarrow 0, R = \text{var}, A = \text{var}$); плоске джерело ($C \Rightarrow 0, A = \text{var}, B = \text{var}, R = \text{var}$).

Таблиця 1.2

Площі $S, \text{ м}^2$ і форма хвильових фронтів

Вид джерела	Фронт у вигляді:	у вільному просторі	в напівпросторі
Точкове	сфери радіуса R	$S = 4\pi R^2$	$S = 2\pi R^2$
Лінійне нескінченної довжини	циліндра радіусом R , м, і висотою A , м,	$S = 2\pi RA$	$S = \pi RA$
Лінійне кінцевої довжини	циліндра радіусом R , м, і висотою A , м,	$S = 2\pi RA + 4\pi R^2$	$S = \pi RA + 2\pi R^2$
Плоске розмірами $A \times B$	вироджений еліпсоїд обертання	$S = 2AB + 4\pi R^2 + 2\pi RA + 2\pi RB$	$S = 2AB + 4\pi R^2 + 2\pi RA + 2\pi RB$

Таким чином, точкове, лінійне, і плоске джерело є вираженими просторовими джерелами у формі прямокутного паралелепіпеда. Істотно, що ця форма не залежить від виду випромінювання (чи те — пружні хвилі, чи те — ЕМВ).

Формула (1.15), виведена автором [32] і її варіанти дозволяють здійснювати математичне моделювання процесів поширення випромінювань у будь-якому ізотропному середовищі і служать відправним пунктом в описі перекручувань форми хвильові фронтів для спрямованих джерел випромінювання.

1.6 Каустики хвильових фронтів, і їхні метаморфози [37] як одна з причин, що заважають математичному моделюванню в акустиці

Здавалося б, різноманіття форм хвильових фронтів порівняно легко привести до простих форм [33]. Такі прости форми порівняно легко можна описати математичною моделлю, що враховує особливості зміни форми фронту при його розширенні (див. вище). Однак не всі так просто. Така апроксимація дуже поверхнева та малокоректна. Досвід свідчить, що існує немунуча розбіжність між даними математичного моделювання та експериментом. Тому слід враховувати каустики.

Математичний апарат видозміни форм хвильових фронтів у даний час достатньо добре розроблений у такому розділі математики, як теорія особливостей [38]. Один з найбільш важливих висновків теорії особливостей складається в універсальності декількох простих образів: «складки», «зборки» і «точки повернення», що повинні зустрічатися повсюдно і які корисно навчитися розпізнавати. Крім перерахованих, часто зустрічається ще кілька образів, що одержали власні імена: «ластівчин хвіст», «піраміда», «гаманець» та ін.

Розглянемо поширення хвильового фронту (звукової або світлової хвилі). Для простоти почнемо з плоского випадку. Допустимо, в початковий момент часу збурювання має вид кривої a (рис. 1.6.а), і нехай швидкість його поширення дорівнює 1. Щоб довідатися, де буде збурювання через час t , потрібно відкласти по кожній нормалі до кривої відрізок довжиною t . Крива, що виходить при цьому, є хвильовим фронтом. Навіть, якщо початковий хвильовий фронт не мав особливостей, через якийсь час поширення хвильового фронту ці особливості обов'язково починають виникати. Наприклад, при поширенні збурювання всередину еліпса виникають особливості, зображені на рис. 1.6.б. З математичної точки зору (математичний опис на базі теорії катастроф) ці особливості стійкі (непереборні малим ворухінням початкового фронту). Для гладкого початкового фронту загального положення з часом будуть утворюватися тільки стандартні особливості такого ж типу. Всі інші особливості (наприклад, особливість у центрі стискальної окружності) при малому ворухінні початкового фронту розсіпаються на кілька особливостей стандартного виду. У тривимірному просторі на гладкому хвильовому фронті загального положення з часом утворюються тільки ребра повернення і стандартні особливості типу «ластівчин хвіст», зображені на рис. 1.6.в (особливості фронту, що поширюється всередину тривісного еліпсоїда). Усі більш складні особливості при малому ворухінні фронту розсіпаються на з'єднані ребрами повернення і лініями самоперетинання «ластівчині хвости».

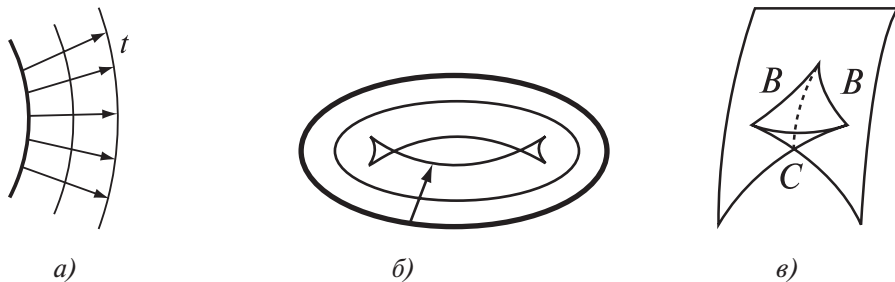


Рис. 1.6. Особливості хвильових фронтів.

«Ластівчин хвіст» можна визначити як безліч усіх точок (a, b, c) , таких, що багаточлен x^4+ax^2+bx+c має кратний корінь. У цієї поверхні є ребро повернення (В на рис. 1.6.в) і лінія самоперетинання (С на рис. 1.6.в). Його можна одержати з просторової кривої $A=t^2, B=t^3, C=t^4$: він утворений усіма її дотичними.

Вивчення метаморфоз хвильового фронту при його поширенні в тривимірному просторі зводиться, головним чном, до дослідження перетинів великого (тривимірного) хвильового фронту в чотиривимірному просторі-часі тривимірними ізохронами. Вивчення метаморфоз хвильових фронтів було однією з задач, з розв'язання яких виник такий розділ математики, як теорія катастроф [39]. Поряд з хвильовими фронтами процес поширення збурювання у просторі описується за допомогою систем променів. Наприклад, поширення збурювання усередину еліпса можна описати за допомогою сімейства внутрішніх нормалей до еліпса. Це — сімейство ліній, що обгинає. Лінія сімейства променів, що обгинає, називається каустикою.

Вплив каустик хвильових фронтів на їхню форму та пов'язані з цим ускладнення математичного моделювання акустичних процесів наочно показані в [37]. Таким чином, особливості видозміни форм фронтів випромінювань, що наведені вище, повинні буди враховані при побудові математичної моделі процесів розповсюдження звуку в будь-якому середовищі. Треба констатувати, що зробити це дуже важко.

1.7. Ще про математичні моделі в акустиці...

Особливим чином можна виділити графічні методи моделювання в акустиці, представлені шумографом — спеціально розробленими номограмами, що узагальнюють дані відомих аналітичних залежностей поширення шуму в міській забудові, що самі по собі, як відзначалося вище, мають істотні недоліки. Шумограф I [40] призначений для побудови карт шуму при магістральних територіях, тобто описує зниження шуму від лінійного джерела. Однак, він визначає це зниження на відкритій території залежно від інтенсивності руху транспорту на магістралі, що не відповідає вимогам сучасних нормативних документів і не враховує ряд інших факторів, що впливають на поширення шуму. Шумограф II [41] може бути застосований для побудови кривих рівного рівня звукового тиску на висоті 1,5 м над поверхнею території (як з урахуванням наявності забудови, так і без нього), а також для оперативної укрупненої оцінки шумового режиму багатоповерхової забудови і містить номограми для визначення рівня звуку (у дБА) від точкових і лінійних ДШ на відкритій території, у розривах між будинками, за кутом спорудження, що екранує, і т.д.

Недоліки ті ж, що і вищезазначені для математичних моделей, крім того, обмежена область застосування — такого роду номограми дозволяють здійснити тільки орієнтовану оцінку шумового режиму, причому у вигляді тільки плоскої двовимірної картини, що не враховує рельєф місцевості, особливо обтікання звуковим потоком будинків і споруджень, явищ дифракції, інтерференції та ін. Величина середньоквадратичної похибки результату при порівнянні з даними фізичного моделювання, коливається від 0,25 до 0,9; розбіжності з результатами натурних вимірів більш значні.

Недоліком математичних моделей, окрім неврахування каустик, вказаного в п. 1.6, є їхня складність, що можна ілюструвати на прикладі логічної схеми математичної моделі такого порівняно нескладного випадку, як поширення звуку усередині приміщення, позбавленого взагалі внутрішнього устаткування. Така модель (хоча б у найпершому наближенні, не претендуючи на більш високий ступінь подібності) повинна використовувати математичні описи: АЧХ і характеристики спрямованості джерела звуку; явища спаду інтенсивності на відстані при поширенні прямого звуку; закону відбиття, причому необхідні складні обчислення кута падіння, виходячи з орієнтації поверхонь, що відбивають звук, приміщення і характеристики спрямованості джерела звуку; коефіцієнта відбиття ρ (математичний опис якого в залежності від характеристик середовищ поширення невідомий, відомі тільки емпіричні значення ρ для деяких (обмеженої кількості) матеріалів; попереднє з вищезгаданого у багаторазовому повторі, з урахуванням математичного опису неминуче виникаючих інтерференційних явищ, причому повинна бути визначена кількість можливих відбиттів.

Для програмування комп'ютера на виконання цих завдань необхідно мати висококваліфікований персонал.

Невелика помилка чи неточність при складанні програми, або при введенні дуже великої бази вихідних даних породжує прогресуючу систематичну погрішність, а від грубих помилок (промахів), наприклад, від неврахування якої-небудь особливості хвильових явищ при складанні логічної схеми чи від введення неправильної формули, математичне моделювання взагалі ніяк не застраховане, тому що на відміну від фізичного й аналогового моделювання при ньому відсутній зворотний зв'язок між експериментатором і моделлю.

При аналізі ряду існуючих математичних моделей акустичних процесів, використовуваних при вирішенні завдань боротьби із шумом було виявлено, що вони певним чином спрощують реальну картину поширення шуму від ДШ до об'єкта, що захищається, наприклад, представляють об'єкт — ДШ — промислове підприємство як єдине лінійне, або плоске джерело, що складається з безлічі рівномірно розподілених на його випромінюючій поверхні точкових джерел, зневажаючи такими важливими хвильовими

явищами, як інтерференція і дифракція. У роботах [36, 42] цей же об'єкт — ДШ представлений як просторове джерело, але форма фронту поверхні поширення звукової енергії в її математичному описі значно спрощена в порівнянні з формою натурального хвильового фронту. Каустики, звичайно, не враховані. Це дуже локалізує подібність між моделлю і натурною, позначаючись на вірогідності результатів моделювання. Як правило, коефіцієнт кореляції помилки моделювання не перевищує 0,8 — 0,9.

У роботі [43, с. 22], присвяченій проблемам моделювання шуму від автотранспорту на дорогах, указується: «...*Несмотря на использование одинаковых предпосылок, расчеты по разным моделям давали разные результаты из-за отличия в зависимостях между скоростью движения и пиковым уровнем звука.*

Основные недостатки, которые не удалось преодолеть в элементарных моделях: бесконечный участок дороги; скорость движения всех автомобилей, равная средней; автомобили в транспортном потоке, представленные одной моделью; автомобили, движущиеся по одной полосе. Однако применение аналитических методов исследования транспортного шума на простейших моделях необходимо для оценки качественной картины его формирования и распространения, так как позволяет вскрыть основные закономерности происходящих процессов, несмотря на упрощение реальных условий движения транспортных потоков».

Моделювання маловивчених фізичних явищ у процесах випромінювання, поширення і прийому звуку (шуму) ускладнене. Крім складності й громіздкості програмного забезпечення дуже серйозний недолік математичних моделей — те, що вони не є просторово-тимчасовими, динамічними моделями.

2. Аналогія хвильових явищ та хвильових характеристик звукового та оптичного випромінювань

2.1. Загальні поняття про хвилі і характеристики, що визначають хвильові явища

Хвилі — це збурювання, які поширюються з кінцевою швидкістю в просторі, і несуть енергію без переносу речовини.

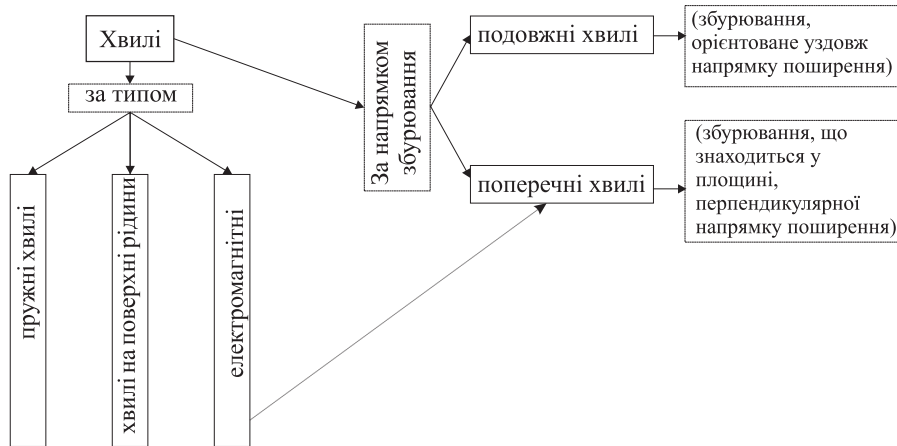


Рис. 2.1. Класифікація видів хвиль за типом та напрямком збурювання.

Звукові хвилі відносяться до так званих пружних хвиль, що являють собою коливання часток пружного середовища. (При порушенні коливань однієї з часток вона стає джерелом поширення хвилі). Поширення пружних хвиль зв'язано з переносом ними енергії. Вектор щільності потоку енергії пружних хвиль (вектор Умова) збігається за напрямком з напрямком переносу енергії і чисельно дорівнює енергії, переданої за одиницю часу через одиницю площі поверхні, перпендикулярної напрямку переносу енергії:

$$I = [w ; c], \text{ Вт/м}^2, \quad (2.1)$$

де w — об'ємна швидкість переносу енергії пружних хвиль;
 c — швидкість переносу енергії в середовищі.

Швидкість розподілу звукових хвиль у середовищі в газах (150 ... 1000 м/с) менше, ніж у рідинах; а в рідинах (2000 ... 6000 м/с) менше, ніж у твердих тілах (750 ... 2000 м/с), — (при цьому для зсувних хвиль швидкість завжди менше, ніж для подовжніх).

Швидкість поширення звуку c залежить від характеристик середовища:

$$c = X / \rho, \text{ м/с},$$

де ρ — щільність середовища поширення, кг/м³; X — характеристика стискальності середовища, Па:

Таблиця 2.1

Характеристика стискальності середовища для різних типів хвиль

Формула	Аргумент	Галузь застосування
$X = E$	(модуль пружності)	для подовжньої хвилі у твердому тілі
$X = G$	(модуль зрушення)	для поперечної хвилі у твердому тілі
$X = \kappa \cdot P$	(добуток показника адиабати κ на тиск P , Па)	для хвилі в газі

Для вирішення завдань прикладної акустики об'єкт досліджень може бути обмежений звуковою хвилею чутного діапазону з довжиною хвилі 1,7 см $< \lambda < 17$ м при дослідженні:

- процесів поширення звуку в просторі: подовжньої хвилі в повітрі;
- процесів ослаблення звуку шумозахисними засобами: сполученням подовжньої і поперечної хвиль у твердому тілі шумозахисного засобу.

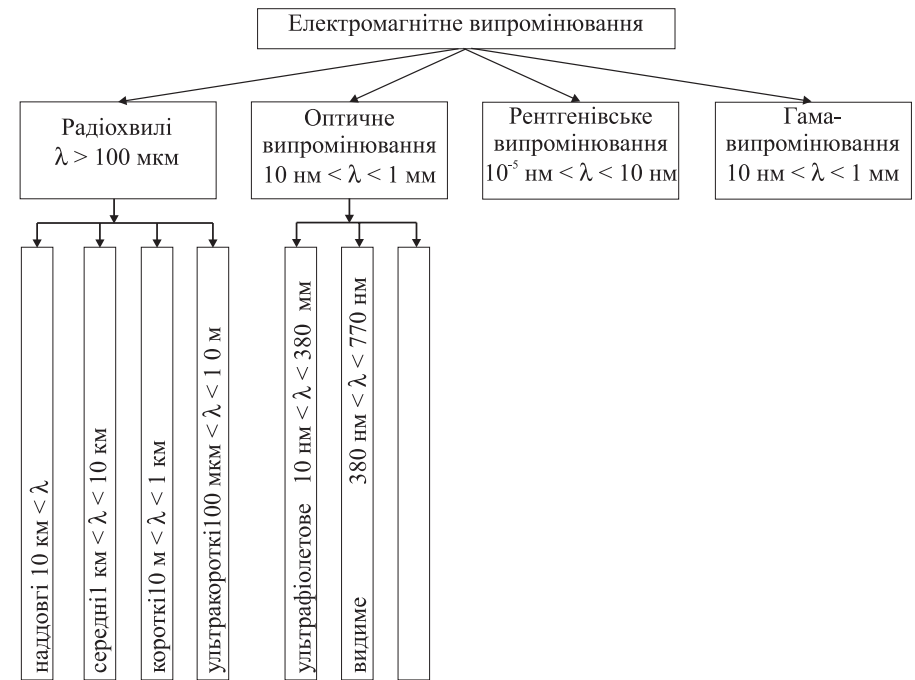


Рис. 2.2. Класифікація електромагнітного випромінювання (ЕМВ) в залежності від довжини хвилі.

ЕМВ, у залежності від джерел випромінювання і способів порушення, а також довжини хвилі λ , характеризується двома векторними функціями координат: напруженостями електричного E і магнітного H полів.

Ці вектори E та H взаємно перпендикулярні і у всякому місці полю коливаються в одній фазі в площині, перпендикулярній напрямку їхнього поширення. Таким чином, світло може розглядатися як поперечна хвиля. Особливості електромагнітних (ЕМ) хвиль (у т.ч. оптичного випромінювання) описуються рівняннями Максвелла, подібними за формою з рівняннями хвильового полю для пружних хвиль, їхнє поширення також зв'язане з переносом ними енергії.

Вектор щільності потоку енергії ЕМВ (вектор Пойтинга) збігається з напрямком переносу енергії і чисельно дорівнює енергії, переданої за одиницю часу через одиницю площі поверхні, перпендикулярної напрямку переносу енергії:

$$I = [E; H], \text{ Вт/м}^2 \quad (2.2)$$

Швидкість розповсюдження ЕМВ дорівнює швидкості розповсюдження світла. Це — гранична швидкість поширення будь-яких фізичних впливів.

Світло (оптичне випромінювання) — частковий випадок ЕМВ, з цього випливає вищевказане.

Швидкість світла у вакуумі (за [44, 45]) складає $c = 299792458$ м/с (на 1980 р.). Швидкість світла c у речовині менше, ніж у вакуумі.

У середовищі швидкість світла залежить від його частоти (довжини хвилі). Розрізняють групову швидкість — тобто швидкість поширення енергії в квазімонохроматичній хвилі, та фазову швидкість, що визначається як:

$$V = c/n^2,$$

(де n — показник переломлення, що в свою чергу дорівнює:

$$n = (\epsilon\mu)^{1/2}; \quad (2.3)$$

тут ϵ та μ — відповідно діелектрична і магнітна проникність середовища (закон Максвелла)).

Швидкість поширення світла c , м/с також залежить від характеристик середовища (наприклад, зменшується зі збільшенням густини речовини). Формули ілюструють вищевказаний взаємозв'язок c світла від характеристик середовища; однак яким саме чином n зв'язується з тими чи іншими параметрами речовини?

Вимірюючи c в речовині, можна визначити її n . В оптичних явищах магнітні властивості речовини не виявляються ($\mu = 1$). Це обумовлено ве-

ликою частотою світлової хвилі (порядку 10^{14} Гц). Оскільки намагніченість речовини виникає в результаті поворотів магнітних моментів атомів і молекул під дією зовнішнього магнітного поля, то при частотах світлової хвилі атоми і молекули не встигають повертатися за час, рівний періоду світлових коливань. Тому в певному наближенні (2.3) перетворюється в $n = \epsilon^{1/2}$.

Те співвідношення добре погодиться з досвідом тільки у випадку газів. Для води, спиртів і для більшості інших твердих і рідких речовин спостерігається відхилення від закону (2.3), якщо в якості ϵ взяти його значення, що відповідає статичним електричним полям. Це зв'язано з тим, що в основі вищевказаної формули (2.3) лежать матеріальні рівняння, що не виконуються для ряду середовищ.

Рівняння справедливі тільки для монохроматичних слабких полів.

Слід зауважити про різницю властивостей різних видів оптичного випромінювання та матеріалів, в яких відбувається розповсюдження таких хвиль (тобто середовища розповсюдження, — залежно від довжини хвилі). Зокрема, оптичні властивості речовин в ГЧ діапазоні значно відрізняються від їхніх еквівалентних властивостей у видимому діапазоні. Наприклад, шар води в декілька см непрозорий для випромінювання з $\lambda > 1$ мкм.

В ультрафіолетовому діапазоні також можна спостерігати відмінність оптичних властивостей речовин від їхніх еквівалентних властивостей у видимому діапазоні. Так, наприклад, зі зменшенням λ коефіцієнт поглинання α ультрафіолетового випромінювання більшості прозорих (в видимому діапазоні спектру) фізичних тіл зростає, тобто вони стають непрозорими для ультрафіолетового випромінювання; і при $\lambda < 10^5$ нм прозорих тіл практично немає. Коефіцієнт відбиття ρ зі збільшенням α відповідно зменшується.

Головна розбіжність між звуковою хвилею та ЕМВ: звук в повітрі — поперечна хвиля; ЕМВ у всіх випадках, (за теорією Максвелла [46]) — поперечна. В твердих тілах звукова хвиля являє собою комбінацію поперечної та подовжньої компонент. (На границі розподілу середовищ: "повітря — тверде тіло" звукова хвиля, подовжня в повітрі та рідині, перетворюється на поперечну).

Як згадувалося вище, між процесами розповсюдження звукового та оптичного випромінювання існує певна аналогія [47, 48]. Так, наприклад, у [49] на с. 292 указується: «Геометрическая акустика — раздел акустики, в котором изучается распространение звука на основе представлений о звуковых лучах. Законы геометрической акустики аналогичны законам геометрической оптики». Геометрична оптика, у свою чергу — «это раздел оптики, в котором распространение света рассматривается на основе представлений о световом луче как линии, вдоль которой распространяется световая энергия. Законы геометрической оптики применяются для расчетов построения изображений при прохождении света через оптические системы».

Якщо світло — частковий випадок ЕМВ, та встановлена аналогія між розповсюдженням звуку та світла, логічно припустити, що існує аналогія між акустичними та електромагнітними хвилями?

Існування цієї аналогії ми застосували в [24, 25] — див. п. 1.4, але потрібне, насамперед, її детальне наукове обґрунтування.

«Несмотря на разную природу, все волны подчиняются общим закономерностям» [50]; і в ствердження цього положення автором була досліджена аналогія між хвильовими явищами звукового й електромагнітного випромінювань, оскільки якісні характеристики моделей грають не менш важливу роль, аніж їхні кількісні характеристики. Розглянемо найбільш характерні хвильові явища [47, 51].

В якості ЕМВ в більшості нижчезгаданих приладів моделювання обрано саме світло (оптичного діапазону), тому як властивості оптичного випромінювання найбільш типові, характерні і вивчені з точки зору класичної фізики.

Аналогія між світлом та звуком розглядається також в роботах інших авторів, наприклад, в фундаментальній роботі [52].

2.2. Аналогія хвильових явищ звукового й електромагнітного випромінювань

2.2.1. Аберация (оптичних систем) — перекручування зображення, викликані неідеальністю оптичної системи: зображення не видно чітко, неточно відповідає об'єкту чи пофарбовано. Розрізняють: геометричні аберации (сферична аберация, кома, кривизна поля, дисторсія); хроматичні аберации; дифракційні аберации.

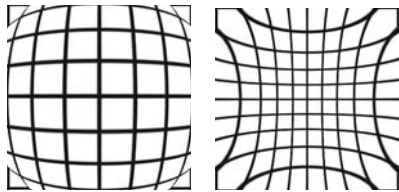


Рис. 2.3. Різновиди абераций оптичних систем.

В астрономії поняттю «аберація світла» надається трохи інше значення — зміна напрямку світлового променя через рух джерела і приймача світла один щодо одного. Аберація світла викликає зсув видимого положення світила на небесній сфері. В акустиці відповідний термін просто відсутній у зв'язку з відсутністю його області застосування в тій галузі.

2.2.2. (Оптична) анізотропія — розходження оптичних властивостей середовища залежно від напрямку поширення в ньому світла і від поляри-

зації цього світла. Виражається в подвійній променезаломлюваності; обертанні площини поляризації. Наведена оптична анізотропія виникає в ізотропних середовищах під дією зовнішніх полів, що виділяють у середовищі певні напрямки електричного поля: ефекти Керра; Коттона — Муттона; Фарадея; а також під дією поля пружних сил (фотопружність).

2.2.3. Взаємозв'язок коефіцієнтів відбиття ρ , поглинання α і пропусцення τ .

Відповідно до закону збереження енергії інтенсивність хвилі, що падає $I_{пад}$, Вт/м², що попадає на яку-небудь перешкоду, перерозподіляється таким чином: частково відбивається $I_{відб}$; частково поглинається усередині середовища перешкоди $I_{погл}$; частково проходить наскрізь $I_{прон}$;

$$I_{пад} = I_{відб} + I_{погл} + I_{прон}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2.4)$$

Відношення $I_{відб}$, $I_{погл}$, і $I_{прон}$ до $I_{пад}$ відповідно носять назви: ρ — коефіцієнт відбиття, α — (іноді називаний альбедо):

$$\rho = I_{відб} / I_{пад}; \quad (2.5)$$

α — коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = I_{погл} / I_{пад}; \quad (2.6)$$

τ — коефіцієнт пропусцення:

$$\tau = I_{прон} / I_{пад}. \quad (2.7)$$

Відповідно, залежність 2.4 (згідно до закону збереження енергії) має вид:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (2.8)$$

2.2.4. Відбиття звуку або світла полягає в поверненні хвилі при зустрічі з границею розподілу 2-х середовищ з різними щільністю і стискальністю «назад» у перше середовище [49]. Для усіх видів хвиль правомірний закон відбиття: кути падіння φ і відбиття φ' рівні; відбитий промінь, промінь, що падає, і перпендикуляр, відновлений у точці падіння, лежать у одній площині.

$$\varphi = \varphi' = \text{const.}$$

Ця залежність справедлива як у випадку дзеркального (розміри l нерівностей на поверхні розподілу менше λ), так і дифузійного ($l > \lambda$) відбиття [44]. При дзеркальному відбитті поверхня, що відбиває світло, невидима; бачимо тільки джерела світлових променів. Кожен окремий промінь, що падає, при дифузійному відображенні підкоряється законам відбиття. Промені, відбиті від ділянок шорсткуватої поверхні, орієнтованих різним чином стосовно променю, що падає, не утворюють рівнобіжного пучка після процесу відбиття. Унаслідок цього поверхня, що відбиває, стає видимою.

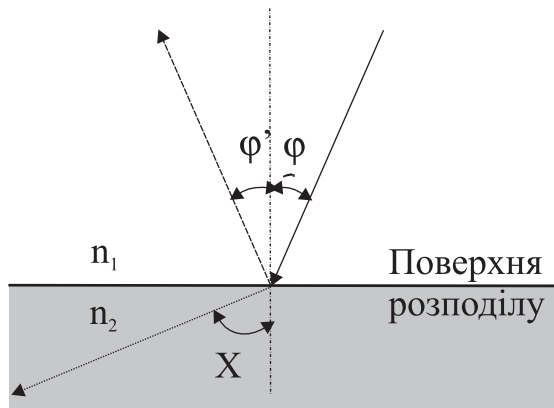


Рис. 2.4. Шляхи відбитого, переломленого променів, та того променю, що падає.

Для законів відбиття світла виконується принцип оборотності ходу світлових променів: промінь світла, що поширюється за шляхом відбитого променя, відбившись в місці падіння від поверхні тіла, поширюється далі за шляхом променя, що падає [45, с. — 420].

Світлові промені, проходячи через границю розподілу двох середовищ з різними показниками переломлення n_1 і n_2 , визнають відбиття і переломлення. Відбитий і переломлений промені виявляються частково лінійно поляризованими. У відбитому світловому промені коливання відбуваються переважно перпендикулярно площини падіння, а в переломленому — у площині падіння (рис. 2.5).

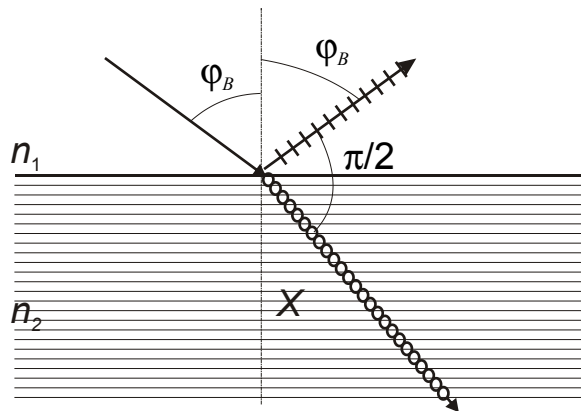


Рис. 2.5. Поляризація при відбитті світла.

Існує такий кут падіння φ_B , називаний кутом Брюстера, при якому відбите світло виявляється цілком лінійно поляризованим. Це явище називається законом Брюстера. Кут Брюстера визначається співвідношенням

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n_{12}, \quad (2.9)$$

де $n_{12} = n_2/n_1$ — показник переломлення середовища, в якому поширюється переломлене світло, щодо середовища, в якому поширюється світло, що падає.

При куті Брюстера відбитий та переломлений промені утворюють прямий кут:

$$\varphi_B + \varphi = \pi/2.$$

Відбиття під кутом Брюстера являє собою найпростіший спосіб одержання поляризованого світла. Відбите світло лінійно поляризоване так, що коливання його хвилі відбуваються в площині, перпендикулярній площині падіння.

2.2.5. Дисперсія — залежність швидкості хвиль c у речовині від частоти f .

Область нормальної дисперсії характеризується збуванням швидкості c зі збільшенням f :

$$dc / df < 0;$$

область аномальної дисперсії — збільшенням c зі збільшенням f :

$$dc / df > 0$$

Для світла дисперсія визначається як залежність показника переломлення n речовини від частоти f . В області частот світла, для яких речовина прозора, n зростає зі збільшенням f :

$$dn/df > 0$$

— нормальна дисперсія, а в області, де n убуває зі збільшенням f :

$$dn/df < 0$$

— аномальна дисперсія.

Унаслідок дисперсії вузький пучок світла, проходячи крізь призму, розширюється і розкладається на спектральні складові — кольори (дисперсійний спектр). Що ж стосується поширення звуку в повітрі, — його фазова швидкість c для амплітуд, що звичайно зустрічаються в технічній акустиці при рішенні поставлених завдань, є частотно-незалежною, тобто вона вільна від дисперсії. Явище дисперсії звуку в газах виявляється в області ультра- і гіперзвукових частот і при дуже великих амплітудах, що ведуть до нелінійних процесів.

2.2.6. Дифракція — обгинання хвилями перешкод, що включає як порушення прямолінійності поширення, так і супровідні йому інтерференційні явища при розмірах перешкоди, порівнянних з довжиною хвилі λ . При цьому хвиля заходить за перешкоду (в область геометричної тіні). Властива усякому хвильовому руху. У більш широкому змісті під дифракцією розуміють сукупність явищ, що спостерігаються при проходженні хвиль через середовища із сильно вираженими неоднорідностями.

Розрізняють два види дифракції — в точці спостереження, що перебуває на кінцевій відстані від перешкоди, (тобто дифракцію Френеля); в віддалених між собою точці спостереження й джерелом, що розташовані від перешкоди так далеко, що промені, які падають на перешкоду, і промені, які йдуть у точку спостереження, можна вважати паралельними пучками, (тобто дифракцію Фраунгофера). Строге вивчення дифракції хвиль на основі рішення хвильових рівнянь, доповнених граничними умовами, що враховують неоднорідності середовища, є дуже складним завданням. Тому для аналізу явища використовують принцип Гюйгенса-Френеля: кожне місце хвильового фронту в даний момент часу можна розглядати як джерело вторинних хвиль, що є когерентними. Відповідно до цього принципу кожне місце середовища, що занурене в хвильовий рух, є джерелом нової хвилі, яка підлягає інтерференції. Явище інтерференції спостерігається і при проходженні хвилі через вузьку щілину. Принцип Гюнгенса- Френеля не може бути застосований, якщо на поверхні перешкод змінюється розподіл інтенсивності хвиль.

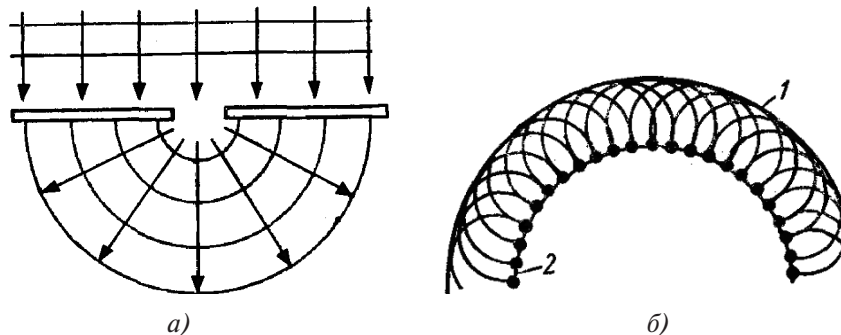


Рис. 2.6. Дифракція: а — при падінні хвилі на екран з вузькою щілиною; б — фронт хвилі, що спостерігається (крива 1) — як результат додавання цих вторинних хвиль, що надходять від джерела хвильового збурювання (крива 2).

2.2.7. Дихроїзм, різне фарбування одноосьових кристалів у білому світлі при спостереженні уздовж оптичної осі й перпендикулярно до неї. Порозумівається неоднаковим поглинанням звичайних і незвичайної (про такі

визначення докладніше — див. далі) світлових хвиль. Круговий дихроїзм — різне поглинання світла правої й лівої кругових поляризацій. Дихроїзм — окремий випадок плеохроїзма, властивості анізотропних тіл, напр. кристалів, виявляти різне фарбування при розгляданні їх у білому світлі в різних напрямках. Обумовлений розходженням спектрів поглинання речовини для променів, що мають різний напрямок і поляризацію. Дихроїзм (а також плеохроїзм) — різниця поглинання речовиною світла в залежності від орієнтації його вектора E — наприклад, при поляризації світла. Виходячи з цього автором уперше була передвіщена гіпотетична можливість дихроїзму звуку при його поляризації [22]. Інші відомості, надавані в будь-яких офіційних джерелах (матеріалах досліджень інших авторів), відсутні [53].

2.2.8. Доплера ефект характерний для будь-яких хвиль: при наближенні джерела хвиль до приймача зменшується частота хвилі f , Гц (а при видаленні — збільшується) на величину:

$$f - f_0 = (V \cdot f_0) / c, \text{ Гц}, \quad (2.10)$$

де f_0 — вихідна частота хвилі джерела, Гц;
 V — відносна швидкість руху джерела і приймача, м/с;
 c — швидкість поширення хвиль, м/с.

В деяких джерелах при описі ефекту Доплера вказується, що при наближенні або при видаленні джерела хвиль до приймача змінюється довжина хвилі λ , м на величину λ_0 . Там звичайно (помилково) надається формула (2.10) приблизно в такому ж вигляді, але з підставленими замість f та f_0 значеннями λ та λ_0 відповідно. Вважаємо таку позицію неправильною, та такою, що надає приклад формального підходу до розгляду цієї проблеми з боку деяких недалювидних вчених. Дійсно, f та λ зв'язані між собою залежністю $c = \lambda f$, тому (2.10) чисто формально можна перетворити, записавши λ в ньому замість f , (і таке перетворення буде формально математично правильним). Але таке розуміння не враховує фізики процесу.

Наприклад, коли човен рухається за течією, він за окремий проміжок часу зустрічає визначену кількість водяних хвиль, що б'ються об його борти, (тобто має місце фіксована частота таких зустрічей f_0). Хвилі рухаються в напрямку течії, та характеризуються визначеними швидкістю поширення $c = \text{const}$, м/с та довжиною хвилі $\lambda = \text{const}$, м. Відносна швидкість руху джерела і приймача в такому разі дорівнює $V=0$, м/с; формула (2.10) діє, але немає сенсу, оскільки ніякого зменшення або збільшення частоти не відбувається, тобто $f=f_0$. Коли той же самий човен рухається вже проти течії (проти напрямку розповсюдження хвиль), він набуває відносної швидкості руху джерела і приймача V , що не дорівнює 0, м/с, і формула (2.10) починає діяти, тобто частота зустрічей човна із хвилями, що рухаються в протилежному напрямку, яким чином, змінюється. Ото і є той самий ефект Допле-

ра за формулою (2.10)! Однак ніякого зростання або зменшення довжини хвилі λ на величину λ_0 при тому бути не може, оскільки хвилі на поверхні води — ті ж самі, їхня форма та всі інші параметри залишилися незмінними! Застосовуючи літературний прийом, можна казати так: «Хвилі належать водоймі» (тобто морю, річці та ін.) Як же при тому при русі назустріч човну може змінюватися їхня довжина? Якими вони є, такими вони і лишаються... Змінюється тільки-но частота зустрічей човна із хвилями f , довжина хвилі λ при тому залишається незмінною.

2.2.9. Імпульс хвильовий — однократне збурювання, що поширюється в просторі чи середовищі. Звуковий імпульс — раптове і швидко зникаюче підвищення тиску; світловий імпульс (окремий випадок електромагнітного імпульсу) — короткочасне ($< 0,01$ с) випущення світла джерелом оптичного випромінювання.

2.2.10. Інтерференція — компонування декількох хвиль на основі принципу суперпозиції [44], причому:

$$\delta = K \cdot \lambda, \text{ м}, \quad (2.11)$$

— умова посилення інтенсивності хвиль;

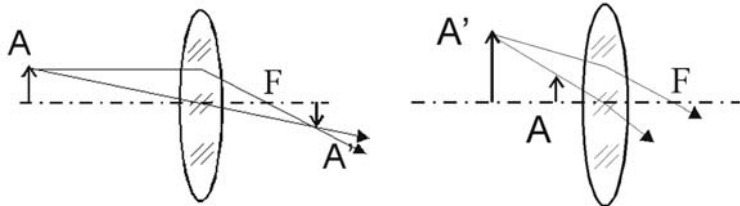
$$\delta = (2K + 1) \lambda / 2, \text{ м}, \quad (2.12)$$

— умова гасіння інтенсивності хвиль:

де δ — різниця ходу двох хвиль в області суперпозиції;

K — ціле число ($K = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$).

2.2.11. Зображення (оптичне), тобто зображення об'єкта, одержуване в результаті дії оптичної системи на світлові промені, що випускаються об'єктом чи відбивані ним. Воно відтворює контури і деталі об'єкта з деякими перекручуваннями (абераціями оптичних систем). Розрізняють дійсні і мнимі оптичні зображення.



а)

б)

Рис. 2.7. а — дійсне перевернене зображення об'єкту А, б — миме зображення А' об'єкту А, утворені лінзою: F — фокус лінзи; А' — зображення.

2.2.12. Когерентність, погоджене протікання в часі декілька коливальних (хвильових) процесів. Якщо різниця фаз 2 коливань залишається постійною в часі чи міняється за певним законом, то коливання називаються когерентними. Коливання, у яких різниця фаз змінюється безладно і швидко в порівнянні з їхнім періодом, називаються некогерентними. Джерелом когерентних коливань, наприклад, є лазер (у т.ч. акустичний [54]).

2.2.13. Модуляція коливань, зміна амплітуди, частоти, фази й інших характеристик коливань (наприклад, поляризації монохроматичних світлових коливань) за заданим законом, повільна в порівнянні з періодом цих коливань. Модуляція коливань використовується для передачі інформації. Переносник сигналу в даному випадку — синусоїдальні коливання високої (несущої) частоти, — амплітуда, частота чи фаза яких модулюється сигналом, що передається. Зокрема, модуляція світла — це зміна інтенсивності світлового потоку в часі.

2.2.14. Люмінесценція — світіння речовин, надлишкове над їхнім тепловим випромінюванням при даній температурі і збуджене яким-небудь джерелом енергії. Виникає під дією світла, радіоактивного і рентгенівського випромінювання, електронного поля, при хімічних реакціях, і при механічних впливах. Як правило, люмінесценція задовольняє закону Стокса: довжина хвилі світла люмінесценції λ' більше довжини хвилі λ збудливого світла.

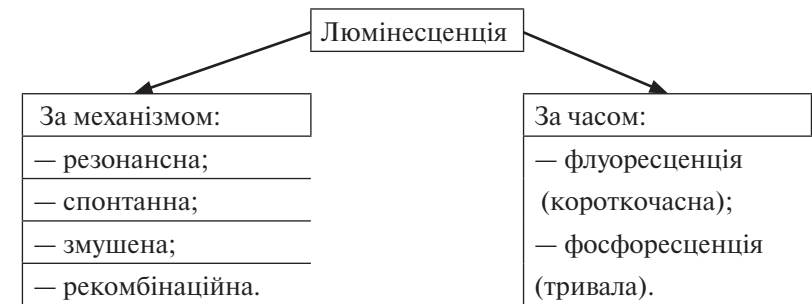


Рис. 2.8. Класифікація різновидів люмінесценції.

2.2.15. Обертання площини поляризації — впливає з фізики процесу поляризації хвиль, але іноді розглядається як самостійне явище. Являє собою поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла при його проходженні через речовину, і спостерігається в оптично активних речовинах, а також у речовинах, що знаходяться у магнітному полі.

Речовини, що здатні повертати площину поляризації світлових хвиль, які падають на них, називають оптично активними. Оптично активними можуть бути як рідкі речовини і гази, так і кристали. Кут повороту площини-

ни поляризації α лінійно поляризованої хвилі пропорційний довжині шляху світла в речовині l .

Оптично неактивні речовини під дією магнітного поля здобувають здатність обертати площину поляризації світла, що поширюється уздовж напрямку поля (ефект Фарадея). Магнітне обертання площини поляризації порозумівається асиметрією оптичних властивостей речовини, що виникає під дією магнітного поля. Розрізняють правий і лівий напрямки обертання площини поляризації з погляду спостерігача, що дивиться назустріч проміню. Вимір куту повороту α дозволяє визначати концентрації розчинів.

Таким чином, існує базовий матеріал для багатообіцяючих наукових досліджень: якщо є обертання площини поляризації для світла, — чому ж не припустити, що аналогічне явище можливе і для звуку? Основне завдання при дослідженні у даному напрямку полягає в тому, щоб виявити такі умови, — (підібрати відповідні сполучення матеріалів), щоб згідно [55], що передбачає поляризацію звукових хвиль, експериментальним шляхом підтвердити існування даного, невідомого раніше (сугобо стосовно до звуку) хвильового явища. Усе це — досить просто; і, за умови належного експерименту в лабораторних умовах, здатного підтвердити існування даного явища в акустиці, з використанням матеріалів [55], — може зробити справжній переворот в науці!

2.2.16. Опалесценція є особливою формою розсіювання світла. Це — різке посилення розсіювання світла чистими речовинами (газами чи рідинами) у (так званих) критичних станах, а також розчинами при досягненні критичного стану чи злиття. Порозумівається різким зростанням стискальності речовини, у результаті чого в ній збільшується число флуктуацій щільності, на яку розсіюється світло (прозора речовина стає мутною). Критичний стан тут — стан двох рівноважно відсутніх фаз, по досягненні якого вони стають тотожними за своїми властивостями.

2.2.17. Переломлення хвиль — зміна напрямку поширення хвиль через границю 2-х середовищ. Кути падіння φ і переломлення X (рис. 2.4) зв'язані таким чином%

— для пружних (звукових) хвиль:

$$\sin \varphi / \sin X = c_{i-1} / c_i;$$

— для світлових хвиль:

$$\sin \varphi / \sin X = (n_i / n_{i-1}) / (c_{i-1} / c_i) \quad (2.13)$$

де n_{i-1} і n_i ; c_{i-1} і c_i — відповідно, показники переломлення в середовищах $i-1$ і i ; та швидкості поширення хвиль у середовищах $i-1$ і i , м/с.

В обох випадках виконується закон переломлення Снеліуса — переломлений промінь знаходиться у площині, проведеної через промінь, який

падає, і перпендикуляр до границі в місці падіння, а відношення $\sin \varphi$ до $\sin X$ в для даних середовищ не залежить від φ , але залежить від довжини хвилі. Таким чином, так звана довжина сліду хвилі $\lambda / \sin \varphi$ не залежить від середовища. Наслідками закону Снеліуса є те, що при переході променя світла з оптично більш щільного в оптично менш щільне середовище $X > \varphi$ переломлений промінь відхиляється від перпендикуляра до границі розподілу двох середовищ у місці падіння променя; а при переході променя світла з оптично менш щільного в оптично більш щільне середовище $X < \varphi$ переломлений промінь наближається до перпендикуляра до границі розподілу двох середовищ у місці падіння променя.

2.2.18. Плеохроїзм — властивість анізотропних тіл, наприклад, кристалів, виявляти різне фарбування при розгляданні їх у білому світлі в різних напрямках. Обумовлена розходженням спектрів поглинання речовини для променів, що мають різний напрямок і поляризацію. Частковим випадком плеохроїзму є дихроїзм. Явище дихроїзму звуку в науковій літературі ніде не описане. Уперше теоретична можливість існування такого явища передвіщена автором цієї роботи [1].

2.2.19. Повне внутрішнє відбиття відбувається у всіх видів хвиль [50] при їхньому похилому падінні на границю розподілу 2-х середовищ при переході випромінювання із середовища $i-1$ з меншою швидкістю поширення c_{i-1} , м/с у середовище i з більшою швидкістю поширення c_i , м/с при перевищенні фактичним кутом падіння φ його граничного значення, обумовленого як:

$$\sin \varphi_{\text{гп}} = c_{i-1} / c_i; \quad (2.14)$$

де $\varphi_{\text{гп}}$ — граничне значення кута падіння.

На базі [44, с. — 243, 273] можна вказати, що при переході із середовища $i-1$, що характеризується меншою швидкістю поширення поперечних звукових хвиль у середовище i з більшою швидкістю поширення поперечних звукових хвиль, $X > \varphi$; переломлений промінь і відхиляється від нормалі, причому кут падіння φ не може перевищувати деяке граничне значення $\varphi_{\text{гп}}$, тому що $\sin \varphi$ не може бути > 1 . Якщо фактичне значення $\varphi > \varphi_{\text{гп}}$, згідно [44, с. — 273] відбувається повне внутрішнє відбиття, і вся енергія звукової хвилі i відбивається назад у те середовище $i-1$, звідки вона прийшла, маючи швидкість поширення $c_{i-1} < c_i$.

Взаємозв'язок кута падіння і кута переломлення при повному внутрішнім відбитті хвиль легко може бути обчислений за відомими залежностями. Так, у роботі [56] прямо вказується, наприклад: «Правильнее было бы назвать предельным углом тот угол падения, при котором угол преломления светового пучка, вошедшего в оптически менее плотную среду — если бы он существовал — был бы менее $\pi/2$ ».

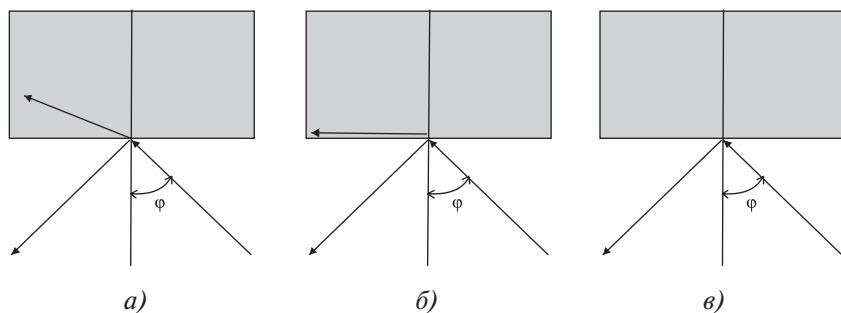


Рис. 2.9. Відбиття хвиль при різних кутах падіння: а) кут падіння менше граничного значення: $\varphi < \varphi_{\text{гр}}$; б) кут падіння дорівнює граничному значенню: $\varphi = \varphi_{\text{гр}}$; в) кут падіння більше граничного значення: $\varphi > \varphi_{\text{гр}}$.

Щодо випадків, представлених на рис. 2.9.а і рис. 2.9.в, усі порівняно просто. Однак не завжди зрозуміло, куди ж подінеться переломлений промінь згідно рис. 2.9.б?

Виявляється, Л. І. Мандельштам ще в 1914 р. поставив експеримент, який показує, що при повному відбитті світло проникає на невелику глибину з оптично більш щільного в оптично менш щільне середовище [56]. Цим же займався Ейхенвальд А.А. [57]. Побудована ним теорія показує, що при повному внутрішньому відбитті ЕМ хвиля частково проникає в оптично менш щільне середовище, причому глибина проникнення порівняна з λ і залежить від φ світла і n граничних середовищ. При цьому уздовж границі розподілу середовищ поширюється своєрідна поздовжньо-поперечна хвиля. Виявляється також, що хвиля, яка падає на границю розподілу при повному внутрішньому відбитті, частково «поринає» в оптично менш щільне середовище і, пройшовши шлях довжиною порядку $\lambda/2$, «зринає назад». Відомо, що якщо два однакових середовища розділені тонким прошарком оптично менш щільного середовища, то при повному внутрішньому відбитті світло в стані переборювати цей прошарок.

2.2.20. Поглинання. Поглинання звуку — явище перетворення звукової енергії у внутрішню енергію середовища, обумовлене теплопровідністю, внутрішнім тертям, в'язкістю і деякими релаксаційними процесами в середовищі при зміні його тиску і температури, викликаними звуковою хвилею.

Поширення звуку в атмосфері викликає обмін імпульсами молекул у різних частинах звукової хвилі, що рухаються з різними швидкостями (класичне поглинання за теорією Стокса-Кирхгофа). Поглинання залежить від частоти джерела звуку, вологості і температури повітря. Вплив поглинання шуму поверхневим покривом при його поширенні над ландшафтом відзначається при висоті місця виміру в межах кута 10° між поверхнею зем-

лі і розрахунковою точкою. Поглинання звуку має значення при поширенні його на відстані ($> 100 \lambda$), — чи, інше, якщо на його шляху маються тіла великої площі.

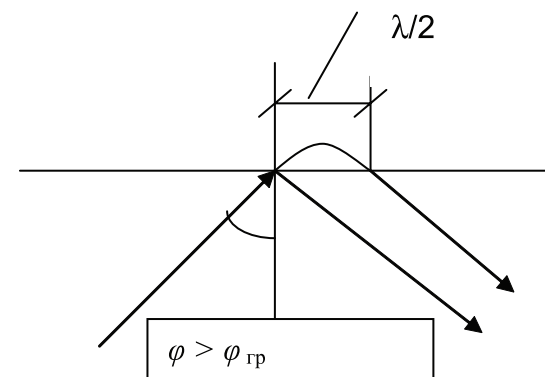


Рис. 2.10. Повне внутрішнє відбиття хвиль в межах вищевказаних доповнень.

Поглинання світла — явище зменшення світлової енергії в речовині, що відбувається внаслідок її перетворення у внутрішню енергію речовини чи в енергію вторинного випромінювання з іншим спектральним складом і напрямками поширення (наприклад, фотолюмінісценція). Воно описується законом Бугера — Ламберта — Бера. Поглинання світла супроводжується нагріванням речовини, іонізацією, фотохімічними процесами і т.д. Поглинута речовиною енергія може бути цілком чи частково перевипромінена фотонами з іншою частотою.

Розглянемо аналогію між логарифмічними одиницями фізичної величини, якими описують поглинання звуку в акустиці та світла в оптиці.

В акустиці прийнято вважати звукопоглинаючими матеріалами такі, у яких $\alpha > 0,2$ (для {найбільш типової} частоти $f = 500$ Гц).

«Всякое ограждение характеризуется величиной звукоизолирующей способности R » [66, с. 58], що зв'язується з коефіцієнтом пропускання τ таким чином:

$$R = 10 \lg(1/\tau), \text{ дБ.} \quad (2.15)$$

Обґрунтовуючи аналогію хвильових характеристик звуку і світла, порівнюємо це (формула (2.15)) з таким відомим поняттям, як «Оптична щільність середовища»:

$$D = \lg(1/\tau), \quad (2.16)$$

де τ — коефіцієнт пропускання звуку та світла відповідно в обох випадках.

2.2.21. Подвійна променезаломлюваність — є специфічним для світлових хвиль і являє собою роздвоєння їхніх променів при проходженні через оптично неоднорідне (анізотропне) середовище, що відбувається внаслідок залежності показника заломлення n від напрямку вектора E світлової хвилі.

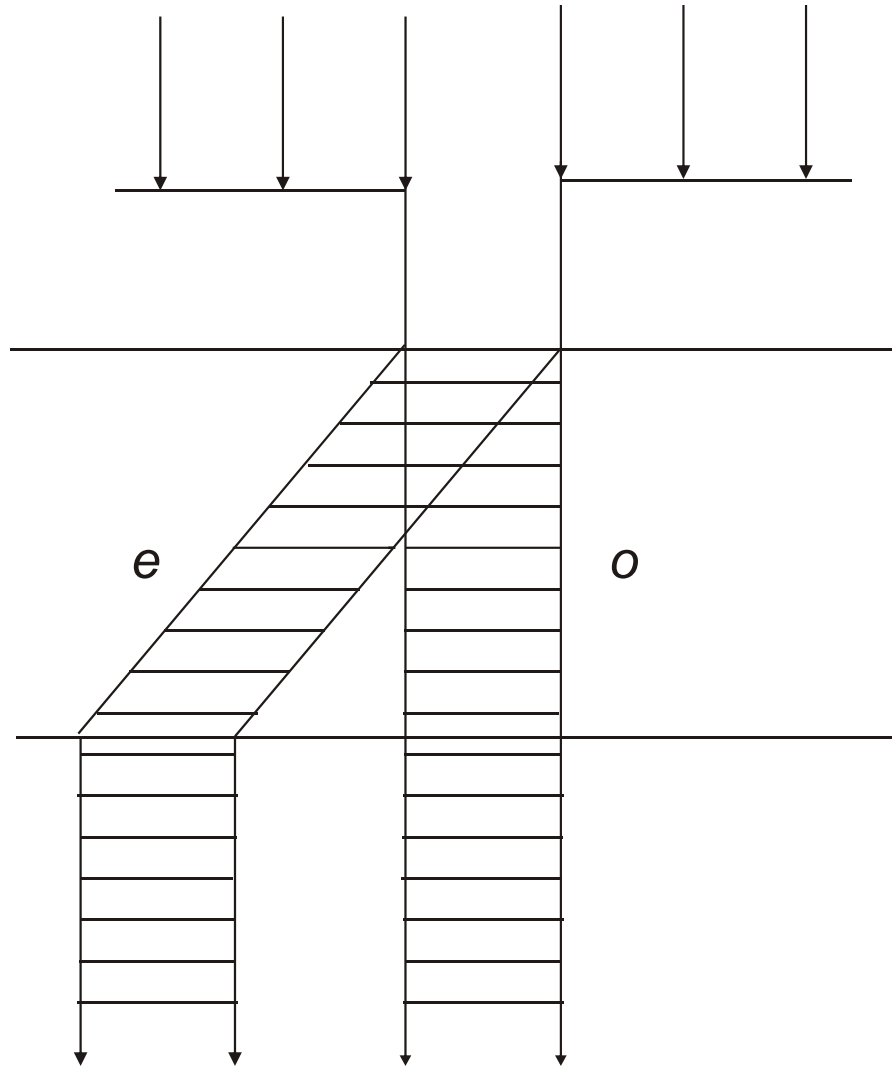


Рис. 2.11. Роздвоєння єдиного променя на два: o та e при явищі подвійної променезаломлюваності в кристалі (та їхня поляризація).

Водноосьовому кристалі один з цих променів (ординарний) підкоряється звичайним законам заломлення світла, інший (екстраординарний) — не підкоряється. Обидва промені плоскополяризовані [50]. Електромагнітна (світлова) хвиля, що падає на кристал з ізотропного середовища, розділяється усередині кристала на дві лінійно поляризовані хвилі: так звану звичайну, вектор електричної індукції E якої перпендикулярний головному перетину; і так звану незвичайну з E , що знаходиться у головному перетині. Таке явище називається подвійною променезаломлюваністю. Під головним перетином кристала розуміють площину, у якій лежать оптична вісь кристала і нормаль до фронту хвилі. Оптична вісь кристала — це той напрямок у кристалі, щодо якого його властивості мають симетрію обертання. Звичайна і незвичайна хвилі поширюються з різною фазовою швидкістю. Ця залежність обумовлена тим, що зі зміною напрямку нормалі до фронту хвилі міняється кут між електричним вектором E і оптичною віссю кристала. Слід зазначити, що уздовж оптичної осі обидві хвилі в кристалі розповсюджуються з однаковими швидкостями. Останнє може служити визначенням оптичної осі кристала.

Речовини, у яких фазова швидкість ЕМ хвиль залежить від напрямку поширення, називаються анізотропними.

Звичайна хвиля підкоряється звичайним законам заломлення світла, а незвичайна заломлюється за іншими законами. Так, якщо на пластинку кристала, вирізану паралельно його оптичній осі, нормально падає світло, обмежене діафрагмою, то незвичайний промінь e випробує заломлення, а звичайний o рухається без заломлення (рис. 2.11).

Хвильові фронти і хвильові нормалі обох променів не заломлюються. Деякі речовини (наприклад, турмалін) поглинають звичайний промінь. Ефект поглинання одного з променів (o чи e) називається дихроїзмом (див вище). Речовини, у яких спостерігається цей ефект, можуть служити поляризаторами чи аналізаторами світлової хвилі.

Поляризатори, що мають малу товщину при великій площі, називаються поляроїдами. Поляроїди — це штучні плівки із сильним дихроїзмом.

Очевидно, для поперечних звукових хвиль у твердих тілах також характерно аналогічне явище. (Це питання ніким не досліджене).

2.2.22. Поляризація — порушення осьової симетрії поперечної хвилі щодо її напрямку поширення. Відома поляризація світла, можлива поляризація звуку у твердому середовищі [55].

Поляризацією світла називають сукупність явищ, у яких виявляється властивість поперечності ЕМ хвиль видимої (оптичної) частини спектра. Хвиля називається поляризованою, якщо в ній існує виділений напрямок коливань. Розрізняють кілька видів поляризації: лінійна, чи плоска поляризація; кругова, чи циркулярна поляризація; еліптична поляризація.

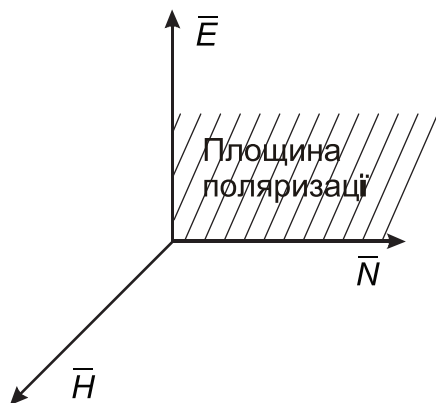


Рис. 2.12. Площина поляризації — площина, що проходить через 2 вектори E і N поперечної ЕМ хвилі.

Поляризація можлива тільки в поперечних хвилях. Плоска світлова хвиля називається лінійно поляризованою, якщо її електричний вектор E увесь час знаходиться в одній площині, у якій розташована нормаль N до фронту хвилі.

За напрямком поляризації світлової хвилі прийнятий напрям вектора напруженості магнітного поля H , а за напрямком коливань — напрям коливань вектора напруженості електричного поля E . Природне світло неполяризоване, тому що воно випромінюється атомами, орієнтованими в просторі довільно. У ньому вектори E , H та N у кожен момент часу взаємно перпендикулярні, але напрям векторів E і H змінюється згодом довільно.

(Повторні) поляризатори, використовувані для дослідження поляризації світла, називають аналізаторами. Так, наприклад, ефект зменшення інтенсивності випромінювання має прояв при проходженні його скрізь пару «поляризатор-аналізатор».

Поляризація подовжніх звукових хвиль у повітрі при моделюванні процесів їхнього поширення в просторі для прогнозування шумового режиму об'єктів, що захищаються, неможлива.

Спеціальні відомості про поляризацію звуку у твердих середовищах, засновані на власних дослідженнях автора, див. в [55].

2.2.23. Реверберація — (багаторазові відбиття) є практичним наслідком поширення звуку і світла в відносно складних умовах. Врахування їх у математичних моделях поширення звуку і світла ускладнене; зневажити цим явищем, — (на відміну від інших, менш істотних), — неможливо, тому що вони в істотній мері визначають якість звучання (в архітектурній акустиці) і загальну освітленість (у світлотехніці) досліджуваного приміщення.

Багаторазове відбиття звуку має спеціальну назву — реверберація. Відомі емпіричні формули, що дозволяють розрахувати час реверберації в даному приміщенні. Так, згідно [35, с. 248 -249] час реверберації визначається за формулами Ейрінга:

$$T = -0,162V / (S \cdot \ln(1 - \alpha')), \quad (2.17)$$

та Себіна (при малих значеннях α'):

$$T = 0,162V / (S - \alpha'), \quad (2.18)$$

де T — час реверберації, с;

V — обсяг приміщення, м³;

S — площа конструкцій приміщення, що обгороджують, м²;

α' — коефіцієнт звукопоглинання поверхні, що характеризує втрати енергії на перетворення в тепло і пропущення (проходження через перешкоду).

У нашій роботі такий коефіцієнт звукопоглинання поверхні (з метою сумісності з загальноприйнятими позначеннями фізичних величин) виражений:

$$\alpha' = \alpha + \tau, \quad (2.19)$$

де α — коефіцієнт поглинання звуку, що характеризує тільки втрати енергії на перетворення в тепло і що виражається за формулою (2.6); τ — коефіцієнт пропущення звуку, що характеризує тільки втрати енергії на проходження її через перешкоду «наскрізь» і що виражається за формулою (2.7).

Таким чином, коефіцієнт звукопоглинання α з формули, наведеної в [35, с. 248 -249] розділений на дві його складові — коефіцієнти α' і τ .

Подібні (за призначенням, але не за змістом) розробки мають у світлотехніці. Насущною проблемою при дослідженні даного хвильового явища, на думку автора, є уніфікація розрахункових формул, що описують багаторазове відбиття. Адже теоретично багаторазове відбиття в обох випадках повинне описуватися однаковими за формою вираженнями? Базовими в цьому випадку, мабуть, повинні з'явитися саме дослідження в області акустики, оскільки там цей матеріал за станом на сьогоднішній день найбільшою мірою пророблений.

2.2.24. Резонанс, різке зростання амплітуди сталих змущених коливань при наближенні частоти зовнішнього гармонійного впливу до частоти одного з власних коливань системи.

При певних значеннях амплітуди сили, яка збуджує, що відноситься до одиниці маси системи, і коефіцієнта загасання, амплітуда змущених коливань є функцією тільки кутової частоти ω сили, що збуджує. При наявності

деякої характерній для даної системи частоті $\omega = \omega_{\text{рез}}$ амплітуда досягає максимального значення. Явище різкого зростання амплітуди змушених коливань A при частотах сили, що збуджує, близьких до $\omega_{\text{рез}}$, називається резонансом. Величина $\omega_{\text{рез}}$ називається резонансною циклічною частотою.

2.2.25. Рефракція хвиль — скривлення напрямку поширення хвиль у середовищі, швидкість хвиль у якому є безупинною функцією координат.

Рефракція звуку в атмосфері обумовлена просторовими змінами температури повітря, швидкості і напрямки вітру. Оскільки швидкість вітру змінюється з висотою, а швидкість поширення звуку дорівнює векторній сумі швидкості звуку в нерухомому середовищі і швидкості вітру, траєкторії звукових променів мають вид: вигнутих униз кривих при поширенні їх у напрямку вітру; вигнутих нагору кривих при поширенні проти вітру, причому виникає зона звукової тіні.

Оскільки швидкість звуку залежить від температури, на поширення звуку також впливає зміна температури при зміні висоти. Згідно [58], результати впливу градієнтів температури і швидкості вітру взаємно доповнюються. Також згідно [59, 60] вплив турбулентності атмосфери збільшується майже в лінійній залежності від відстані пропорційно квадратному кореню з частоти f звуку. Рефракція світла в атмосфері обумовлена зміною її щільності залежно від висоти. У роботі [61] відзначається, що вплив атмосфери на пронизуючий її промінь штучного ДС зводиться до поглинання і розсіювання, а рефракційні явища грають зовсім незначну роль і можуть не прийматися в увагу.

2.2.26. Розсіювання хвиль — явище, що спостерігається при їхньому поширенні в середовищі з безладно розподіленими неоднорідностями і таке, що полягає в утворенні вторинних хвиль, що поширюються по можливих напрямках, слабшаючи в середовищі.

Коли звукові хвилі попадають на великі плоскі перешкоди (з радіусом кривизни більшим ніж λ), вони відбиваються; якщо перешкода мала в порівнянні з λ , відбувається їхнє розсіювання. Можливо дифузійне розсіювання звуку на невеликих перешкодах, що самі по собі не утворюють яскраво виражену звукову тінь, однак розсіюють частину звукової енергії в різних напрямках (наприклад, зниження шуму зеленими насадженнями й ін.).

Розсіювання світла — відхилення світлового пучка, що поширюється в середовищі, у всіляких напрямках. Обумовлено неоднорідністю середовища і взаємодією світла з частками речовини, при якому міняються просторовий розподіл інтенсивності, частотний спектр і поляризація світла. Розрізняють: розсіювання Релею; молекулярне розсіювання; комбінаційне розсіювання (ефект Рамана); опалесценцію.

У більш широкому змісті розсіювання світла — перетворення його речовиною, що супроводжується зміною напрямку його поширення і що

виявляється як невласне світіння речовини, обумовлене змушеними коливаннями електронів в атомах середовища, що розсіює, при дії падаючого на них світла, (наприклад, явище Комптона).

Розсіювання світла відбувається при його поширенні в оптично неоднорідному середовищі, показник переломлення n якої нерегулярно змінюється від одного до іншого місця середовища за рахунок флуктуацій щільності (молекулярне розсіювання) чи за рахунок присутності в ньому сторонніх тіл (розсіювання світла в мутному середовищі). Існує також комбінаційне розсіювання світла кристалами, рідинами і газами, при якому для монохроматичного світла з частотою f , Гц у спектрі розсіяного світла мають додаткові частоти $f \pm f_i$, де f_i — постійна, не залежна від частоти f світла, що розсіюється, і та, що являє собою власну частоту коливань молекул речовини, що розсіюється, відповідної інфрачервоної області спектра. Відповідно до теорії молекулярного розсіювання світла Релея — Кабана [61, 62], коефіцієнт ослаблення чистого повітря приблизно пропорційний λ^{-3} . Відхилення від цього закону, обумовлені залежністю поляризації молекул від λ , у видимій області спектра порівняно невеликі.

2.2.27. Самофокусування. Явище полягає в зменшенні розходження чи збільшенні збіжності променів ЕМ і звукових хвиль через появу поперечного градієнта нелінійного показника переломлення і виникнення нелінійного хвилеводу, що зменшує світіння пучка при порівняно великій потужності випромінювання [63, с. — 322-323].

2.2.28. Солітони — структурно стійка відокремлена хвиля, що поширюється в нелінійному середовищі. Солітони поводяться подібно часткам (часткоподібна хвиля): при взаємодії один з одним чи з деякими іншими збудженнями вони не руйнуються, а розходяться, зберігаючи свою структуру незмінною. При деяких умовах, коли, наприклад, хвилі переносять велику енергію, вони можуть змінювати фізичні властивості середовища, у якому поширюються. Солітон — відокремлена хвиля, що зберігає свою форму і швидкість після зіткнення з іншою такою же хвилею. При зіткненні відокремлених хвиль вони можуть зачіпатися, знищувати одну іншу і випромінювати енергію у вигляді збудувань, що осцилюють. За методом зворотної задачі було показано, що солітони описуються зв'язаними станами задачі розсіювання.

2.2.29. Спад інтенсивності. Процеси поглинання і розсіювання звукового й оптичного випромінювань, як це впливає з вищевикладеного, мають зовсім різну фізичну природу. Проте, згідно [44] для пружних хвиль щільність енергії ϵ складає:

— для сферичних хвиль (точкове джерело звуку):

$$\epsilon \sim 1 / r^2, \text{ Дж} / \text{м}^3; \quad (2.20)$$

— для кругових хвиль (лінійне джерело звуку):

$$\epsilon \sim 1 / r, \text{ Дж/м}^3. \quad (2.21)$$

де r — відстань від місця порушення хвилі, м.

Продовжуючи міркування про перерозподіл енергії в просторі, варто акцентувати увагу на переході до логарифмічних величин.

Так, з (2.20) випливає відома залежність спаду рівнів звукового тиску від точкового джерела, рівна 6 дБ при подвоєнні відстані, тобто інтенсивність звуку убуває пропорційно квадрату відстані, і має місце відома формула (1.12):

$$L = L_0 - 20 \lg (r/r_0), \text{ дБ},$$

де L — шуканий рівень звукового тиску, дБ на відстані r , м від точкового джерела звуку;

L_0 — відомий рівень звукового тиску, дБ на відстані r_0 , м від того ж джерела.

З (2.21) випливає відома залежність спаду рівнів звукового тиску від лінійного джерела [11, с. 19], рівна 3 дБ при подвоєнні відстані (1.13):

$$L = L_0 - 10 \lg r, \text{ дБ},$$

— тобто інтенсивність звуку від лінійного джерела убуває пропорційно першому ступеню відстані.

У той же час для оптичного випромінювання відомо, що при збільшенні відстані від точкового джерела освітленість E , лк убуває пропорційно квадрату відстані [34]:

$$E = I \cdot \cos \varphi / r^2, \text{ лк},$$

де I і φ — відповідно сила світла, кд і кут падіння;

r — відстань, м.

А в роботі [34] відзначається, що для місць, що лежать безпосередньо під лінійним джерелом світла, освітленість, що убуває, пропорційна першому ступеню відстані. Квадратична залежність спаду інтенсивності від точкового джерела має місце не тільки для світла, але і для ін. видів випромінювання, наприклад, випромінювання, що іонізує:

$$D_r = D_0 e^{-\mu r} / r^2, \text{ м бер/год},$$

де D_r — потужність дози γ — випромінювання на відстані r , м від джерела;

D_0 — вихідна потужність дози γ — випромінювання, м бер/год;

μ — лінійний коефіцієнт ослаблення випромінювання в середовищі, см^{-1} .

2.2.30. Ферма принцип: світло поширюється з однієї точки середовища в іншу за шляхом, задля проходження якого затрачається найменший час; впливає із принципу Гюйгенса в граничному випадку нескінченно малої довжини хвилі світла. Він є найбільш загальним принципом геометричної оптики. Всі її закони можуть бути отримані із принципу Ферма.

Звукова хвиля також підкоряється принципу Ферма, тобто звук поширюється з однієї точки середовища в іншу за шляхом, задля проходження якого затрачається найменший час.

2.2.31. Фокусування хвиль, в т.ч.: фокусування звуку — перетворення плоских чи розбіжних звукових хвиль [64] у такі, у що сходяться: (при цьому відбувається концентрація звукових хвиль за допомогою акустичних лінз, концентраторів, і ін., наприклад [54]); фокусування світла — (не вимагають пояснень; приклад можна спостерігати на будь-якому прожекторі).

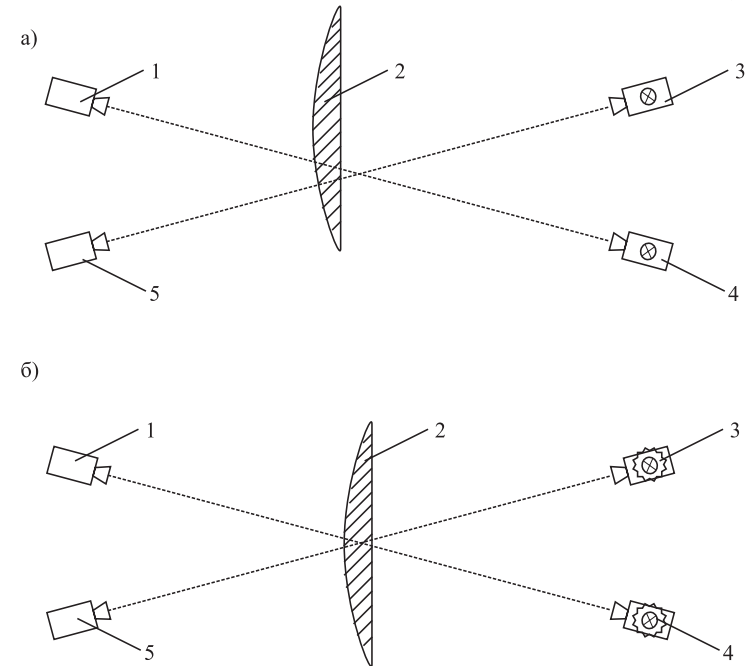


Рис. 2.13. Одночасне фокусування звукових, і радіохвиль: а — неправильне розташування лінзи призводить до відсутності ефекту фокусування; б — одна лінза, що сповільнює, фокусує одночасно звукові хвилі і сантиметрові радіохвилі, випромінювані передавачами, розташованими на схемі ліворуч: 1 — джерело сантиметрових радіохвиль; 2 — лінза задля акустичних і радіохвиль; 3 — приймач акустичних хвиль (з сигнальною лампою); 4 — приймач сантиметрових радіохвиль (з сигнальною лампою); 5 — джерело акустичних хвиль.

Одночасне фокусування і звукових хвиль, і радіохвиль (сантиметрового діапазону) можна продемонструвати експериментально [53]. Для цього потрібен бути побудований експериментальний стенд, схема якого ескізно зображена на рис. 2.13.а, б. Звуковий генератор, акустичний приймач і мікрохвильовий генератор зі своїм приймачем розташовуються, як показано на кресленні, з обох боків лінзи. Коли на шляху хвиль немає лінзи (рис. 2.13.а), сигнали, що надходять до приймачів виявляються занадто слабкими, щоб лампочки променіли. Правильно розташувавши лінзу, ми можемо домогтися того, що обидві лампочки спалахнуть. Коли звукові хвилі і радіохвилі мають однакові довжини (фокальна ширина променю є однаковою — та ж сама для хвиль обох типів), при переміщенні лінзи убік від правильного положення обидві лампочки гаснуть одночасно.

2.2.32. Фото ефекти бувають декількох видів: зовнішній і внутрішній фото ефект, вентиляний фото ефект і ряд інших ефектів. Зовнішнім фото ефектом називають явище виривання електронів з речовини під дією світла, що падає на нього. Внутрішнім фото ефектом називають появу вільних електронів і дірок у напівпровіднику в результаті розриву зв'язків між атомами за рахунок енергії світла, що падає на напівпровідника. Вентильним фото ефектом називають виникнення під дією світла електрорушійної сили в системі, що містить контакт двох різних напівпровідників або напівпровідника й металу. Більш докладно про фізичні процеси, (або «механізми»), що супроводжують фото ефект, можна почитати на [65].

2.2.33. Хвилевід в середовищі розповсюдження — канал, що має різкі границі, уздовж якого поширюються ЕМ чи звукові хвилі. Радіохвилеводом може служити металева труба, діелектричний стрижень; світловодом (як окремий випадок радіохвилеводу) — волокно, тонка нитка серцевина якої має показник переломлення більший, ніж оболонка. Світло у світловоді поширюється в результаті повного внутрішнього відбиття. Акустичний хвилевід діє на тому же принципі. Приклади — переговорна труба на судах, шари повітря в атмосфері чи води в океані, що відрізняються за температурою.

2.3. Висновки

На підставі вищевказаного варто зробити висновок про певну визначену аналогію хвильових явищ звукового й електромагнітного випромінювань (у короткій формі представлена в табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Зіставлення характерних хвильових явищ звукового й оптичного випромінювань (з метою виявлення аналогії між ними)

№ п/п	Хвильові явища	Звук	ЕМВ	Характер протікання
1.	Анізотропія	-	+	тільки для оптичного випромінювання
2.	Взаємозв'язок ρ , α , τ	+	+	Повна аналогія. Впливає з закону збереження енергії
3.	Відбиття	+	+	Аналогічний
4.	Дисперсія	-*	+	тільки для опт. випромінювання
5.	Дифракція	+	+	Аналогічний
6.	Дихроїзм	(+) ?	+	На нашу думку, аналогічний
7.	Доплера ефект	+	+	} Аналогічний
8.	Імпульс хвильовий	+	+	
9.	Інтерференція	+	+	
10.	Зображення (оптичне)	+	+	
11.	Когерентність	+	+	Аналогічний ([54])
12.	Люмінесценція	-	+	тільки для опт. випромінювання
13.	Модуляція коливань	+	+	Аналогічний ([54])
14.	Обертання площини поляризації	(+) ?	+	На нашу думку, аналогічний
15.	Опалесценція	-	+	тільки для опт. випромінювання
16.	Переломлення	+	+	Аналогічний
17.	Плеохроїзм	(+) ?	+	На нашу думку, аналогічний
18.	Повне внутрішнє відбиття	+	+	Аналогічний
19.	Поглинання	+	+	Різний
20.	Подвійна променезаломлюваність	(+) ?	+	На нашу думку, аналогічний
21.	Поляризація	+	+	Виявлено аналогію
22.	Принцип Гюйгенса-Френеля	+	+	Виявлено аналогію
23.	Реверберація	+	+	Математичні описи фізичного явища відрізняються формально, але не за суттю
24.	Резонанс	+	+	Аналогічний

Закінчення табл. 2

№ п/п	Хвильові явища	Звук	ЕМВ	Характер протікання
25.	Рефракція	+	-**	тільки для звук. випромінювання
26.	Розсіювання	+	+	Різний
27.	Самофокусування	+	+	Аналогічний
28.	Солітони	+	+	Мало досліджене
29.	Спад інтенсивності випромінювання	+	+	Аналогічний (від лінійного джерела назад пропорційно 1-й ступеня відстані; від точкового джерела пропорційно 2-й ступеня відстані)
30.	Ферма принцип	+	+	Аналогічний
31.	Фокусування	+	+	Аналогічний; одночасно можна сфокусувати навіть акустичні та електромагнітні хвилі
32.	Фотоефект		+	тільки для опт. випромінювання
33.	Хвилевід в середовищі розповсюдження	+	+	Аналогічний; наявність хвилеводів базується на явищі повного внутрішнього відбиття

Примітка. Умовні позначення в табл. 2.2:

- * — для діапазону АЧХ звуку, використовуваних при рішенні поставлених завдань
- ** — для поширення оптичного випромінювання в атмосфері
- ? — немає даних досліджень інших авторів. Питання вперше підняте здобувачем та його обґрунтування базується на власних міркуваннях здобувача
- + — явище притаманне даному виду випромінювання;
- — явище не притаманне (не характерно для даного випромінювання).

Задля більшості характерних хвильових явищ за нашими дослідженнями можна вважати, що вони мають адекватний характер як в натурному звуковому, так і в модельному ЕМВ. Таким чином, існують передумови задля створення аналогових моделей, що реалізують заміну звуку ЕМВ. Зазначена аналогія є достатньою теоретичною підставою задля аналогового моделювання процесів розповсюдження звуку процесами розповсюдження ЕМВ. Стає можливим конструювання засобів аналогового і квазіаналогового моделювання процесів розповсюдження звуку задля картографування шумового режиму на території населених пунктів, оптимізації конструктивних рішень та підвищення ефективності шумозахисних засобів та вирішення інших завдань.

3. Система констант подібності, що зв'язують хвильові характеристики звуку та ЕМВ

3.1. Необхідність розробки комплексного підходу до опрацювання системи констант подібності

Таким чином, в [1], а також більш докладніше в цій роботі доведено аналогію процесів розповсюдження звуку та світла. Але для моделювання процесів поширення випромінювання треба було розробити систему критеріїв і констант подібності, що зв'язують еквівалентні фізичні величини в моделі та в натурі. Ця система використовувалася при побудові моделей досліджуваних об'єктів, що повинні як можна більш достовірним чином відбивати поведінку тих же самих об'єктів у натурі.

Згідно [50] «два явлення вважаються подібними, якщо по заданим характеристикам одного з них можна отримати характеристики другого масштабним пересчетом, аналогічним переходу від однієї системи одиниць вимірювання до другої».

Відношення еквівалентних величин, що характеризують подібні процеси, постійні в еквівалентні моменти часу в еквівалентних місцях простору, є константи подібності. При аналоговому моделюванні, як і при будь-якій іншій, константи подібності — абстрактні числа, називані масштабами моделювання. Вони в загальному випадку різні для різних величин, але всі однойменні величини в еквівалентних місцях обох систем (натура і модель) і в еквівалентні моменти часу пропорційні однаковим множникам [50]. При їхній підстановці в рівняння, що описують явища в моделі, одержувані рівняння повинні бути тотожні рівнянням, що описують явища в натурі. Частина констант подібності може бути обрана вільно, виходячи зі зручності постановки експерименту (очевидно, що в їхнє число в першу чергу повинен входити масштаб лінійних розмірів c_L), інші визначаються через критерії подібності, що являють собою такі безрозмірні комплекси, які у подібних явищах мають однакові значення, чи через індикатори подібності, які у подібних явищах $= 1$ [67]. У такий спосіб рівняння зв'язку, які описують розглянуте явище, можуть бути перевірені відповідно до відомої так званої першої теореми подібності [68].

За рахунок цього забезпечують однаковий математичний опис явищ і процесів у моделі й у натурі. Установлення цього взаємозв'язку і складає основну складність при синтезі аналогових, і квазіаналогових моделей.

У випадку досліджень за темою нашої роботи завдання полегшувалося тим, що частина критеріїв подібності при АМ була сформульована ще в 1964 р. у роботі [15]. Однак, як відзначалося вище, більший інтерес представляють рівняння взаємозв'язку між модельними і натурними параметрами.

рами, тобто готові розрахункові співвідношення з константами подібності, що зручні для розуміння і застосування, уніфіковані для різних можливих випадків і т.п. При цьому в ході аналізу відомих літературних джерел були знайдені в різних роботах, для різних випадків окремі локальні розрахункові співвідношення, причому деякі з них у різних роботах суперечливі один одному. Очевидно, у роботі [15] була зроблена спроба звести їх у систему, але ця система не відповідає системі одиниць SI і деяким критеріям подібності (помилковість окремих положень роботи [15] див. у [10]). Тому в ході нашої подальшої роботи виникла необхідність у створенні єдиної уніфікованої системи ідеалізованих розрахункових співвідношень, що базувалася б на одиницях і величинах нині діючої системи SI, за рахунок чого досягається: зручність для розуміння користувача і виключення різночитань; наукова (фізична і математична) строгість цих співвідношень; зменшення числа констант подібності, виділення з них так званих основних констант; можливість оцінити ступінь ідентичності математичних описів моделі і природи, тобто виявити ті фізичні величини, для яких подібність досягається, чи навпаки, не досягається, (виявити ступінь подібності моделі природі), і ін. переваги.

Увага була зроблена на те, щоб при перерахуванні констант указувалися всі розмірні параметри. Відомо, що всяку систему рівнянь, що укладають у собі математичний запис законів, що керують фізичними явищами, можна сформулювати як співвідношення між безрозмірними величинами. Усі висновки теорії розмірності будуть зберігатися при будь-якій зміні фізичних законів, представлених у вигляді співвідношення між тими самими безрозмірними величинами, причому система визначальних параметрів повинна мати властивості повноти. Цей спосіб перевірки виведених співвідношень також додатково був застосований у нашій роботі.

3.2. Врахування відомих вимог подібності при аналоговому і фізичному моделюванні та їхня трансформація в оригінальну систему

Запишемо відомі вимоги подібності в розробленій власно автором системі; (наведені раніше формули (1.1) — (1.5) при цьому деяким чином трансформуються).

1. Геометрична подібність моделі природі (рівність їхніх пропорцій):

якщо L_{xM}, L_{yM}, L_{zM} — розміри натурального об'єкта, м, в осях координат x, y, z , а L_{xH}, L_{yH}, L_{zH} — адекватні їм розміри моделі цього об'єкта, м, у тих же осях x, y, z :

<p>— критерій подібності</p> $\begin{cases} L_{xM} / L_{yM} = L_{xH} / L_{yH} = \text{const} \\ L_{xM} / L_{zM} = L_{xH} / L_{zH} = \text{const} \\ L_{yM} / L_{zM} = L_{yH} / L_{zH} = \text{const} \end{cases}$		<p>— індикатор подібності</p> $\begin{cases} L_{xM} \cdot L_{yM} / (L_{yH} \cdot L_{xH}) = 1 \\ L_{xM} \cdot L_{zM} / (L_{zM} \cdot L_{xH}) = 1 \\ L_{yM} \cdot L_{zM} / (L_{zM} \cdot L_{yH}) = 1 \end{cases}$
---	--	---

2. Рівність відносин лінійних розмірів L до довжини хвилі λ у моделі й у природі:

<p>— критерій подібності</p> $L_M / \lambda_M = L_H / \lambda_H = \text{const}$		<p>— індикатор подібності</p> $\lambda_M \cdot L_H / (\lambda_H \cdot L_M) = 1$
---	--	---

3. Рівність імпедансів Z^* (чи рівність коефіцієнтів α, ρ, τ випромінювання адекватних елементів) у моделі й у природі:

<p>— критерій подібності</p> $Z_M^* = Z_H^* = \text{const} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_M = \alpha_H = \text{const} \\ \rho_M = \rho_H = \text{const} \\ \tau_M = \tau_H = \text{const} \end{cases}$		<p>— індикатор подібності</p> $Z_M^* / Z_H^* = 1 \Rightarrow \begin{cases} \alpha_M / \alpha_H = 1 \\ \rho_M / \rho_H = 1 \\ \tau_M / \tau_H = 1 \end{cases}$
--	--	---

Такі вимоги подібності деяким чином аналогічні відомим вимогам досягнення подібності адекватних параметрів моделі та природи при фізичному моделюванні акустичних процесів, що розглянуті вище. Але є відмінності, що кажуться несуттєвими, але грають дуже важливу роль в запропонованій нами системі.

3.3. Розрахункові співвідношення, застосовувані при моделюванні процесів поширення звуку методом аналогії

Міжнародна система одиниць (SI) установлює 7 основних одиниць фізичних величин і 3 додаткових, а всі інші одиниці, називані похідними, утворені за рівняннями зв'язку між фізичними величинами. З цього випливає, що в розробленій системі повинно матися 7 основних констант подібності (взаємозв'язок між параметрами моделі (індекс M) і природи (індекс H), виражений за допомогою їх, представлений в табл. 3.1), а інші необхідні константи подібності (для похідних величин) можуть утворюватися за рівняннями зв'язку між фізичними величинами [69].

Таблиця 3.1

Константи подібності до основних одиниць SI

Найменування	Позначення	Одиниця	Константа подібності	Взаємозв'язок між параметрами моделі (м) і природи (н)	Нумерація формул
Довжина	L	м	c_L	$L_M = c_L \cdot L_N$	(1.1)
Маса	M	кг	c_m	$M_M = c_m \cdot M_N$	(3.1)
Час	T	с	c_T	$T_M = c_T \cdot T_N$	(3.2)
Сила струму	I	А	c_I	$I_M = c_I \cdot I_N$	(3.3)
Температура	Q	К	c_Q	$Q_M = c_Q \cdot Q_N$	(3.4)
Кількість речовини	N	Моль	c_N	$M_M = c_N \cdot N_N$	(3.5)
Сила світла	J	кд	c_J	$J_M = c_J \cdot J_N$	(3.6)

Усі позначення, розмірності і формули взаємозв'язку між фізичними величинами відповідають системі SI і були узяті з [49, 70]. На їх базі й були виведені необхідні розрахункові співвідношення, що докладно описані в роботі [69].

Система констант подібності при моделюванні фізичних явищ матеріального світу, таким чином, була виведена та застосована в наших подальших дослідженнях (наприклад, див. в [1, 2]).

Таблиця 3.2.

Константи подібності до додаткових одиниць SI

Найменування	Позначення	Одиниця	Розмірність	Константа подібності	Взаємозв'язок між параметрами моделі (м) і природи (н)	Нумерація формул
Площа	S	м ²	L ²	c_L^2	$S_M = c_L^2 S_N$	3.7
Обсяг	V	м ³	L ³	c_L^3	$V_M = c_L^3 V_N$	3.8
Щільність	ρ	кг/м ³	L ⁻³ M	$c_L^{-3} c_m \rho_n$	$\rho_M = c_L^{-3} c_m \rho_N$	3.9
Швидкість	v	м/с	LT ⁻¹	$c_L c_T^{-1}$	$v_M = c_L c_T^{-1} v_N$	3.10
Прискорення	a	м/с ²	LT ⁻²	$c_L c_T^{-2}$	$a_M = c_L c_T^{-2} a_N$	3.11
Довжина хвилі	λ	м	L	c_L	$\lambda_M = c_L \lambda_N$	3.12
Частота	f	Гц	T ⁻¹	c_T^{-1}	$f_M = c_T^{-1} f_N$	3.13
Сила	F	Р	LMT ⁻²	$c_L c_m c_T^{-2}$	$F_M = c_L c_m c_T^{-2} F_N$	3.14

Закінчення табл. 3.1

Найменування	Позначення	Одиниця	Розмірність	Константа подібності	Взаємозв'язок між параметрами моделі (м) і природи (н)	Нумерація формул	
Тиск (у т.ч. звуковий)	P	Н/м ² = Па	L ⁻¹ MT ⁻²	$c_L^{-1} c_m c_T^{-2}$	$P_M = c_L^{-1} c_m c_T^{-2} P_N$	3.15	
Робота (механічна)	A	Дж	L ² MT ⁻²	$c_L^2 c_m c_T^{-2}$	$A_M = c_L^2 c_m c_T^{-2} A_N$	3.16	
Потужність (у т.ч. звукова)	N	Вт	L ² MT ⁻³	$c_L^2 c_m c_T^{-3}$	$N_M = c_L^2 c_m c_T^{-3} N_N$	3.17	
Енергія	E	Дж	L ² MT ⁻²	$c_L^2 c_m c_T^{-2}$	$E_M = c_L^2 c_m c_T^{-2} E_N$	3.18	
Щільність енергії {у т.ч. звуковий}	ϵ	Дж/м ³	L ⁻¹ MT ⁻²	$c_L^{-1} c_m c_T^{-2}$	$\epsilon_M = c_L^{-1} c_m c_T^{-2} \epsilon_N$	3.19	
Потік енергії (у т.ч. звуковий потік)	P	Вт	L ² MT ⁻³	$c_L^2 c_m c_T^{-3}$	$P_M = c_L^2 c_m c_T^{-3} P_N$	3.20	
Інтенсивність (звуку)	I	Вт/м ²	MT ⁻³	$c_m c_T^{-3}$	$I_M = c_m c_T^{-3} I_N$	3.21	
Коефіцієнти	відбиття	ρ	1	-	1	$\rho_M = \rho_N$	3.22
	поглинання	α	1	-	1	$\alpha_M = \alpha_N$	3.23
	пропущення	τ	1	-	1	$\tau_M = \tau_N$	3.24
Питомий акустичний опір	$\rho c = Ze$	Па.с/м	L ⁻² MT ⁻¹	$c_L^{-2} c_m c_T^{-1}$	$\rho_M c_M = c_L^{-2} c_m c_T^{-1} \rho_N c_N$	3.25	
Освітленість	E	лк	L ⁻² J	$c_L^{-2} c_J = c_L^{-2} c_J = c_m c_T^{-3}$	$E_M = c_L^{-2} c_J E_N$ $E_M = c_m c_T^{-3} E_N$	3.26	
Енергетична освітленість	E_e	Вт/м ²	MT ⁻³	$c_m c_T^{-3}$	$E_{eM} = c_m c_T^{-3} E_{eN}$	3.27	
Світлова експозиція	H	лк.с	L ⁻² TJ	$c_L^{-2} c_T c_J$ $c_L^{-2} c_J c_J = c_m c_T^{-2}$	$H_M = c_L^{-2} c_T c_J H_N$ $H_M = c_m c_T^{-2} H_N$	3.28	
Енергетична експозиція	H_e	Дж/м ²	MT ⁻²	$c_m c_T^{-2}$	$H_{eM} = H_{eN}$	3.29	

В якості додаткового засобу забезпечення наукової коректності в роботі [69] застосовується також перевірка розмірностей виведених співвідношень згідно SI. Усі досліджені відомі рівняння взаємозв'язку фізичні величини підкоряються операціям з константами подібності, як це і повинно бути відповідно до теорії розмірностей.

Іншим способом, стосовно до розв'язуваних завдань акустичного моделювання, вищевказані результати можна трактувати так: запропонована система констант дійсна в рамках класичної фізики, і може бути застосована для кола розв'язуваних завдань моделювання акустичних процесів методом аналогії [71].

4. Пропоновані пристрої аналогового та квазіаналогового акустичного моделювання

Для практичного здійснення теоретичних положень, викладених вище були сконструйовані реальні пристрої, що дозволяють реалізувати запропонований вище принцип акустичного моделювання.

4.1. Створення пристрою для візуалізації зашумованості міської забудови (електронно-оптичний недискретний спосіб реєстрації) [72]

Наша пропозиція відноситься до вимірювальної техніки і може знайти застосування при дослідженні зашумованості транспортним і іншим шумом існуючих і знову проєктованих житлових районів і мікрорайонів. Найбільш близьким до описаної тут нової версії запропонованого приладу є пристрій для візуалізації картини зашумованості міської забудови згідно [24, 25], описаний вище. Його недоліком є складність, велика тривалість і висока трудомісткість одержання фотографічних відбитків, неможливість одержання цілком аналогічних один одному копій того самого експерименту, (одночасно фізично неможливо виготовити більш одного відбитка візуалізованої картини розподілу енергії, що моделюється, за кожне одне окреме дослідження з моделювання), практична неможливість безпосереднього введення дані моделювання в комп'ютер [73]. В пристрої-прототипі вимагається здійснити фотографічну обробку отриманого зображення: для чого потрібно витягти фотопластинку; виявити її, закріпити (з дотриманням відомих у фотографії способів недопущення засвітлення фотовідбитка: тобто такі роботи проводяться в темряві чи при світлі спеціальної червоної лампи). Фотографічна обробка кольорових зображень ускладнена, і в устрої-прототипі практично реалізується одержання тільки чорно-білих відбитків (таким чином, моделюється інтегрований показник — так званий рівень звуку, дБА); у той час, як найчастіше потрібно саме одержання кольорових відбитків (тобто змоделювати різний одночасний розподіл енергії, що моделюється, різного спектрального складу: еквівалентно рівням звукового тиску в стандартизованих октавних смугах частот, дБ).

Завдання нашого винаходу є спрощення відомого пристрою, зниження трудомісткості одержання результатів моделювання; одержання декількох цілком адекватних один одному роздруківок результатів моделювання в ході одного експерименту; поліпшена і (спрощена) можливість одержання й обробки кольорових зображень; забезпечення можливості введення інформації в персональний комп'ютер безпосередньо з запропонованого пристрою, а не непрямыми (як це мало місце в прототипі) методами.

Поставлене завдання реалізується за рахунок того, що у запропонованому нами пристрої для візуалізації зашумленості міської забудови, що містить модель джерела звукової енергії у вигляді джерела світла, модель міської забудови і засіб оцінки енергії, що розподіляється, причому масштаб виконання моделей обраний зі співвідношення:

$$\lambda_m = \lambda_n \cdot c_L, \quad (4.1)$$

де $c_L = L_m / L_n$ — коефіцієнт масштабування, L_m і L_n — відповідно, лінійні розміри об'єктів міської забудови в моделі й у природі, λ_m і λ_n — відповідно, довжини хвиль випромінювання в моделі й у природі, m , відповідно до нашої пропозиції, засіб оцінки енергії, що розподіляється, виконаний у вигляді тонкоплівкового покриття з одностороннім пропусканням світлових променів, накладеного на скляне світлочутливе вікно планшетного сканера (ПС), підключеного до персонального комп'ютеру (ПК). Розташування елементів моделі не на фотопластинці, як на прототипі, а на скляному світлочутливому вікні ПС, дозволяє оперативно вносити дані про розподіл випромінювання, що моделюється, на моделі досліджуваного об'єкта міської забудови в пам'ять комп'ютера.

Виконання засобу оцінки енергії, що розподіляється, у вигляді тонкоплівкового покриття з одностороннім пропусканням світлових променів, накладеного на скляне світлочутливе вікно ПС, є найважливішою істотною відмінною ознакою запропонованого пристрою. Без виконання цієї умови подібні експерименти технічно неможливі, і нездійсненні в технічній реалізації. Справа в тім, що ПС фіксує відбите світло, випромінюване його власним внутрішнім джерелом, і завдяки зазначеному підсвічуванню сприймає своїми світлочутливими елементами дані про розподіл фарб і насиченостей у сканованому об'єкті, накладеному на його світлочутливе вікно.

Якщо розмістити модель міської забудови і моделі джерел звуку у вигляді ДС без використання тонкоплівкового покриття з одностороннім пропусканням світлових променів, відбудеться «засвітлення» області сканування прямими і відбитими променями спільно. Таким чином, у результаті експерименту нічого не вийде: результат сканування буде представляти в будь-якому випадку лише суцільну чорну область зафарбування однакового кольору й інтенсивності. Уся хитрість запропонованого винахідницького задуму полягає в тім, щоб забезпечити саме одностороннє пропускання світлових променів: розподіляючись на верхній поверхні, зверненій до самої моделі міської забудови, від моделей ДШ у вигляді ДС, промені освітлення, що моделює натурний шум, створюють зони різної освітленості і кольору, — які потім скануються знизу розташованим під світлочутливим вікном світлочутливим елементом сканера. Верхня кришка сканера при проведенні

модельних експериментів повинна бути розкрита, оскільки елементи моделі (модель міської забудови і моделі ДШ у вигляді ДС) мають деяку висоту і визначену просторову конфігурацію. У наших експериментах роль відбивача власних світлових променів, що виходять від каретки ПС, що рухається, грає саме зазначене тонкоплівкове покриття з однобічним пропусканням світлових променів, накладене на скляне світлочутливе вікно ПС.

У наших дослідженнях було застосоване дешеве і загальнодоступне тонкоплівкове покриття, використовуване автолюбителями для затемнення шибок легкових автомобілів. Воно порівняно добре пропускає світло в одному напрямку, і створює значне (достатнє для роботи сканера) затінення при його підсвічуванні з іншої сторони.

Пристрій поданий на прикладеному кресленні.

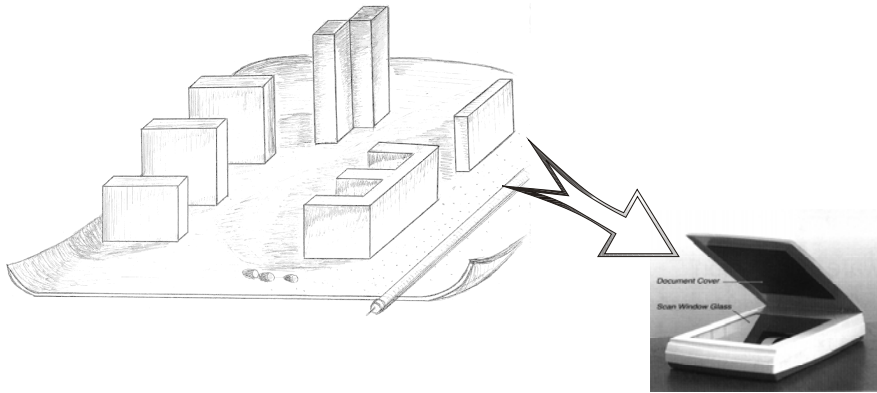


Рис. 4.1. Загальний вигляд пристрою, що пропонується.

Модель міської забудови з розміщеними на ній моделями ДШ розташовують на світловідчутливому вікні ПС.

Принцип дії пристрою еквівалентний принципу дії прототипу. Модель території міської забудови вносять на світлочутливе скляне вікно ПС, і освітлюють модельним випромінюванням від моделей ДШ (у вигляді ДС). Таким чином, за рахунок використання аналогії хвильових явищ і хвильових характеристик досягається подібність в розподілах оптичного випромінювання на моделі і натурного звукового (шумового забруднення), особливо в складних дифракційних й інтерференційних процесах, і т.п. Візуалізована картина зашумованості міської забудови на моделі представляється у вигляді розподілу світлових тіней і ділянок різної освітленості на моделі. Замість її подальшої фотографічної експозиції на пластинку (як це було в прототипі) у цьому нашому винаході здійснюють сканування.

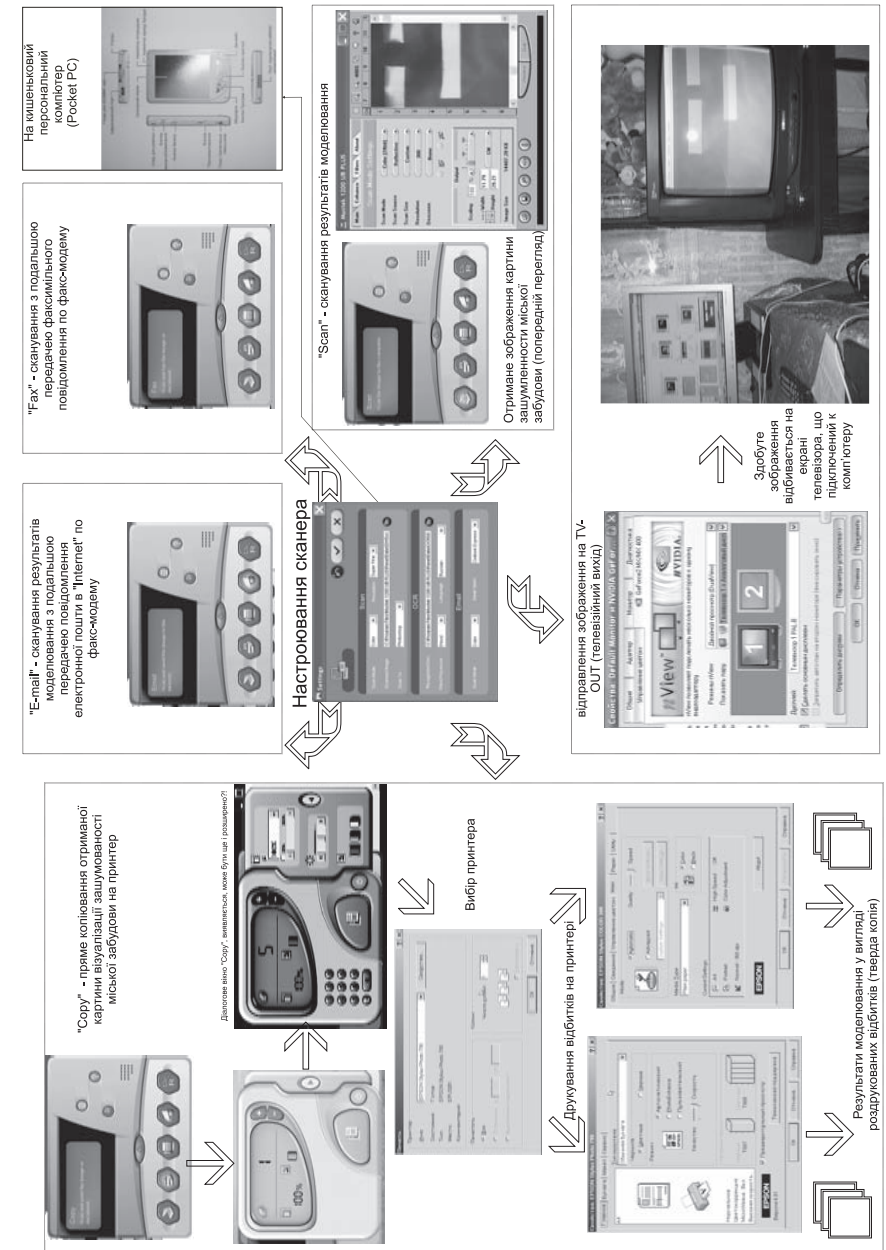


Рис. 4.2. Варіації подальших дій оператора при застосуванні дослідної установки



Рис. 4.3. Застосування сканера «Mustek SCANEXPRESS 1200UB Plus» в експериментах: обрано режим «Scan» — сканування в одну з прикладних програм.

Тонкоплівке покриття з однобічним пропусканням світлових променів, накладене на скляне світлочутливе вікно ПС, перешкоджає фоновому «засвіченню» зображення прямим світлом. Зображення в електронному вигляді подається в оперативну пам'ять комп'ютера.

Надалі обробка отриманого сканованого зображення може бути проведена з використанням однієї з нижчеперелічених можливостей:

- трансляція отриманого зображення на інший вихід комп'ютера;
- сканування та наступне відправлення зображення картини зашумованості як повідомлення електронної пошти;
- пряме копіювання отриманої картинки зі сканера на принтер;
- сканування та наступне відправлення зображення картини зашумованості по факсу;
- сканування в одну з прикладних програм, що здійснюють обробку растрової графіки;
- сканування в одну з прикладних програм, що здійснюють обробку векторної графіки.

Варіації подальших дій оператора дослідної установки надано на рис. 4.2. Розглянемо їх детальніше.

— *Трансляція отриманого зображення на інший вихід комп'ютера.* Варто помітити, що сучасні відеоадаптери (а також операційні системи) підтри-

мують одночасну роботу з декількома моніторами, а також передавання телевізійного сигналу на TV-вихід.

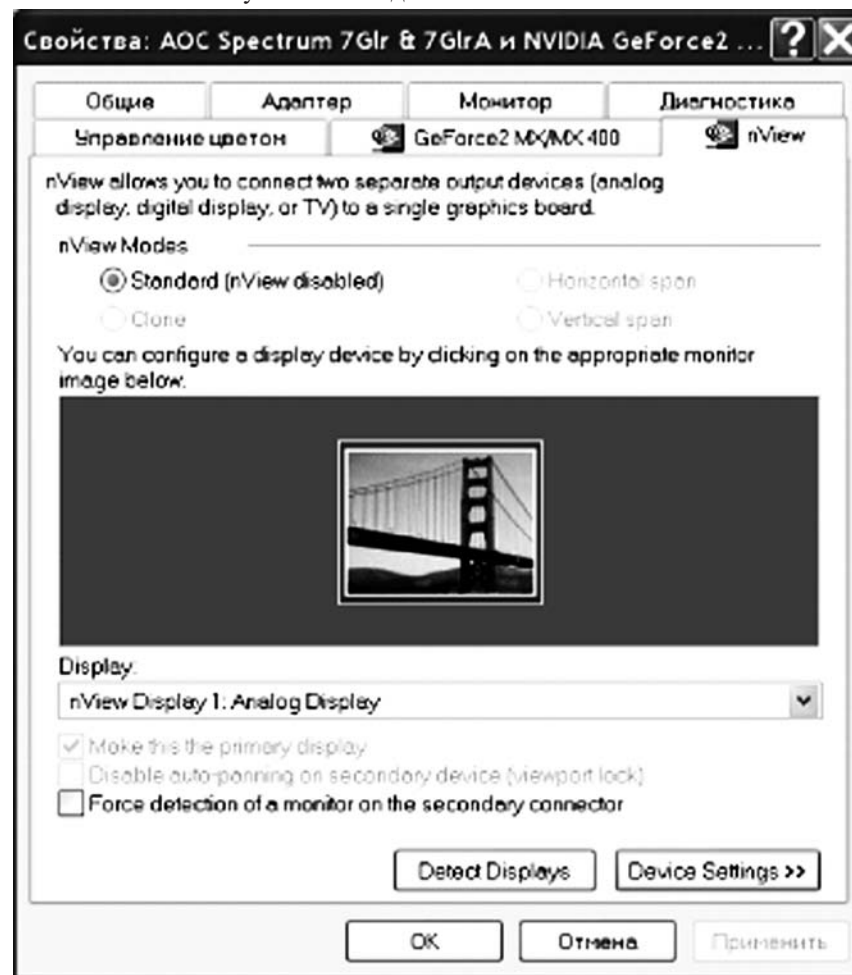


Рис. 4.4. Вибір одного з моніторів, на якому будуть відображатися результати експерименту з візуалізації зашумованості міської забудови. Інші монітори, підключені в той же самий час до того ж комп'ютеру, і задіяні в тому ж сеансі, можуть бути використані одночасно для вирішення яких-небудь інших завдань.

— *Сканування та відправлення як «E-mail»* — сканування результатів моделювання з подальшою передачею повідомлення електронної пошти в «Internet» через факс-модем. У рядку браузера (меню, що розкривається в нижній частині діалогового вікна) задають необхідну адресу електронної

пошти. Отриману картину візуалізації зашумованості міської забудови через частки секунди після завершенні дослідження можна передати як електронний лист у будь-яке місце світу!

— *Пряме копіювання отриманої картини зі сканера на принтер.* Відповідно до запропонованої конструкції пристрою візуалізації, не потрібно ніяких хімічних процесів (тобто обробки фотографії), аналогічних пристрою-прототипіві.



Рис. 4.5. У діалоговому вікні «Сору» включений режим «пряме копіювання інформації зі сканера на принтер» (для моделі сканера «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus»). За допомогою панелі цифрових кнопок (у лівій частині) обраний режим друку, при якому відповідно до вимог замовника буде виготовлено 5 однакових копій результатів того самого експерименту (що фізично неможливо в пристрої-прототипі). Здійснюють вибір режиму копіювання; кількості копій; яскравості; контрасту; корекції колірної гами; і масштабування.

На відміну від пристрою-прототипу, час одержання одного відбитка вичерпується тільки спільним часом сканування і друку (залежить від технічних характеристик використовуваних принтера, сканера і самого персонального комп'ютера). У наших експериментах час одержання 1 відбитка ніколи не перевищував 1,5 хвилини, на відміну від декількох десятків хвилин і навіть годин при використанні прототипу. При цьому, на відміну від пристрою-прототипу, у діалоговому вікні «Печать» принтера, задавши необхідну кількість копій, можна одержати будь-яку необхідну кількість цілком адекватних відбитків.

Відповідно до опису устрою-прототипу, теоретично можливо змінювати частоту випромінювання, що моделюється, за рахунок підбора відповідних довжин хвиль світлового випромінювання λ_m . Наприклад, при дослідженні розподілу низькочастотних складових натурального звукового випромінювання й інфразвуку на модель ДШ у вигляді ДС вдягають червоний світлофільтр; при дослідженні розподілу високочастотних складових натурального звукового випромінювання й ультразвуку на модель ДШ у вигляді ДС вдягають фіолетовий світлофільтр і т.п., підбираючи необхідні довжини хвиль з вищевказаного основного співвідношення подібності $\lambda_m = \lambda_n \cdot c_L$.

Однак практична реалізація зазначених (і вкрай немаловажних на практиці) можливостей моделювання в пристрої-прототипі ускладнена, тому що при цьому потрібно здійснювати процес не чорно-білого, а кольорового прояву, закріплення, і обробки отриманих зображень!

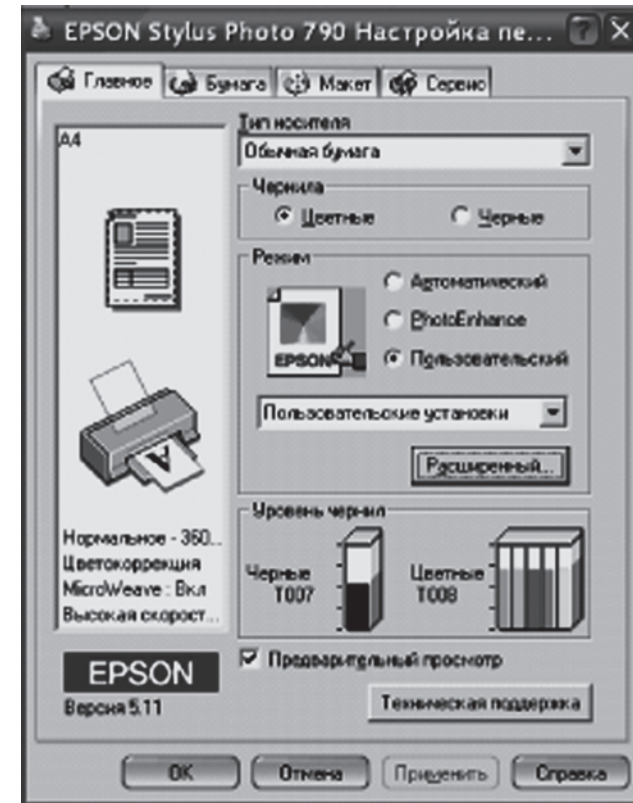


Рис. 4.6.а. Для друкування обраний принтер «EPSON Stylus Photo 790». Здійснюється налаштування різних параметрів друку.

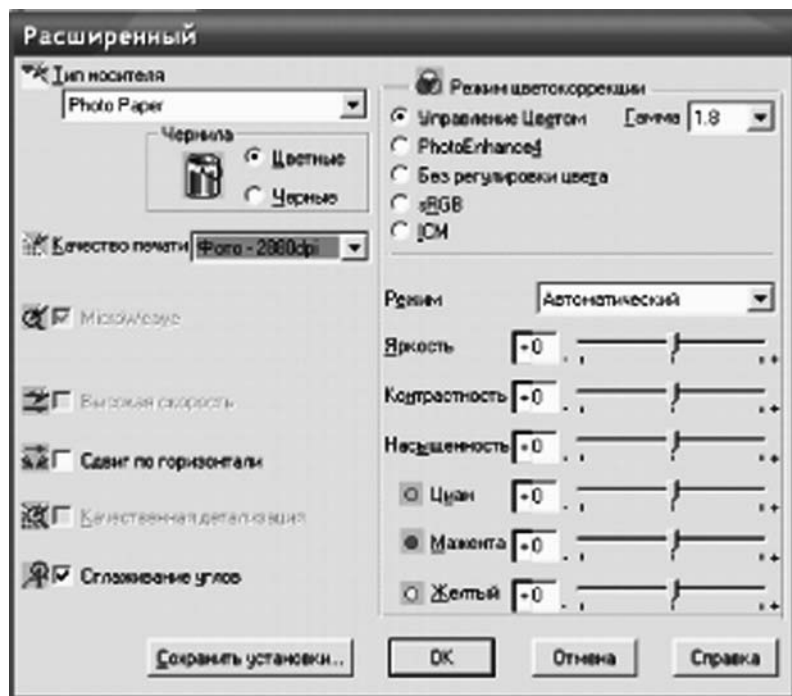


Рис. 4.6.б Для друкування обраний принтер «EPSON Stylus Photo 790». Здійснюється налаштування різних параметрів друку.

У той же час використання кольорового струминного принтера в запропонованому пристрої дозволяє без яких-небудь особливих на те ускладнень одержувати кольорові зображення візуалізованої картини зашумованості міської забудови з указівкою розподілу цих самих кольорових складових змодельованого випромінювання. Таким чином, навіть пряма аналогія запропонованого пристрою з прототипом за кінцевим одержуванням результатом характеризується значними спрощенням та зниженням трудомісткості, можливістю одержувати кольорові ефекти, — а додаткова передача сканованої візуалізованої картини зашумованості міської забудови в електронному вигляді в оперативну пам'ять комп'ютера відкриває найширші нові можливості в обробці одержуваних у результаті моделювання даних.

При наявності декількох принтерів заміну їх для поточної печатки результатів моделювання можна здійснювати безпосередньо в момент експерименту по візуалізації ступеня зашумованості міської забудови на аналоговій моделі. На ході експерименту це ніяк не відбивається.

— Сканування та відправлення зображення як «Fax» — сканування з подальшою передачею факсимільного повідомлення через факс-модем. У рядку браузера (меню, що розкривається в нижній частині діалогового вікна) задають номер факсу-апарата одержувача. Отриману картину візуалізації зашумованості міської забудови через частки секунди після завершенні досліджень можна передати як факс-повідомлення в будь-яке місце світу. Ця унікальна можливість надана для користувачів звичайної телефонної мережі, що не мають персональних комп'ютерів, підключених до мережі «Internet».

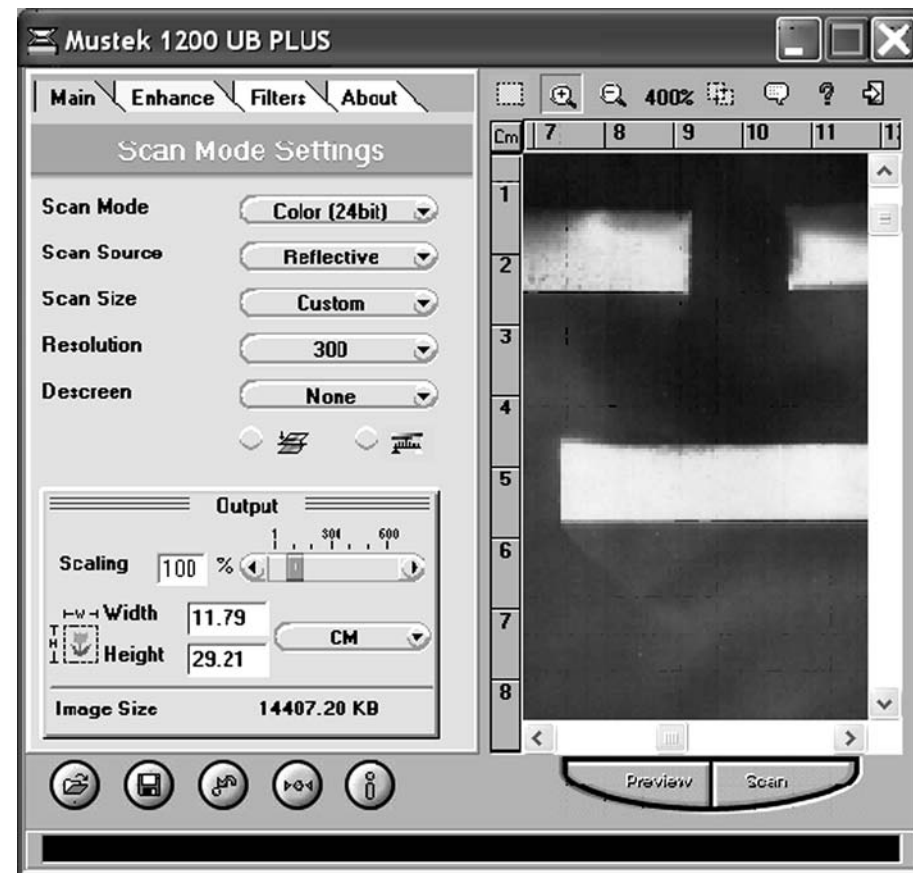


Рис. 4.7. Вікно «Main» діалогового вікна TWAIN (сканування) пристрою «Mustek SCANEXPRESS 1200 UB Plus». Можна установити режим сканування (кольорове/напівтонове/чорно-біле); джерело сканування; розмір області, що сканується; розрізну здатність; здійснити масштабування зображення, що сканується, в межах 1% (зменшення в 100 разів) ... 600% (збільшення в 6 разів). {Тут, з метою ілюстрації додаткових

можливостей пристрою навмисно встановлений масштаб зображення 400% (збільшення в 4 рази). Номінальним же, однак, є масштаб 100% (1:1). Вікно «Enhance», що відкривається звідси, дозволяє здійснити налаштування яскравості і контрасту зображення, що сканується; рівень; скорегувати криву кольорової корекції; змінити насиченість кольорів.

Окрім автоматичного сканування (тобто з настрійками за замовченням), можливо примусово змінити налаштування ПК (якщо це необхідно для експерименту). Тоді запускають сканування вручну за допомогою діалогового вікна TWAIN (сканування).

У правому вікні того діалогового вікна видний фрагмент моделі (у збільшеному масштабі), представлені три будинки, з розподілом зон світлотіні біля них. Подібні квазіфотографічні зображення є найкращим доказом дійсності експериментальних даних у ході досліджень по візуалізації зашумованості міської забудови.

— Сканування в одну з прикладних програм, що здійснюють обробку растрової графіки.

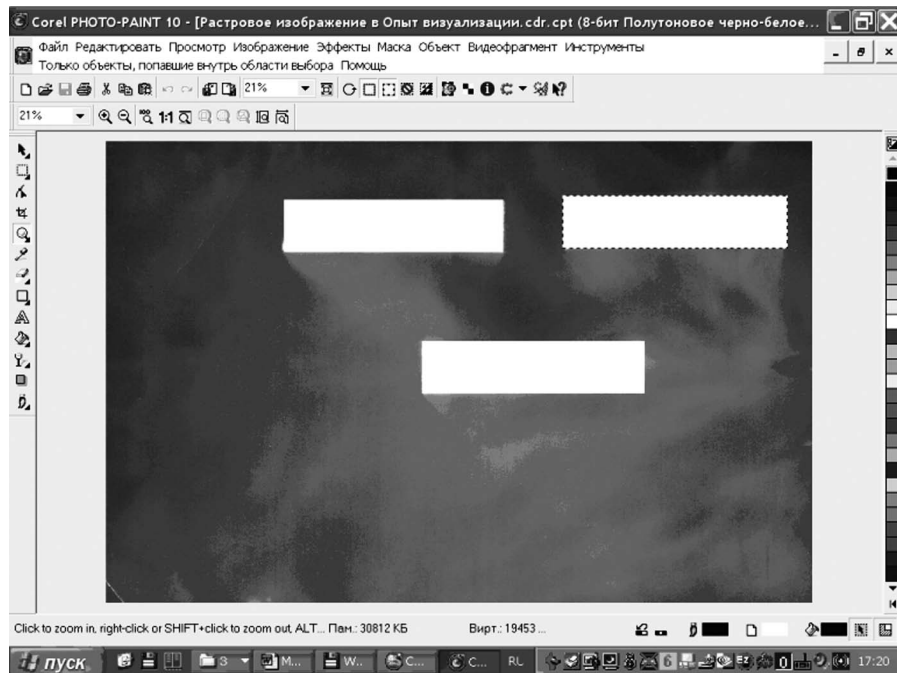


Рис. 4.8. Отримане зображення картини зашумованості міської забудови в «Corel Photo-Paint». Здійснюється обробка первинного растрового зображення засобами растрової графіки.

— Сканування в одну з прикладних програм, що здійснюють обробку векторної графіки. Трасування зображення з розпізнаванням образів і його перетворенням растрового зображення у векторне дозволяє здійснювати його подальші трансформації найбільш зручним для користувача і технічно оптимальним для комп'ютерних засобів способами.

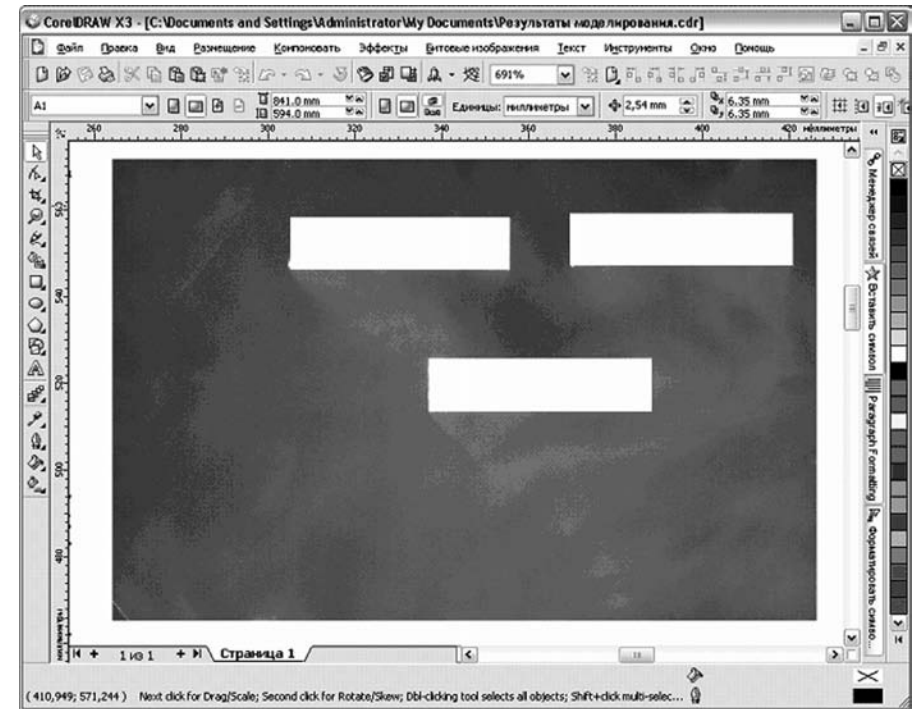


Рис. 4.9. Отримане зображення картини зашумленості міської забудови в програмі обробки графічних зображень «Corel Draw».

Передбачена можливість переривання експерименту з аналогового моделювання безпосередньо під час сеансу роботи: (без припинення роботи і знеструмлення комп'ютера). Цей момент представлений на наступному рис. 4.10.

Приклад практичного застосування сконструйованого пристрою в практиці боротьби із шумом розглянутий на науково-технічному семінарі «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума», Севастополь, 2006 г. [74].

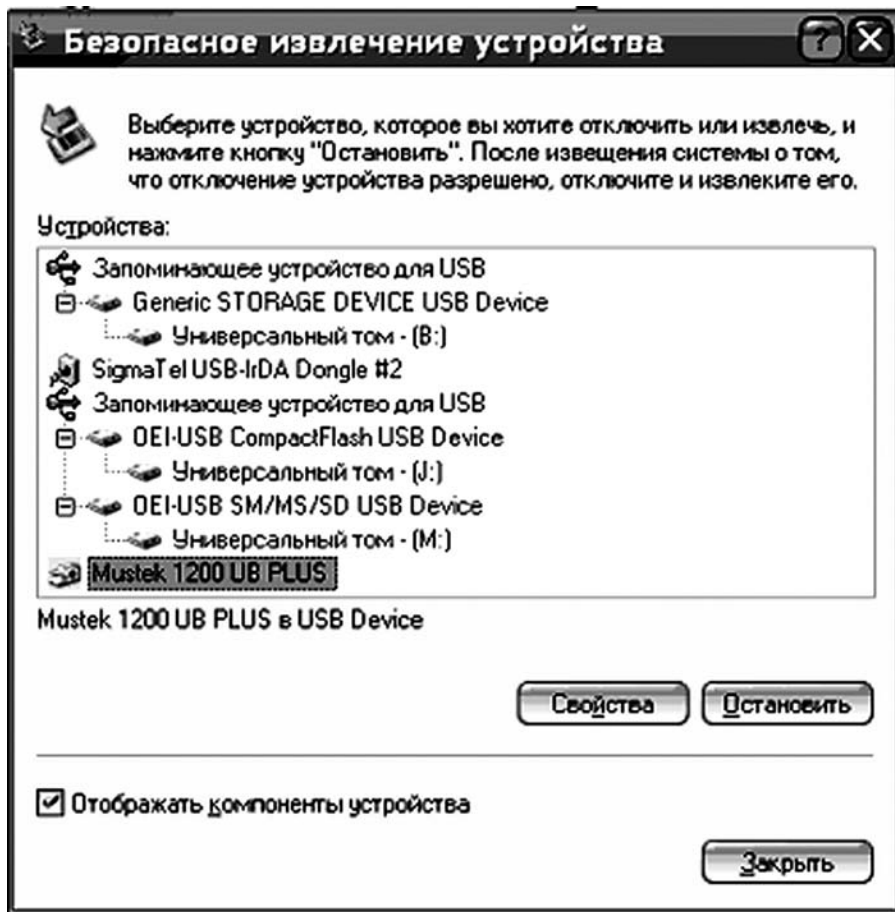


Рис. 4.10. Эксперимент по визуализации шумованости мѣської забудови з використанням аналогового моделювання закiнченний; не виключаючи роботи i не припиняючи сеанс поточного користування операцiйною системою, можна знеструмити i вiдключити лабораторну установку вiд ПК. Для того, щоб продовжити роботу, не потрiбно навіть припиняти сеанс поточного користувача, не потрiбно виходити з системи; не потрiбно i перезавантажувати комп'ютер. Програмно вiдключивши, i фiзично роз'єднуючи потiм непотрiбну бiльш аналогову модель вiд iншого ПК, продовжують сеанс поточного користувача, вирiшуючи вiдтепер стороннi (не зв'язанi з моделюванням задачi). Таким чином, досягається максимальна зручнiсть користування запропонованою конструкцiєю

Результати одного з експериментiв наданi на рис. 4.11. На рис. 4.11 б) наочно видимi зони акустичної тiнi.

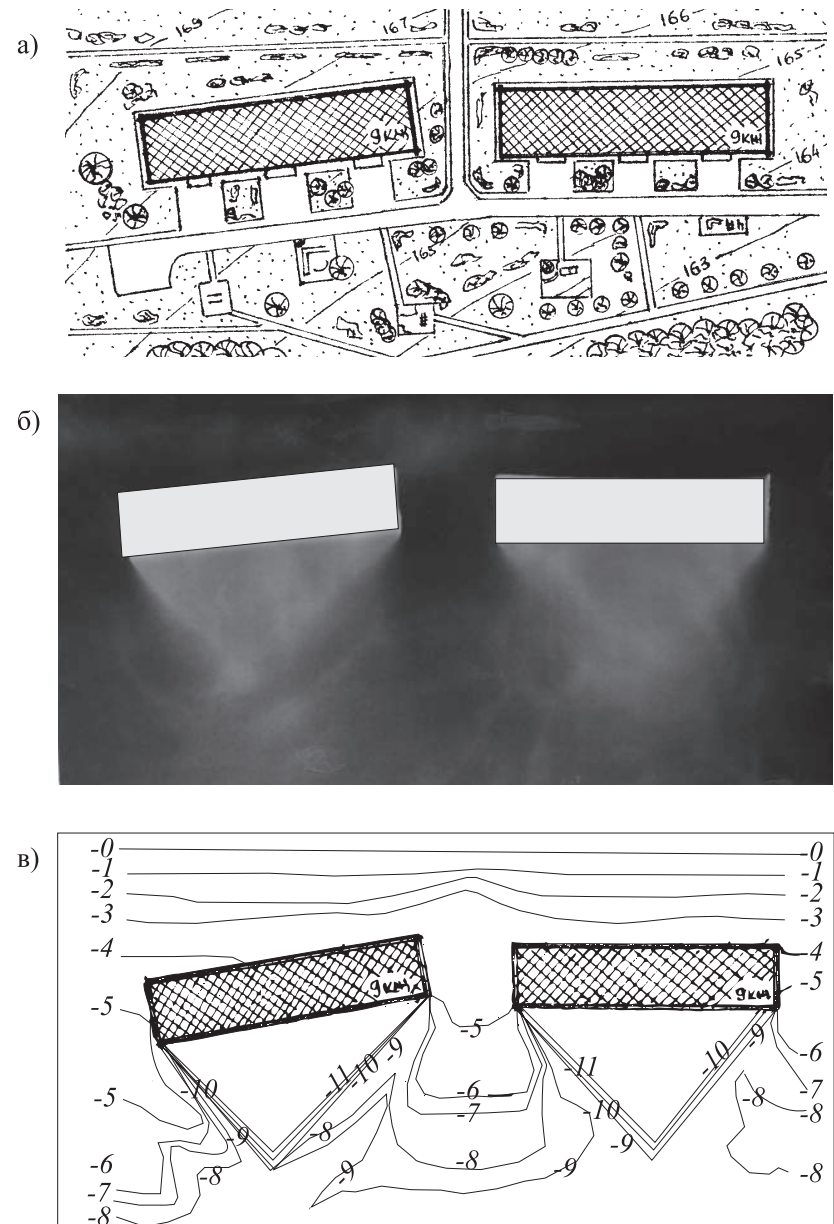


Рис. 4.11. Експеримент з аналогового моделювання з використанням вищепи-саного пристрою. Дослiдження закономірностей поширення шуму вiд лiнiйного ДШ: а) конкретна мiстобудiвельна ситуацiя; б) результати експерименту в необробленому

вигляді (розподіл світлотіні на поверхні основи моделі); в) результати експерименту в обробленому вигляді: (карта шуму; побудована на базі моделювання). Цифровими позначеннями показані: 0 дБА — вихідний рівень звуку; — X дБА — його зниження). Масштаб лінійних розмірів 1:1250 ($c_L=0,0008$).

4.2. Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта

Вище ми говорили, що застосування заміни натурального звуку в моделі світлом дозволяє будувати тільки-но дрібномасштабні моделі, наприклад, моделі забудови селитби житлових районів (великої площі з великою кількістю будівель) із протяжними лінійними ДШ (транспортні магістралі) тощо; але подальше збільшення такої моделі неможливо за рахунок того, що при тому порушуються вимоги подібності; в той час як на практиці виникає необхідність в збільшенні масштабу моделей. Таким чином, існує проблема обмеження масштабів моделювання, поставлена в підрозділі 1.4.

Масштаб моделі може бути збільшений за рахунок використання більш довгих хвиль, тобто переходу в ІЧ область спектра з використанням контактних термоіндикаторів замість фотопластинки 1. Узагалі застосування світла не у видимому, а в ІЧ-діапазоні має чималі переваги в плані розширення діапазону можливих масштабів лінійних розмірів при моделюванні (див. далі). З урахуванням того, що натурний звуковий діапазон має довжину хвилі $1,7 \text{ см} < \lambda_n < 17 \text{ м}$, а модельний інфрачервоний діапазон $770 \text{ нм} < \lambda_m < 1 \text{ мм}$, масштаб цілком прийнятний для побудови більш великих моделей з дотриманням зазначених вимог подібності. Так, наприклад, при моделюванні звукової хвилі в повітрі при частоті 20 кГц, довжина хвилі складає $\lambda_n = 1,7 \text{ см}$, ІЧ- випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda_m = 1 \text{ мм}$ масштаб лінійних розмірів, використовуваний при побудові моделі, дорівнює: $c_L = L_m / L_n = 1 \text{ мм} / 1 \text{ см} = 0,001 / 0,017 = 1:17$, що дозволяє побудувати навіть великомасштабну модель, у т.ч. модель приміщення з дотриманням вимог подібності. Тому наступні розробки використовують вже саме ІЧ- діапазон. Застосування світла не у видимому, а в ІЧ-діапазоні має чималі переваги в плані розширення діапазону можливих масштабів лінійних розмірів при моделюванні. У той же час недискретні способи реєстрації характеризуються високою наочністю, на відміну від дискретних: звертаючись до вищенаведених фотографій, можна помітити, що на кожній з них явно видні спад енергії, що моделюється, в міру віддалення від ДШ, — зони акустичної тіні, утворені будинками, спорудами і шумозахисними засобами, з можливістю кількісної оцінки в акустичних величинах (дБ) розподілу енергії, що моделюється, на території моделі об'єкта. Цими ж перевагами (обидві вищевказаних умови: ІЧ — діапазон +

недискретна реєстрація одночасно) володіє більш вдосконалений і прогресивний пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта [24, 25], зображений на кресленнях.

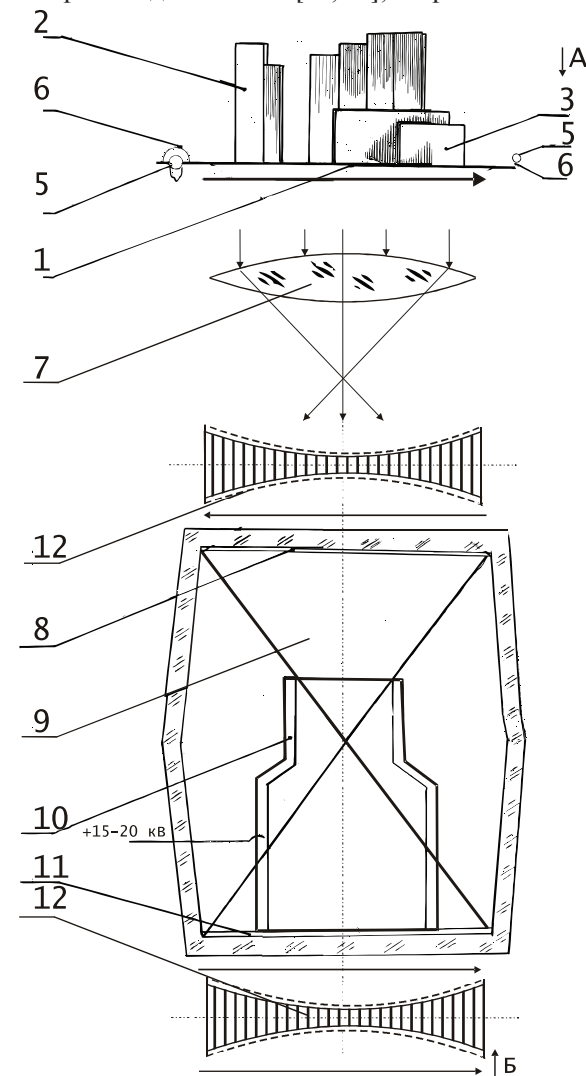


Рис. 4.12.а. Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретизованим способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта (розглядати разом з рис. 4.12.б).

На рис. 4.12.а показано модель міської території з моделями ДШ і засіб реєстрації розподілу енергії, що моделюється. На рис. 4.12.б наведені: модель міської території с моделями ДШ (вигляд А с рис. 4.12.а, тобто вигляд, що представляє собою вигляд зверху); зображення розподілу енергії, що моделюється, в досліджуваній площині (площини підстави моделі, еквівалентній поверхні землі в натурі) на екрані засобу реєстрації (вигляд Б с рис. 4.12.а).

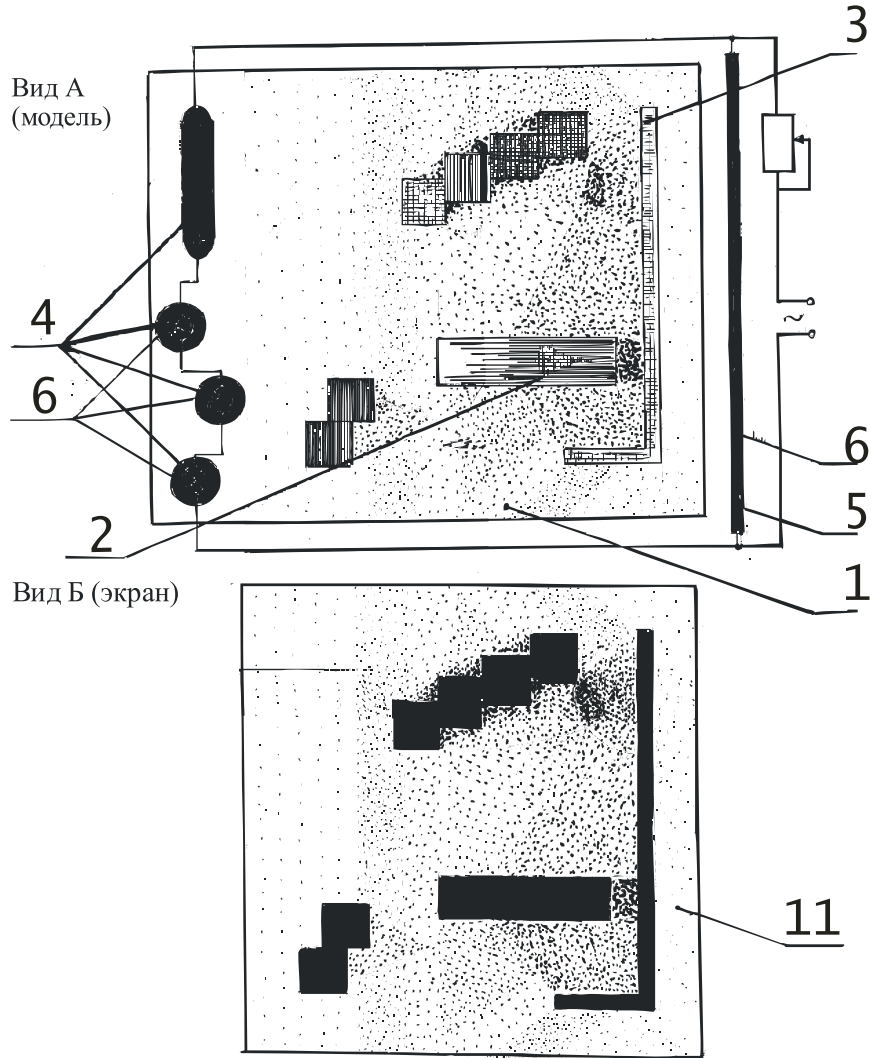


Рис. 4.12.б. Вигляди А та Б з рис. 4.12.а.

Специфікація складових частин пристрою:

— змінна модель міської території (в складі):

1 — підстава з прозорого для ІЧ — випромінювання матеріалу; 2 — моделі будинків і споруджень; 3 — моделі засобів боротьби із шумом;

— моделі різноманітних джерел звуку (в складі):

4 — точкових у вигляді компактних люмінесцентних ламп [75, 76, 77, 78, 79, 80] чи ламп розжарювання; 5 — лінійних у вигляді ніхромової нитки; 6 — світлофільтр;

— засіб реєстрації розподілу енергії, що моделюється (електронно-оптичний перетворювач), (в складі):

7 — оптична система; 8 — фотокатод; 9 — кінескоп; 10 — високовольтний анод; 11 — люмінофор; 12 — волоконні світлопроводи.

Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта [81] складається з:

— змінної моделі міської території у вигляді підстави 1, виконаного з матеріалу, прозорого для ІЧ- випромінювання (наприклад, чорного папера), із установленими на ній моделями будинків, споруджень і ін. міських об'єктів 2 і моделями засобів боротьби із шумом на шляху його поширення (шумозахисних екранів і ін.) 3, моделей ДШ у вигляді джерел ІЧ- випромінювання, у т.ч. моделей точкових ДШ, (наприклад, ламп розжарювання 4) і (чи) лінійних джерел звуку, (наприклад, дровових випромінювачів з ніхрому чи ферроніхрому) 5, причому на зазначені моделі точкових 4 і лінійних 5 ДШ одягнуті світлофільтри 6;

— засобу реєстрації у вигляді оптичної системи 7, що забезпечує проєкцію зображення розподілу енергії, що моделюється, по якій-небудь площині моделі міської території на чуттєвий елемент, наприклад, напівпрозорий фотокатод 8, нанесений на внутрішню сторону зовнішнього дна кінескопа 9, що виконаний у вигляді колби, із внутрішнього простору якої викачане повітря, і куди поміщений високовольтний анод 10; із вмонтованим у її верхнє дно регулярним волоконної світлопроводом 12, зовнішній торець якого виконаний матовим, а внутрішній, що повторює форму колби, розташований напроти фотокатода 8, причому торці волокон світлопроводу 12 виконані монолітними. Світлопроводи 12 можуть бути застосовані в кількості 1 чи 2 штук, і розташовані відповідно: перший (обов'язковий для установки: описаний вище) — за оптичною системою 7 (на вході в кінескоп 9; сполучений з фотокатодом 8); другий (опціонально) — вмонтований у нижнє дно кінескопа 9; зовнішній торець його виконаний матовим, а внутрішній, що повторює форму колби, покритий люмінофором 11. Зовнішній торець кожного зі світлопроводів 12 має форму увігнутої убік колби площини, що повторює форму колби, причо-

му радіуси кривизни зовнішнього і внутрішнього торців світлопроводу однакові.

Основа моделі і засіб реєстрації в даному пристрої, на відміну від попереднього, рознесені між собою на деяку відстань, що забезпечує собою деякі додаткові технічні переваги. Подібна конструкція взагалі пропонувалася іраніше (ще в рамках кандидатської дисертації автора, 1995 р., [22]). Істотною відмінністю розглянутого тут пристрою від раніше описаної версії є наявність одного чи двох елементів 12, захищених патентом України, 1997 р. [82].

Про цей елемент конструкції варто розповісти докладніше. В якості 12 застосовано запатентовану конструкцію кінескопа [82; 83; 84]. Винахід відноситься до волоконної оптики і може бути використаний для передачі телевізійних зображень на матовий торець світлопроводу. Відомо велика кількість конструкцій кінескопів. Недоліком їх є наявність аберацій, зокрема дисторсії — зображення, наприклад, прямокутної сітки на екрані кінескопа спотворюється через наявність у ньому радіуса кривизни, здобуваючи форму у вигляді «подушки» аби «бочки». Завданням пропонованого винаходу є усунення аберації, зокрема дисторсії зображення. Особливістю нашого винаходу є те, що він може бути використаний не тільки лише як структурний елемент 12 конструкції пропонованого пристрою моделювання, але і самостійно — у конструкціях комп'ютерних дисплеїв, побутових телевізорів, і інших пристроїв індикації, що використовують електронно-променеву трубку.

Мета винаходу досягається за рахунок того, що кінескоп виконаний у вигляді колби з вмонтованим у її дно регулярним волоконним світлопроводом, зовнішній торець виконаний матовим, а внутрішній, що повторює форму колби, — покритий люмінофором, причому торці волокон світлопроводу виконані монолітними, зовнішній торець світлопроводу має форму увігнутої убік колби площини, що повторює форму колби, радіуси кривизни зовнішнього і внутрішнього торців світлопроводу однакові. Виконання зовнішнього торця світлопроводу у формі увігнутої убік колби площини внутрішнього торця, що повторює форму, світлопроводу; і рівність радіусів кривизни зовнішнього і внутрішнього торців світлопроводу забезпечує усунення дисторсії. Згідно [44, с.278-279], щоб уникнути аберації, геометричне розташування точок зображення повинне бути подібно геометричному розташуванню точок предмету. У відомих конструкціях кінескопів ця умова порушується через наявність радіуса кривизни колби. Унаслідок цього виникають аберації, зокрема дисторсія, при цьому прямі лінії зображення, що проектується, викривляються назовні, особливо на краях зображення. Відповідно до пропонованої конструкції кінескопа ці аберації компенсуються за рахунок того, що форма зовнішнього торця світлопроводу фактично повторює форму колби з тим же радіусом кривизни, але вигнута в протилежну сторону.

Кінескоп, (у вигляді окремої деталі), відповідно до опису і формулі винаходу, містить: колбу 1 із вмонтованим у її дно регулярним волоконним світлопроводом 2, що має внутрішній торець 3, покритий люмінофором і повторює форму колби, що характеризується радіусом кривизни $R_{\text{внутр}}$, і зовнішній торець 4, виконаний матовим, що має форму увігнутої убік колби 1 площини, що характеризується радіусом кривизни $R_{\text{зовн}}$, що повторює форму колби 1, причому радіуси кривизни однакові: $R_{\text{зовн}} = R_{\text{внутр}}$. Як вказується в [45, — с. 427], «...сферическую аберрацию можно также компенсировать путем комбинации собирающей и рассеивающей линз (рис. 48.2), подобранных соответствующим образом». В якості доказів, що наглядно ілюструє сей постулат, наводимо рисунок 48.2 з цієї книги [45, — с. 427], що має в цій нашій роботі власну нумерацію як рис. 4.13:

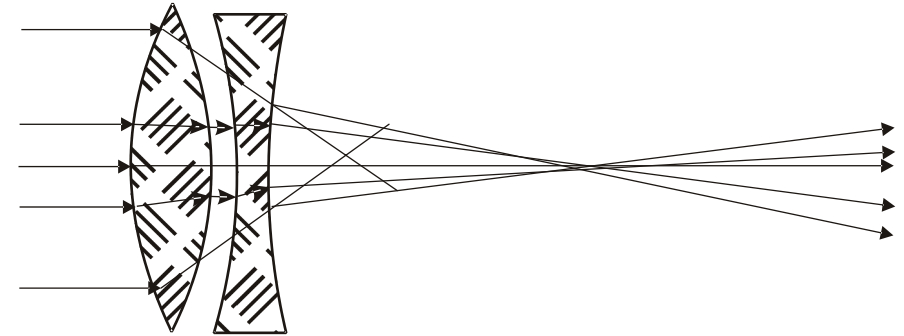


Рис. 4.13. Принцип усунення сферичної аберації в нашому винаході (на підставі відомих положень геометричної оптики) [45, — с. 427. — рис. 48.2].

Пропонований кінескоп ілюструється кресленням — рис. 4.14 (в розрізі).

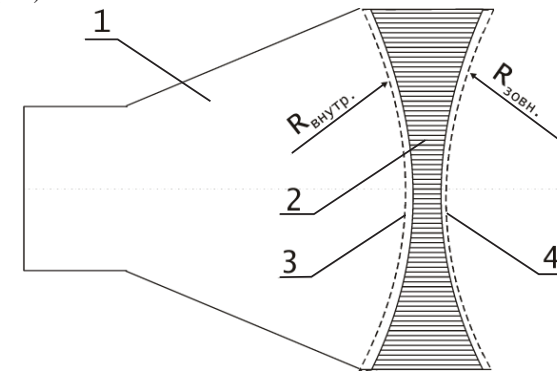


Рис. 4.14. Запатентована конструкція кінескопа згідно [82; 83; 84].

Елемент 1 при об'єднанні з пристроєм візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта, еквівалентний позиції 9 попереднього малюнка 4.11; елемент 3 еквівалентний позиціям 8 і 11 того ж малюнка (у залежності від розташування: вище відзначалося, що можливо 2 варіанти його установки). Елемент 2 схематично зображений на рис. 4.11 як позиція 12.

Кінескоп [82; 83; 84] працює в такий спосіб.

Коли на колбі 1 проектується вихідне зображення, що містить, наприклад прямокутну сітку ліній, через наявність опуклості з радіусом кривизни $R_{\text{внутр}}$, неминуче обумовленою конструкцією колби 1, воно випробує аберацію, зокрема дисторсію, тобто прямі лінії вихідного зображення викривляються назовні, особливо на кутах зображення, перекручування зображення обумовлені радіусом кривизни. Це ж дисторговане зображення проектується на внутрішній торець 3 волоконного світловоду. При подальшому проектуванні зображення, що випробує дисторсію, на зовнішній торець 4 світлопроводу 2, таке перекручене зображення повторно випробує дисторсію, але при цьому для площини, що характеризується увігнутістю, прямі лінії повинні викривлятися усередину. Якщо абстрактно досліджувати зображення на зовнішньому торці світлопроводу, умовно допускаючи, що на внутрішній торець світлопроводу воно подано без перекручувань, то на зовнішньому торці світлопроводу виникне дисторсія через його увігнутість, і прямі лінії зображення скривлені усередину, особливо на його краях. Але на внутрішній торець світлопроводу зображення подається перекрученим, за вищевказаними причинами, при додаванні двох аберацій — опуклої й увігнутої дисторсії (причому радіуси кривизни однакові) вони взаємно компенсуються. Увігнутість зовнішньої поверхні 4 світлопроводу 2, усуває аберації (у вигляді «бочки» або «подушки» на дні колби 1 (тобто на внутрішній поверхні 3 світлопроводу) через збіг $R_{\text{зовн}} = R_{\text{внутр}}$).

Пристрій візуалізації і картографування зон зашумованості міської забудови з недискретним способом реєстрації розподілу енергії, що моделюється, на поверхні моделі об'єкта [1] працює в такий спосіб. З дотриманням вимог геометричної подібності збирають модель міської забудови, установлюючи на підставі 1 моделі міських будинків і споруджень 2, засобів боротьби із шумом 3, моделі точкових 4 і лінійних 5 ДШ. Інтенсивність ІЧ-випромінювання на моделі підбирають пропорційності інтенсивності звуку в природі, використовуючи готові співвідношення (що наведені в [69]) за рахунок регулювання сили струму електричного живлення моделей ДШ. Частотний спектр ІЧ-випромінювання в моделі підбирають пропорційно частотному спектру звуку в природі відповідно до вищеописаних вимог подібності (наприклад, у масштабі лінійних розмірів $c_1 = 1:17$ звук з довжи-

ною хвилі $\lambda_n = 1,7$ см заміняється ІЧ — випромінювання з $\lambda_m = 1$ мм), що досягається за рахунок установки світлофільтрів 6 на моделі джерел звуку 4 і 5. Таким чином, досягається пропорційність АЧХ ІЧ-випромінювання в моделі і звуку в природі з дотриманням вимог подібності. Оскільки звук і ІЧ-випромінювання підкоряється однаковим для всіх типів хвиль законам поширення, енергія ІЧ-випромінювання поширюється на поверхні моделі ідентично тому, як поширюється енергія звуку на поверхні натурального об'єкта (з дотриманням всіх особливостей дифракційних і інтерференційних явищ і ін.). При необхідності моделюють ефективність різних можливих шумозахисних засобів, здійснюють підбір їхніх варіантів, розмірів, конфігурацій за рахунок використання різних варіацій їхніх моделей 3. За допомогою оптичної системи 7 зображення розподілу енергії, що моделюється, проектується на чуттєвий елемент, наприклад, фотокатод 8 електронно-оптичного перетворювача. При цьому може бути отримане це зображення в будь-якій площині, що цікавить дослідників. Як правило, з метою побудови карт шуму потрібно зображення розподілу енергії, що моделюється, на основі моделі 1 (еквівалентній поверхні землі в природі), для чого вона повинна бути прозорою для ІЧ-випромінювання. Під дією ІЧ-променів фотокатод 8 починає випускати електрони, причому з тих ділянок, де яскравість зображення більше, відповідно більше і випускається електронів. Між екраном 11 і фотокатодом 8 (до високовольтного анода 10) прикладена висока напруга, завдяки чому електрони розганяються, бомбардують екран 11 і викликають його світіння, «малюючи» картину, видиму оком людини. Таким чином, візуалізується зображення розподілу енергії, що моделюється, при цьому можливо його фотографування, а також кількісна оцінка цієї енергії різних точках зображення, тобто вимір у них інтенсивності (опромінення ІЧ-випромінюванням).

Приклад такої картини приведений на рис. 4.15. Наступна ілюстрація (рис. 4.16) взята з роботи [11], що вважається свого роду «класикою» картографування шумового режиму. В роботі [11], що належить перу корифеїв АМ, наведені зразки карт шумового режиму задля найбільш поширених випадків, один з яких (саме — рис. 4.16) ми вдало промоделивали в наших власних дослідженнях: (див. рис. 4.15), та надаємо задля подальшого зіставлення.

Треба зауважити, що містобудівельна ситуація з зонами акустичної тіні від трьох будинків моделювалася нами неодноразово (з різноманітними варіаціями). Поглянемо ще раз на рис. 4.15.

Незважаючи на визначену зовнішню подібність з наступним далі рис. 4.19, варто помітити, що ці 2 зображення — абсолютно різні. Відрізняється не тільки орієнтація будинків на аналоговій моделі; відрізняється насамперед розподіл зон акустичної тіні. Цей приклад наочно показує, що навіть у зовні подібних за багатьма ознаками умовах зони тіні не завжди адекватні.

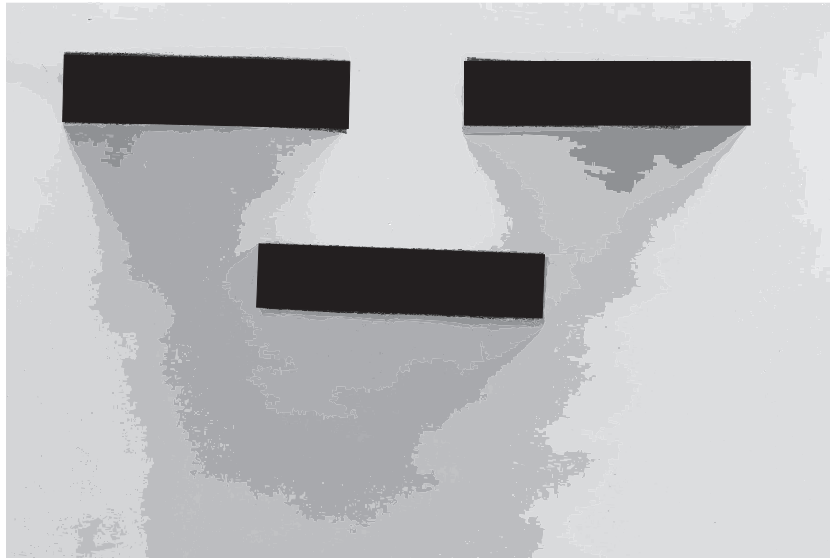


Рис. 4.15. Результати одного з експериментів, зафіксовані за допомогою вищеописаного пристрою.

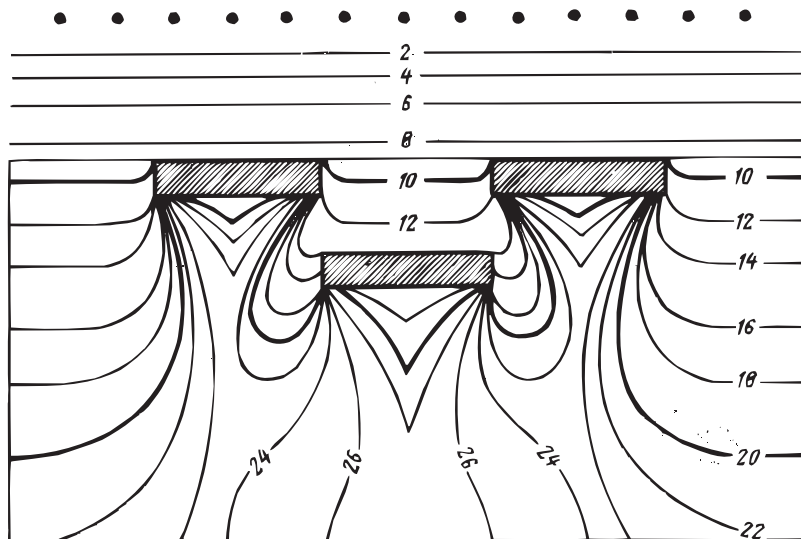


Рис. 4.16. Еталонна карта шуму задля адекватного випадку, взята з [11]. Наочна повна еквівалентність із даними наших досліджень.

4.3. Принципово новий спосіб аналогового моделювання процесів розповсюдження звукових хвиль [86, 87, 88]

Новий винахід в даній галузі (згідно з [86]) відноситься до області приладобудування, а саме до способів дослідження характеристик звукового поля непрямыми методами і може знайти застосування при моделюванні процесів поширення звукових хвиль на території міста з метою дослідження її зашумованості промисловим, транспортним і іншим шумом і при моделюванні процесів поширення звукових хвиль усередині приміщень з метою прогнозування їхнього шумового режиму чи з метою архітектурної акустики.

Відоме моделювання поширення шуму в міській забудові оптичними методами [19]. Джерело звуку при такому способі аналогового моделювання імітувалось за допомогою ДС; усі поверхні, що відбивають в природі звук, (тобто фасади будинків і т.п.) були виконані з дзеркал, а вимір інтенсивності звукової енергії було замінено виміром освітленості. Цей спосіб характеризується відсутністю позитивних результатів через недотримання вимоги подібності — співвідношення довжин хвиль і геометричних розмірів моделей будинку, території і т.п. не були рівними в моделі й у природі, а згідно відомих вимог подібності вони повинні бути рівні, що особливо важливо при моделюванні дифракційних явищ, що неминуче супроводжують поширення звукових хвиль. У спеціальній літературі [15] прямо зазначено, що таких ненадійних методів моделювання варто уникати.

Прототипом вашого винаходу є спосіб аналогового моделювання процесів поширення звукових хвиль усередині приміщення [21], що описаний в підрозділі 1.4.

Недоліком даного способу є низька вірогідність даних, а точніше — її відсутність через недотримання вимоги подібності хвильових явищ при поширенні хвиль — недотримання відносини лінійних розмірів L до довжин хвиль λ у моделі й у природі:

$$L_m/\lambda_m = L_n/\lambda_n,$$

що докладно розписано в главі 1, формула (1.5). (Той же самий недолік, що й у вищевказаного аналога). При цьому через дуже малі довжини хвиль λ , що для видимого світла знаходяться в діапазоні $380 \text{ нм} < \lambda < 770 \text{ нм}$, побудова моделі приміщення з дотриманням вимоги подібності попросту неможлива?! Навіть при використанні цього способу до моделювання процесу поширення звукових хвиль на території міської забудови, виконаної в значно меншому масштабі, аніж модель приміщення, результати моделювання жалюгідні.

Наприклад (див. підрозділ 1.4), обчислений масштаб лінійних розмірів моделі, рівний $1,6 \cdot 10^{-4}$, при якому модель житлового будинку із шести

дев'ятиповерхових секцій, що має в натурі лінійні розміри 134x35x14 метрів, на моделі має розміри 2,2 x 0,6x0,23 мм. На таких мікроскопічних моделях важко і практично неможливо вірогідно досліджувати процеси, що супроводжують поширення звукових хвиль. Таким чином, відомий спосіб аналогового моделювання процесів поширення звукових хвиль, заснований на використанні енергії світлових хвиль у видимому діапазоні саме як енергії, що моделює енергію звукових хвиль, і вимірі освітленості в контрольованих точках об'єкта, що характеризується вкрай обмеженою областю застосування і недостатньою вірогідністю через відсутність можливості реалізувати при побудові моделі вимоги подібності.

Завданням винаходу є розширення області застосування способу аналогового моделювання процесів поширення звукових хвиль і підвищення його вірогідності.

Поставлене завдання забезпечується за рахунок того, що спосіб аналогового моделювання процесів поширення звукових хвиль, що включає моделювання процесу поширення звукової енергії на моделі досліджуваного об'єкта і вимір її величини в контрольованих місцях моделі, відповідно до формули винаходу [86], передбачає, що хвильовий процес поширення звукової енергії моделюють хвильовим процесом поширення ЕМ хвиль у діапазоні радіочастот, тобто радіохвилями, і вимірюють напруженість електромагнітного поля, причому як моделі джерела звуку використовують радіопередавач з передавальною антеною, а в якості засобу виміру величини енергії, що вимірюється, — радіокомпаратор.

Використання енергії ЕМ хвиль у діапазоні радіочастот в якості випромінювання, що моделює звукове випромінювання, дозволяє значно розширити діапазон можливих масштабів лінійних розмірів при побудові моделі на відміну від вкрай обмеженого діапазону масштабів лінійних розмірів у способі-прототипі, з можливістю дотримання відомих вимог подібності при моделюванні, за рахунок чого значно розширюється область застосування способу і збільшується його вірогідність. Згідно [50] радіочастоти являють собою частоти електромагнітних коливань, що займають діапазон, який частково перекривається у верхній частині з діапазоном ІЧ частот, у нижній — з діапазоном електричних коливань звукової частоти. Відповідно до міжнародного регламенту радіочастоти поділяються на 9 діапазонів з №№ 4-12 і охоплюють смугу 3 кГц $< f < 3$ ТГц (чи еквівалентно — $100 \text{ км} > \lambda > 0,1 \text{ мм}$): див. п. 2.1. Тому неважко підібрати серед них необхідну смугу частот, виходячи з масштабів наявної моделі досліджуваного об'єкта, щоб дотримати вимогу подібності, яка полягає в забезпеченні рівності відносин лінійних розмірів до довжин хвиль у моделі й у натурі, і виражається в зміні частоти випромінювання, моделює натурне, стосовно частоти натурального випромінювання назад пропорційно маш-

табу лінійних розмірів моделі. Так, наприклад, якщо необхідно змоделювати випромінювання звукових хвиль, що мають частоту 1 кГц на моделі об'єкта, виготовленої в масштабі лінійних розмірів 1:100 — зробити це якимось іншими засобами неможливо: ні шляхом фізичного моделювання ("звук — звуком"), де модель повинна бути виконана в більш великому масштабі, щоб не переходити в область ультразвукових частот, які не можна застосовувати при фізичному моделюванні згідно [10]; ні шляхом аналогового моделювання з використанням видимого світла («звук» — «світлом»), де модель повинна бути виконана в значно більш дрібному масштабі (наприклад, $1 \cdot 10^{-4}$, як у вищеописаному в п. 1.4 прикладі), тобто що неможливо здійснити жодним з відомих способів моделювання процесів поширення звукових хвиль, — відповідно до пропонованого способу варто тільки застосувати так звані кілометрові радіохвилі 5-го діапазону з частотою 100 кГц:

$$f_m = f_n / c_L = f_n / 0,01 = 1000 / 0,01 = 1000000 \text{ Гц.}$$

Незважаючи на різну природу, усі хвилі підкоряються загальним закономірностям, реалізують при поширенні зовсім аналогічні між собою явища дифракції, інтерференції, відбиття і т.п., і правомірність використання радіохвиль для моделювання звукових хвиль не викликає сумніву, тим більше, що в способі-прототипі звукові хвилі замінюються світловими хвилями видимого діапазону.

Енергетичною характеристикою електромагнітного поля є його напруженість, що буде різною в різних точках моделі і визначається саме особливостями хвильових процесів (інтерференція, дифракція і т.п.). Отже, кількісно оцінити розподіл енергії, що моделюється, в різних місцях контролю на моделі можна шляхом виміру напруженості.

Джерело звуку на моделі імітується джерелом радіохвиль відповідної радіочастоти, підбраної з урахуванням зазначеної вимоги подібності, а саме радіопередавачем, тобто пристроєм для одержання модульованих електричних коливань. При цьому радіопередавач, — окремі вузли якого, такі як генератор і модулятор, джерела електроживлення і т.п. мають великі лінійні розміри, непорівнянні з масштабом лінійних розмірів, у якому виготовлена модель досліджуваного об'єкта, — може бути віднесений від цієї моделі, на якій устанавлюється тільки передавальна антена, що виконана у відповідному масштабі і має характеристику спрямованості, що відповідає характеристиці спрямованості джерела звуку в натурі. Вимір напруженості електромагнітного поля роблять радіокомпаратором, принцип дії якого заснований на порівнянні перемінної електричної напруги в приймальній антені, (що виконується також у відповідному масштабі) з напругою еталонного генератора.

Радіопередавачі, антени і радіокомпаратори відомі [50, с. 28, 406-407]. Спосіб технічно реалізуемий і може знайти дуже широке застосування з метою прогнозування шумового режиму міських забудов, внутрішніх приміщень у будинках і т.п. з метою архітектурної акустики, також з метою моделювання акустичних імпульсів великої потужності, що має особливо важливе значення для теоретичної фізики простору-часу.

Заявники в процесі патентного пошуку не знайшли аналогічних технічних рішень. Це в офіційному порядку було стверджено патентом України [86].

4.4. Аналогове моделювання процесів поширення звуку на території міста (дискретний спосіб реєстрації)

Як вже говорилося вище, недоліком відомого пристрою [24, 25] є складність, велика тривалість і висока трудомісткість одержання фотографічних відбитків, неможливість одержання цілком аналогічних один одному копій того самого експерименту, практична неможливість безпосереднього введення дані моделювання в комп'ютер. В пристрої-прототипі нашої подальшої розробки потрібно здійснити фотографічну обробку отриманого зображення: для чого потрібно витягти фотопластинку; виявити її, закріпити (з дотриманням відомих у фотографії способів недопущення засвітлення фотовідбитка: тобто такі роботи проводяться в темряві чи при світлі спеціальної червоної лампи).

Подальшим розвитком цієї ідеї з'явилося удосконалювання засобів реєстрації розподілу випромінювання, що моделюється, на території об'єкта, що дозволяють одержати його якісні і кількісні параметри, котрі його характеризують, за рахунок винайденого нами способу аналогового моделювання [86].

У зв'язку з цим була розроблена також оригінальна конструкція пристрою аналогового моделювання процесів поширення звуку на території міста [89, 90, 91], функціональна схема якого приведена на прикладеному кресленні (рис. 4.17)

На кресленні показані:

I, II, III, ... IX — місця контролю (розрахункові, або контрольні точки) на моделі міської території, і власне — (позиції 1-10), — пристрій аналогового моделювання процесів поширення звуку на території міста.

Пристрій має у своєму складі такі частини:

1 — змінна модель міської території (у відповідності до особливостей натурального рельєфу) з моделями споруджень існуючої та (або) перспективної забудови (на якій визначаються місця контролю I, II, III, ... IX);

2 — модель джерела звуку у вигляді джерела ІЧ випромінювання або випромінювання в діапазоні радіохвиль;

3 — блок живлення;
— засіб реєстрації і виміру розподілу енергії, що моделюється, в складі:

4 — датчик ІЧ-випромінювання (тензорезистивний пірометричний перетворювач);

5 — перетворювач (наприклад, міст зі статичним зрівноваженням);

6 — підсилювач;

7 — система фільтрів;

8 — селектор фільтрів;

9 — вимірник;

10 — блок індикації (дисплей).

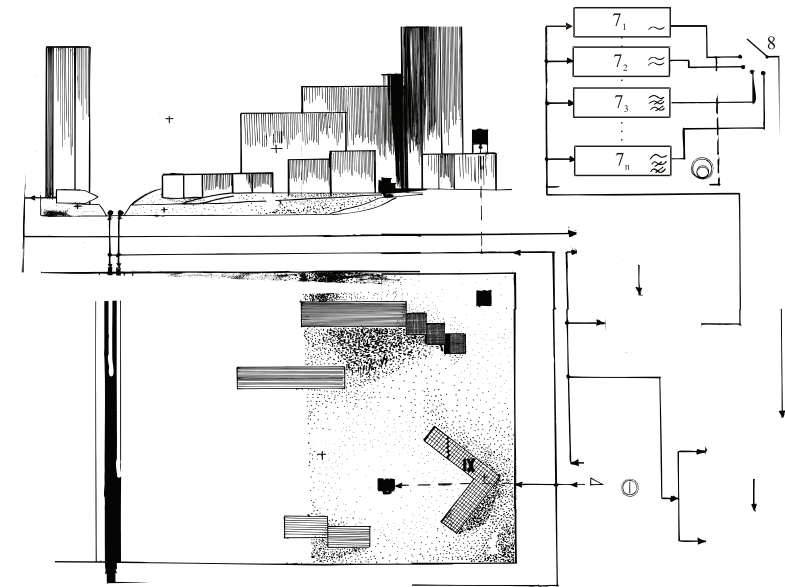


Рис. 4.17. Загальний вид пристрою аналогового моделювання процесів поширення звуку на території міста.

Пристрій працює в такий спосіб.

На моделі досліджуваного об'єкта 1, виготовленій з дотриманням вимог подібності, з урахуванням деталей природи (особливостей рельєфу місцевості і міської забудови, наприклад) встановлюють у необхідних місцях джерела ІЧ- випромінювання (або випромінювання в діапазоні радіохвиль) 2, використовувані як моделі джерел звуку, причому АЧХ цих джерел моделюють АЧХ натурального звукового випромінювання. У необхідному місці контролю (у РТ I, II, III, ... IX) установлюють датчик 4

задля прийому ІЧ- випромінювання (або випромінювання в діапазоні радіохвиль). Може бути використаний такий єдиний датчик 4, що здійснює сканування усього поля разом. Включають блок живлення 3 пристрою. Оскільки спектральні характеристики й інтенсивність (опромінення) в місцях контролю ІЧ- випромінювання (або випромінювання в діапазоні радіохвиль) на моделі аналогічні акустичним характеристикам у природі, ІЧ- випромінювання (або випромінювання в діапазоні радіохвиль) поширюється на моделі з дотриманням хвильових явищ, характерних для звуку (інтерференція, дифракція і т.п.), що однакові для хвиль будь-якої природи, датчик 4 буде фіксувати опромінення ІЧ — випромінюванням (або випромінюванням в діапазоні радіохвиль), що відповідає інтенсивності звуку в місці контролю. Прийнятий сигнал від датчика 4 надходить на перетворювач 5, що забезпечує формування електричного сигналу, пропорційного інтенсивності енергії, що моделюється: (опромінення в місці контролю). З виходу перетворювача 5 електричний сигнал подається на вхід підсилювача 6, з виходу якого надходить на систему фільтрів 7, що забезпечують виділення із широкосмугового сигналу необхідних спектральних складових, відповідних спектральним складовим звуку, обумовленим нормативними документами для контролю рівнів звукового тиску.

Так, наприклад, фільтр 7_1 забезпечує виділення сигналу, аналогічно третьоктавній смузі звукових частот 31.5 Гц, фільтр 7_2 — аналогічно смузі звукових частот 40 Гц і т.д. За допомогою перемикача 8 виробляється підключення виходу кожного з фільтрів до входу вимірника 9. Обмірювана величина відображується блоком індикації 10, відтарованим у dB re 1 pW/m².

Таким чином, наявність серед елементів пристрою системи фільтрів з перемикачем, що забезпечує вибір необхідного фільтра, дозволяє здійснювати спектральний аналіз випромінювання, що моделюється, тому що загасання у визначених смугах частот може бути більше, ніж в інші.

Після фіксації результатів виміру датчик 4 переміщається в наступне місце контролю, — наприклад, РТ II, III, ... IX і т.д.

Отриману в ході модельних експериментів інформацію вносять у комп'ютер. На її базі можуть бути створені карти шуму, що описують розподіл акустичного забруднення на території міста.

Приклад такої карти шуму, одержаної в результаті експериментів, для конкретного окремо узятій ділянки міської забудови, на якому розташована житлова група одного з мікрорайонів Салтівського житлового масиву м. Харкова, яка включає три дев'ятиповерхових будинки з лінійним ДШ у вигляді транспортної автомагістралі (прилягаючої вулиці), поданий на наступних ілюстраціях. Масштаб схеми — 1:1250 (у 1 см — 1,25 м). Цьому значенню відповідає константа подібності $c_L=0,0008$. На рис. 4.18 показані

вихідні дані у вигляді плану місцевості, на якому чітко видні вищевказані будинки, що служать шумозахисними екранами на шляху поширення шумового забруднення, дерева, і інші елементи інженерного благоустрою, які впливають на звукові процеси, що відбуваються на території житлової групи. Варто звернути увагу, що на схемі проведені топографічні горизонталі (спад рівнів від 160 м над рівнем моря до 157), узяті з даних геодезичної зйомки місцевості. Очевидно, крутість рельєфу (перепад висот більш ніж на 3 м на ділянці обмеженої площі) впливає на процеси поширення шуму, — але як її врахувати теоретичними розрахунками?

У випадку побудови оптико-акустичної аналогової моделі її основу (поз. 1 на рис. 4.17) просто відхиляють від строго горизонтального положення під визначеним кутом, що відповідає природному ухилу рельєфу місцевості. Відповідно до теорії подібності повинне бути забезпечена рівність кутів нахилу відповідних елементів моделі і природи. Похиле положення змінної моделі міської території, з ухилом $i = 0,03\%$, що відповідає природному перепаду висот на місцевості, анітрошки не утрудняє практичне проведення експерименту.

Лінійне ДШ на місцевості (автомобільна дорога) у ході експерименту замінюється його моделлю у вигляді лінійного ДШ (ІЧ випромінювання, або випромінювання в діапазоні радіохвиль). Енергетичний потік, випромінюваний такою моделлю ДШ, (що являє собою модель потоку звукової енергії, випромінюваної транспортом, що рухається, від дороги), — пропорційний йому, і зв'язаний з його енергетичними параметрами раніше виведеними нами залежностями [69].

Приймати для автомобілів розташування ДШ на рівні проїзної частини нерационально. Натурні виміри показали, що шум поширюється і від двигуна, і від вихлопної труби. Тому, відповідно до сформованої практики [43, с. 67], щоб забезпечити вірогідність розрахунків, висоту ДШ над рівнем проїзної частини для легкових автомобілів приймають $= 0,4$ м; для вантажних — 1,0 м. В обраному масштабі між поверхнею моделі (поз. 1 на рис. 4.17) та моделями ДШ завжди є зазор, який апроксимує цю відстань.

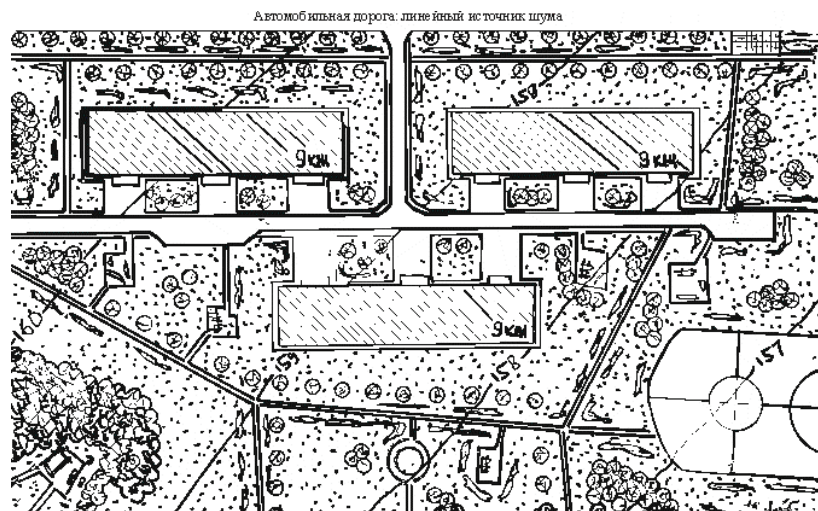


Рис. 4.18. Конкретна містобудівна ситуація в зоні, що підлягає дослідженню. зашумованості міської забудови. Зони звукової тіні на рис. 4.19 представлені адекватними їм зонами звичайної, світлової тіні. При цьому інтенсивність фарбування отриманої картини пропорційна інтенсивності випромінювання, що моделюється. За тією же причиною проекції моделей будинків на модель території на знімку виходять зачерненими.

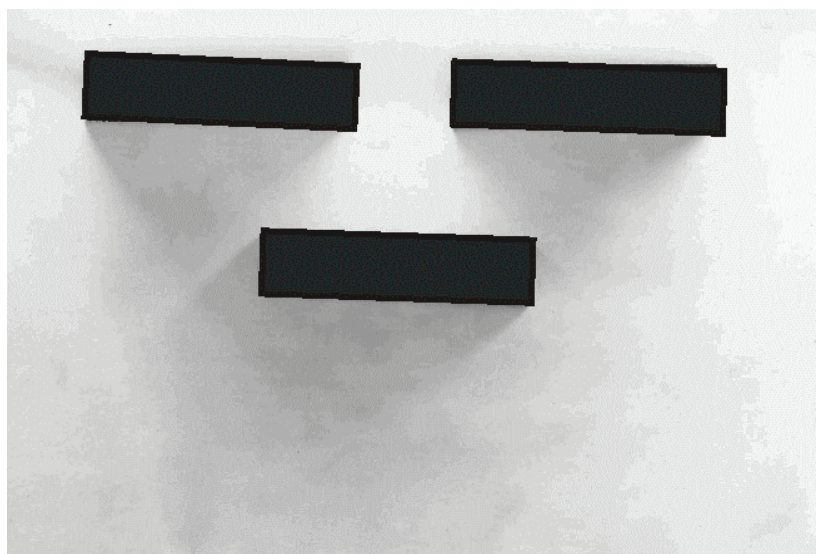


Рис. 4.19. Розподіл досліджуваної енергії на поверхні моделі.

На рис. 4.20 представлено карту шуму для даного випадку, отримана в результаті аналізу проведених експериментів. Побудовані так звані ізобели — лінії, що з'єднують точки з однаковими значеннями рівня звуку, вираженими в дБА. Спад рівнів звуку, як і випливало очікувати, здійснюється всередину мікрорайону, у міру віддалення від автомобільної дороги, що є його основним джерелом. Перші два будинки, що виходять фасадами на червоні лінії вулиці, є непоганими акустичними екранами, що перешкоджають проникненню шуму усередину території селитби мікрорайону. У просвіті між будинками утворений «простріл», куди в розрив суцільної лінії міської забудови проникає шум від дороги. Однак подальшому поширенню акустичного забруднення всередину селитби мікрорайону перешкоджає третій будинок, що знаходиться в другому ешелоні забудови. Зони акустичної тіні за будинками мають чітко виражену трикутну форму. У результаті інтерференції звукових хвиль, і змодельованого в результаті експериментів ухилу місцевості трикутники звукової тіні не рівнобедрені, (як це можна було б очікувати теоретично), мають своєрідні відхилення від правильної геометричної форми, і т.п. (виявляються винятково за допомогою аналогового моделювання) свої специфічні особливості.

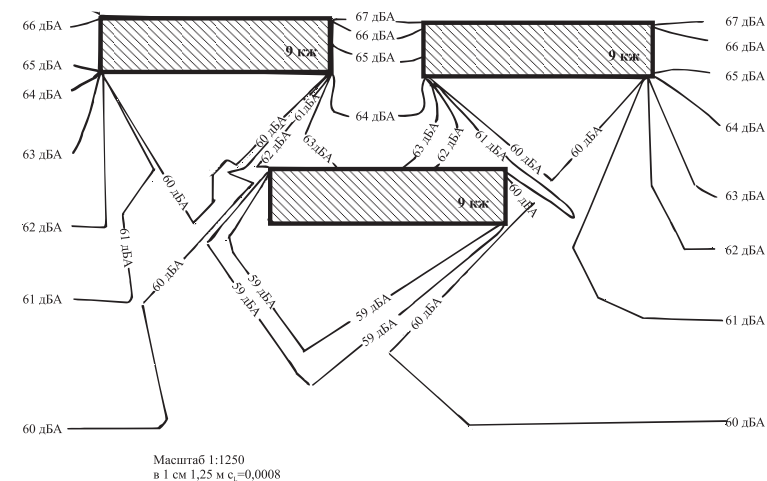


Рис. 4.20. Карта шуму, отримана в результаті одного з експериментів.

Побудова карт шуму, їхнє детальне вивчення, і розробка (на базі попереднього тому аналізу отриманих у результаті моделювання зведень) належних заходів щодо оптимізації акустичного клімату урбанізованих територій дозволяє вирішити безліч екологічних проблем, зв'язаних із шумовим забрудненням навколишнього середовища, і забезпечити акустичний комфорт Людини в місцях її мешкання.

5. Точність і вірогідність результатів моделювання [92]

Достатня для технічних досліджень точність моделювання повинна бути забезпечена доступними засобами. Стосовно до аналогового і квазіаналогового моделювання процесів поширення різноманітних випромінювань це означає, що підвищення точності моделювання зв'язано з підвищенням ступеня адекватності математичних описів адекватних процесів у моделі й у натурі; а також з підвищенням точності виконання елементів моделі; дорівнює точності завдання необхідних початкових і граничних умов для моделювання. Кінцева точність моделювання буде визначатися впливом на кінцевий результат малих відхилень величин, які його визначають, — що, наприклад, задаються на вході системи.

Погрішності моделювання виникають у результаті дії безлічі сумарних факторів, кожний з яких несе в собі приватну погрішність.

Якщо не враховувати грубі помилки (так звані промахи), що порівняно легко можуть бути ідентифіковані завдяки наявності зворотного зв'язку між експериментатором і пристроєм, що моделює, — сумарна погрішність Q_{Σ} складається із систематичної $Q_{\text{систем}}$ і випадкової $Q_{\text{випадк}}$ погрішностей:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{систем}} + Q_{\text{випадк}}$$

Випадкова погрішність $Q_{\text{випадк}}$ при моделюванні являє собою помилки виміру, і погрішності від нестабільності різних елементів моделі, що мають характер випадкових функцій. Оскільки пропонувані пристрої моделювання можуть бути використані для рішення безлічі типових задач, поняття «випадкові погрішності» розширюється.

До випадкової погрішності $Q_{\text{випадк}}$ можуть бути віднесені помилки набору параметрів системи в пристрої моделювання, що можуть приймати випадкові значення, обмежені полем допуску, — і мати при тому істотну вагу в сумарній погрішності моделі. Оцінка випадкової погрішності здійснювалася за рахунок повторного рішення якої-небудь задачі на аналоговій моделі, при якому створювалися різні сполучення використовуваних однотипних елементів моделі для набору тієї ж задачі. Розсіювання результатів наочно видно з результатів повторних вимірів, що проводилися не менш 3 разів; рішення уточнювалося за рахунок отриманих середніх значень.

Систематична погрішність $Q_{\text{систем}}$ носить регулярний характер і виникає в результаті неточності математичного опису щодо дійсного фізичного процесу (тобто — неповна аналогія моделі). Мається на увазі так звана методична погрішність, що є наслідком відступу від точної подібності природи і моделі. Цей відступ викликаний відомим спрощенням моделі, і внесенням ряду додаткових факторів, що ускладнюють явища в моделі.

До систематичної погрішності $Q_{\text{систем}}$ відносяться також погрішності від завдання початкових і граничних умов, у зв'язку з їх спрощенням і деякою ідеалізацією; а також погрішності апроксимації функціональних залежностей, реалізованих нелінійними елементами аналогової моделі (до яких відноситься, наприклад, загасання випромінювання, що моделює натурне).

Для оцінки приватних систематичних погрішностей результатів моделювання вони зіставлялися з рішенням, у якому дана погрішність зменшена. При цьому фізична система з розподіленими параметрами (наприклад, моделі ДШ) представлялася у вигляді сукупності лінійних елементів; а помилка оцінювалася зіставленням між собою рішень для $1n$; $2n$; $4n$; ... елементів. Кусочно-лінійна апроксимація нелінійних залежностей спаду інтенсивності випромінювання при поширенні його на моделі залежно від відстані для оцінки помилок по черзі замінювалася при моделюванні $1n$; $2n$; $4n$; ... елементів. При дослідженні локальних погрішностей виявилось, що в аналоговій і квазіаналоговій моделі вони залежать від безлічі причин, не усі з яких очевидні.

Тому поряд з оцінкою основних видів приватних погрішностей застосовується загальна оцінка погрішності моделювання, реалізована для груп подібних систем шляхом порівняння результатів моделювання аналоговими методами з чисельним рішенням контрольних задач, для яких малися точні аналітичні рішення, отримані шляхом використання описаних вище аналітичних і графічних методів; а також — дані натурних вимірів.



Рис. 5.1. Зіставлення погрішностей натурних вимірів, математичної, і аналогової (квазіаналогової) моделей процесів поширення звуку, призначених для визначення ефективності шумозахисних пристроїв:

$$\sigma^2 q_{(HB-AM)} = (\sigma^2 q_{(HB-MM)} + \sigma^2 q_{(MM-AM)})^{1/2}. \quad (5.3)$$

Ідентична залежність існує і для граничних помилок $\sigma_{\text{граничне}}$, що характеризують поле допуску величин, що задаються. Приймалося:

$$\sigma_{\text{граничне}}(q) = 3 \sigma(q).$$

При розгляданні формули (5.3) був зроблений висновок, що збільшення погрішності від натурних вимірів, — (даних за якою у загальному випадку може і не бути: досить тільки даних розрахунку по математичній моделі — якщо вона досить достовірна стосовно натурних процесів, що вона описує?) — стосовно пристрою аналогового моделювання в порівнянні з математичною моделлю визначаються формулою:

$$\sigma_{\text{(НИ-AM)}} = \sigma_{\text{(НИ-MM)}} (1 + \alpha)^{1/2},$$

$$\text{де } \alpha = \sigma_{\text{(MM-AM)}} / \sigma_{\text{(НИ-AM)}}.$$

При дослідженні точності і вірогідності всіх розроблених пристроїв аналогового і квазіаналогового моделювання з'ясувалося, що погрішність вихідної величини в моделюючому пристрої в 2 рази менше погрішності завдання цих же величин у порівнянні з натурою в математичній моделі. Тоді при $\alpha < 1/2$ помилка в 2% збільшується не більш, ніж до значення 2,2%! Таким чином, варто зробити висновок про однакову вірогідність усіх пропонувананих аналогових і квазіаналогових моделей, і математичної моделі.

Оскільки загальна погрішність шуканої величини залежить від первинних помилок завдання вихідних величин, причому внески різних первинних помилок також різні, були застосовані методи експериментального визначення складових загальної погрішності по первинних помилках. Припустимо, що шукана величина ψ зв'язана з вихідною величиною:

$$\psi = Y F(q_1; q_2; \dots; q_n)$$

де Y -зовнішнє збурювання, що діє на систему (узагальнені зовнішні сили, що дестабілізують її); q_i - параметри системи, що задаються ($i = 1; 2; \dots; n$).

Тоді випадкова помилка у визначенні шуканої величини

$$\Delta \psi = Y \sum_{i=1}^{\infty} (\partial F / \partial q_i) \Delta q_i + Y F$$

Визначимо відносну випадкову помилку на підставі наведеного вище:

$$\Delta \psi / \psi = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(\partial F / \partial q_i)}{F / q_i} (\Delta q_i / q_i) + \Delta Y / Y \quad (5.4)$$

$\Delta q_{(HB-MM)}$ — Первинні погрішності, що характеризують розбіжність значень якої-небудь фізичної величини при її натурних вимірах, і при її обчисленні по математичній моделі (недосконалість математичного опису; мала вивченість фізичного явища, що моделюється, самого по собі);

$\Delta q_{(MM-AM)}$ — Первинні погрішності, що характеризують розбіжність значень якої-небудь фізичної величини між результатами аналогового (квазіаналогового) моделювання, і при її обчисленні по математичній моделі (невірогідність відображення в моделі адекватних процесів);

$\Delta q_{(HB-AM)}$ — Первинні погрішності, що характеризують розбіжність значень якої-небудь фізичної величини при її натурних вимірах і результатами аналогового (квазіаналогового) моделювання (недосконалість моделі)

При цьому переслідувалося не одержання строгого збігу результатів аналогового моделювання з відомими чисельними рішеннями, — а вірогідність відображення в моделі досліджуваного хвильового явища. У зв'язку з цим враховувалися вимоги точності чисельного рішення стосовно до використовуваних математичних моделей. Зіставлення перерахованих вище трьох груп даних дозволило виділити три різновиди первинних погрішностей: $\Delta q_{(HB-MM)}$; $\Delta q_{(MM-AM)}$; $\Delta q_{(HB-AM)}$. Вони представлені на схемі, з якої випливає:

$$\Delta q_{(HB-AM)} = \Delta q_{(HB-MM)} + \Delta q_{(MM-AM)}. \quad (5.1)$$

Зводимо (5.1) в квадрат:

$$\delta^2 q_{(HB-AM)} = \delta^2 q_{(HB-MM)} + \delta^2 q_{(MM-AM)} + \delta^2 q_{(HB-MM)}$$

При цьому відповідною відносною погрішністю ϵ :

$$\Delta(q) = \Delta q / q.$$

Оскільки на пропонованих пристроях моделювання зважується безліч однотипних задач для кожної фізичної величини, можна провести усереднення відносної погрішності по цій безлічі.

Припустимо, що відносна первинна погрішність завдання параметрів q_i ($i = 1; 2; \dots; n$). Число однотипних задач розподіляється за законом Гауса:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(HB-AM)} = \sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(HB-MM)} + \sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(MM-AM)}$$

Оскільки по аксіомі випадкових погрішностей:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \delta^2(q_i)_{(HB-MM)} \cdot \delta^2_{(MM-AM)} = 0 \quad (5.2)$$

із (5.2) випливає залежність між середніми квадратичними помилками δ завдання вихідних величин:

Виходячи із (5.4), запишемо вираження для середньої квадратичної помилки моделювання:

$$\sum(\psi)_{\text{ни.ам}} = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\left\{ \frac{(\partial F / \partial q_i)}{F / q_i} \right\}^2 \sigma^2 q_{(AM-MM)} + \sigma^2 q_{(HB-AM)} \right]^{1/2}$$

Вищеописані пристрої були реалізовані таким чином, щоб їхня систематична погрішність $Q_{\text{систем}}$ не перевищувала задану частку методичної погрішності математичної моделі $Q_{\text{методич(ММ)}}$, а погрішність виміру в них, обумовлена точністю використовуваних вимірювальних приладів, не збільшувала значним чином загальну погрішність моделювання, що досягалося за рахунок застосування прецизійних вимірювальних приладів.

Погрішність результатів обчислення на математичній моделі, основу якої складали загальновідомі акустичні закономірності, призначалася таким чином, щоб не збільшувати погрішність, обумовлену іншими причинами.

Тому загальна помилка моделювання, заснована на вихідних даних, не перевищує помилки чисельного рішення з використанням математичної моделі; і результати аналогового (квазіаналогового) і математичного моделювання є однаково достовірні.

Питання точності і вірогідності пропонованих пристроїв аналогового і квазіаналогового моделювання див. також в [92].

Список використаних джерел

1. *Абракітов В.Э.* Аналоговое и квазианалоговое моделирование процессов распространения звука в пространстве для прогнозирования шумового режима на защищаемом объекте. — Харьков: АО ХГПИ, 1997. — 40 с.
2. <http://abrakitov.narod.ru/Monograph/abrakitov-brochure.djvu> *Абракітов В.Э.* Аналоговое и квазианалоговое моделирование процессов распространения звука в пространстве для прогнозирования шумового режима на защищаемом объекте. (Публ. в Интернет).
3. *Абракітов В.Е.* Роль моделювання акустичних процесів при оптимізації шумового режиму сучасного міста. // Науковий вісник будівництва. Вип. 30. Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2005. — Т. 2. — С. П-190 — 195.
4. *Абракітов В.Э.* Эргономическая оценка реконструируемых территорий городов по критерию их акустического комфорта // Тезисы докладов XXX научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. Харьков, 2000.- С.75.
5. *Александров Л.В., Карпова Ю.А., Шевелев Н.П.* Роль изобретений в охране окружающей среды. М.: ВНИИПИ, 1991. — 84 с.
6. *Абракітов В.Э.* Совершенствование методов прогнозирования шумового режима урбанизированной среды с целью обеспечения акустического комфорта жителей современного города // Програма роботи секції № 7 «Проблеми будівництва та міського господарства» Першій обласній конференції молодих науковців «Тобі, Харківшино, — пошук молодих», що проводилась в межах форуму «Освіта, наука, виробництво — шляхи інтеграції», 19-20 березня 2002 р. — С. 4.
7. *Блинова Л.П., Колесников А.Е., Ланганс Л.Б.* Акустические измерения. М.: Изд-во стандартов, 1971. — 272 с.
8. *Осинов Г.Л., Лопашев Д.З., Федосеева Е.Н.* Акустические измерения в строительстве. М.: Стройиздат, 1978. — 212 с.
9. *Кнудсен Верн О.* Архитектурная акустика. Пер. с англ. *Я.А. Копиловича.* Харьков — Киев: ГОНТИ, 1936. — 526 с.
10. *Абракітов В.Э., Коржик Б.М.* Совершенствование методов физического моделирования звука в целях повышения надежности систем городского хозяйства // Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства: Сб. научных трудов. К.: ИСДО, 1993. — С. 84-91.
11. Градостроительные меры борьбы с шумом / *Осинов Г.Л. и др.* М.: Стройиздат, 1975. — 215 с.
12. *Гардашьян В.М.* Условия тождественности акустических свойств помещения и модели. // Труды НИКФИ, № 28, М., 1959.
13. *Ильина Н.А., Карпалюк И.Т., Абракітов В.Э.* Смещение физических параметров при аналоговом моделировании процессов распространения

света в целях повышения эффективности и надежности систем городского хозяйства //Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства: Сб. научных трудов. К.: ИСДО, 1994.- с.122-125.

14. http://discovery.h11.ru/AbraKitov/OFFSET_PARAMETER_AT_MODELING_of_the_PHYSICAL_PROCESSES.htm. *Абракизов В.Э.* Смещение параметров при моделировании физических процессов (Публ. в Internet).

15. Борьба с шумом / Под ред. *Юдина Е.Я.* М.: Издательство литературы по строительству, 1964. — 701 с.

16. Борьба с шумом на производстве: Справочник / *Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др.*; Под общ. Ред. Е.Я. Юдина. — М.: Машиностроение, 1985. — 400 с.

17. Патент № 22943А (Україна). Спосіб досягнення подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів / *Сафонов В.В., Абракизов В.Е., Захаров Ю.І.* — МПК⁶ G 09 В 23/14. Опубл. 05.05.98.

18. *AbraKitov V.E., Zakharov Yu.I., Safonov V.V.* Methods of evaluation and prediction of the noise environment in building constructions // Noise-93 International Conference. St. Peterburg, May 31 — June 5, 1993.- p.163.

19. *Леушин П.И.* Исследования по противозумовому благоустройству городов. Дисс. канд. техн. наук. Л., 1952.

20. *Вулис Л.А., Гуревич А.М., Клингер В.Г.* Световое моделирование лучистого теплообмена. // «Теплоэнергетика»-1961.-№2.

21. Авторское свидетельство 1019480 СССР, МКИ G 09 В 23/14. Опубл. 1983.

22. *Абракизов В.Э.* Аналоговое моделирование при решении задач борьбы с шумом. Дисс.... канд. техн. наук. Днепропетровск, 1995.- 157 с.

23. *Абракизов В.Э.* Устройство для визуализации зон зашумленности на территории городской застройки. Информационный листок ИЛ №79-95. Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.

24. Патент № 20369 (Україна). Пристрій візуалізації картини зашумованості міської забудови / *Сафонов В.В., Захаров Ю.І., Абракизов В.Е.* — МПК⁶ G01Н 9/00. Опубл. 15.07.97.

25. Патент № 2058601 (Россия). Устройство для визуализации картины зашумленности городской застройки / *Сафонов В.В., Захаров Ю.И., Абракизов В.Э.* — МПК⁶ G10К 1/00.- Опубл. 20.04.96. Бюл. № 11.

26. *Абракизов В.Э., Сафонов В.В.* Применение логарифмического масштаба в измерениях световых величин / Днепропетровский инженерно-строительный институт — Днепропетровск, 1992.- 9 с. Деп. в Укр. НИИНТИ 02.07.92 № 979-Ук 92.

27. *Сокурченко В.И., Крадожен В.И.* Методика светового моделирования излучающих систем // Тези доповідей четвертої міжнародної конференції

«Наука і освіта 2001». Том 14. Технічні науки. — Дніпропетровськ.: Наука і освіта 2001.- С. 24-25.

28. *Самойлюк Е.П., Сокурченко В.И.* Исследование акустических характеристик шумозащитных мероприятий на световых моделях. // Материалы международного симпозиума «Безопасность жизнедеятельности» в XXI веке . — Днепропетровск: Украина, 2001. — с. 60.

29. *Сокурченко В.И., Мосин И.В.* Применение световой аналогии к исследованию характеристик шумозащитных мероприятий. // Строительство, материаловедение, машиностроение / Сб. научн. Трудов. Вып. 28. — Дн-ск, ПГАСиА, 2004. — с. 232-236.

30. <http://www.install-pro.ru/archive/008/64-69.shtml> «Акустические Материалы и Технологии» — Три взгляда на акустику помещений. / *А. П. Ефимов.* Три взгляда на акустику помещений. (Публ. в Интернет).

31. *Новак С.М., Логвинец А.С.* Защита от вибрации и шума в строительстве. — К.: Будивельник, 1990. — с. 32.

32. *Коржик Б.М., Абракизов В.Э.* Влияние фронтов поверхности распространения звуковой энергии на расчеты уровней звукового давления в целях прогнозирования шумового режима городов // Коммунальное хозяйство городов: Республик. межведомственный сборник. Вып. №3. К.: Техніка, 1994.- с.105-110.

33. *Абракизов В.Э.* Типичные формы волновых фронтов разнообразных видов излучений // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. Вып. № 38. К.: Техніка, 2002. — с. 215 — 219.

34. *Кнорринг Г.М.* Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. Л.: Энергия, 1973. — 200 с.

35. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. *Осинова Г.Л. и Юдина Е.Я.* М.: Стройиздат, 1987. — 558 с.

36. *Конарева Н.Е.* Обеспечение акустической безопасности на территориях прилегающих к промышленным предприятиям. Автореферат дисс. канд. техн. наук. Днепропетровск, 1992. — 16 с.

37. *Абракизов В.Е.* Каустики хвильових фронтів, і їхні метаморфози // Строительство, материаловедение, машиностроение / Сб. научн. трудов. Вып. 28. — Дн-ск, ПГАСиА, 2004. — с. 237-241.

38. *Whitney H.* Mappings of the plane into the plane, Ann. Math., 1955, v. 62, p. 374-410.

39. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. Изд-во МГУ, 1983. — 80 с.

40. *Самойлюк Е.П.* Борьба с шумом в градостроительстве. К.: Будивельник, 1975. — 126 с.

41. *Самойлюк Е.П., Денисенко В.И., Пилипенко А.П.* Борьба с шумом в населенных местах. К.: Будивельник, 1981. — 144 с.

42. *Елизаров Ю.М.* Снижение шума и вибрации при формировании сбор-

ного железобетона. М.: Стройиздат, 1970. — 175 с.

43. *Поспелов П.И.* Борьба с шумом на автомобильных дорогах. М.: Транспорт, 1981. — 88 с.

44. *Кухлинг Х.* Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1985. — 520 с.

45. *Кузьмичев В.Е.* Законы и формулы физики. К.: Наукова думка, 1989. — 864 с.

46. *Максвелл Дж. К.* Трактат об электричестве и магнетизме. В 2-х т./ Пер. с англ.-

М.: Наука, 1989. — Т.1. — 410 с.; Т.2. — 436 с.

47. *Абракизов В.Э., Коржик Б.М.* Аналогия волновых явлений звукового и оптического излучений // Коммунальное хозяйство городов: Республик. межведомственный сборник. Вып. № 4. К.: Техніка, 1995.-с.36-37.

48. *Жигулев В.Н., Куркинский А.И.* Общие свойства волн. Элементы акустики. М.: МФТИ, 1981. — 69 с.

49. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. *Прохоров А. М.* — 4-е изд. М.: Сов. Энциклопедия, 1989. — 1632 с.

50. Политехнический словарь / Под ред. *Артамолевского И.И.* М.: Сов. энциклопедия, 1977. — 608 с.

51. *Абракизов В.Е., Сафонов В.В.* Аналогія хвильових характеристик звукового та оптичного випромінювання // Інтенсифікація будівництва: Зб. наук. праць. К.: ІСДО, 1994.- с. 15-20.

52. *Брэгг У.Г.* Мир света. Мир звука.: Пер. с англ. / Под ред. акад. И.В. Обреимова. М.: Наука, 1967. — 335 с.

53. *Абракизов В.Е.* На шляху до наукових відкриттів. Монографія. Х.: Парус, 2007.

54. Патент № 2077826 (Россия). Акустический лазер Абракизова / *Абракизов В.Э.* — МПК⁶ G10K 5/00; Опубл. 20.04.97, Бюл. № 11.

55. Решение о выдаче патента по заявке № 94032106/03 (031463) (Россия). Способ ослабления интенсивности звуковых волн / *Абракизов В.Э., Карпалюк И.Т.* — МПК⁶ E 04 B 1/82, E 04 B 1/74. — Опубл. 27.05.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 15. — С. 110.

56. *Майер В.В.* Полное отражение света в простых опытах. М.: Наука, 1986.- 128 с.

57. *Эйхенвальд А.А.* Избранные работы. М.: Гостехиздат, 1956.- с. 121-146.

58. *Embleton T.F.W., Olson N., Piercy I.E., Rollin D.F.* Inflation in the propagation of sound near the ground /./ J. Acoust. Soc. Am., 1974. № 55. — p. 485.

59. *Piercy I.E., Embleton T.P.W., Sutherland L.C.* Review of noise propagation in the atmosphere // J. Acoust. Soc. Am., 1977. — p. 1403-1413.

60. <http://www.springerlink.com/index/KL56305R484Q1427.pdf> *Trendelenburg P.*, Einfibrung in die Akustik, Springer Verlag Berlin- Göttingen-Heidelberg, 1961.

61. Проекторный луч в атмосфере / Под ред. *Розенберга Г.В.* М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 244 с.

62. *Волькенштейн М.В.* Молекулярная оптика. М.-Л.: Гостехиздат, 1951. — 744 с.

63. *Конюшая Ю.П.* Открытия советских ученых. М.: Моск. рабочий, 1979. — 688 с.

64. *Чунгузов И.П.* Длинные акустические волны в движущейся атмосфере. Автореферат дисс. д. ф.-м. н. М., 1992.- 28 с.

65. <http://shal-14.boom.ru/foto1.htm> О механизмах, сопровождающих фотоэффект. (Публ. в Интернет).

66. Снижение шума на промышленных предприятиях / Ленинградский государственный проектный институт. М.: Стройиздат, 1971. — 168 с.

67. *Седов Л.М.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. — 432 с.

68. *Ногид Л.М.* Теория подобия и размерностей. М.: Судпромгиз, 1959. — 96 с.

69. *Абракизов В.Э.* Система констант подобия при моделировании физических явлений материального мира // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. № 35. К.: Техніка, 2002. — с.38-43.

70. *Денгуб В.М., Смирнов В.Г.* Единицы величин: Словарь-справочник. М.: Изд-во стандартов, 1990. — 240 с.

71. *Абракизов В.Э.* Взаимосвязь сходственных параметров модели и природы при аналоговом моделировании процессов распространения шума// Тези доповідей науково-методичної конференції «Безпека життєдіяльності» Харків, 2004. — С. 82.

72. *Сафонов В.В., Абракизов В.Е., Богданов Ю.В.* Моделирование акустических процессов методом аналогии / Строительство, материаловедение, машиностроение. // Сб. научн. трудов. Вып. 38. Днепропетровск, ПГАСА, 2006. — С. 124 — 133.

73. *Абракизов В.Е., Дмитриев С.Л.* Пристрій візуалізації зон зашумованості міської забудови // Тези доповідей науково-методичної конференції «Безпека життєдіяльності». Харків, 2002. — с. 58-60.

74. *Сафонов В.В., Богданов Ю.В., Абракизов В.Э., Мелашин В.В., Диденко Л.М., Стрежекуров Э.Е.* Шум реконструкции зданий и сооружений, проблемы его снижения на прилегающих территориях / Материалы научно-технического семинара «Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума». Севастополь, 2006. — С. 121 — 130.

75. Патент № 10589А (Україна). Люмінесцентна лампа / *Карпалюк І.Т.*,

- Абракітов В.Е.* — МКВ⁵ Н 01 J 61/30; Опубл. 25.12.96. Бюл. № 4.
76. *Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т.* Компактная люминесцентная лампа. Информационный листок ИЛ №76-95. Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.
77. *Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т.* Газоразрядная лампа низкого давления, безопасная по фактору растекания ртутных паров. // Тезисы докладов 1-ой региональной конференции ЭКО'96. Днепропетровск, 1996.- с. 52.
78. *Абракітов В.Е., Карпалюк И.Т.* Газоразрядна лампа низького тиску, безпечна з фактору розтікання ртутної пари // Питання соціоекології: Матеріали Першої всеукраїнської конференції «Теоретичні та прикладні аспекти соціоекології». Львів, 7 — 11 жовтня 1996 р. Львів, 1996.- т.2.- с. 231 — 232.
79. *Ильина Н.А., Журавлев В.А., Карпалюк И.Т., Абракітов В.Э., Корлюка О.Ю.* Малогабаритное осветительное устройство медицинского назначения // Тезисы докладов 2-ой региональной конференции ЭКО'96. Днепропетровск, 1996.- с. 7.
80. *Корлюка О.Ю., Карпалюк И.Т., Абракітов В.Э.* Метод расчета освещенности с повышенной точностью // Тезисы докладов 2-ой региональной конференции ЭКО'96. Днепропетровск, 1996.- с. 8.
81. Заявка на патент № 94076397 (Україна). Пристрій квазіаналогового моделювання процесів розповсюдження звуку на території міста / *Абракітов В.Е., Захаров Ю.І., Сафонов В.В.* — Заявл. 26.07.94.
82. Патент № 12373А (Україна). Кінескоп / *Абракітов В.Е., Карпалюк И.Т.* — МПК⁶ Н01J 31/08. Опубл. 28.02.97. К.: Промислова власність: Офіційний бюлетень, 1997.- № 1.
83. Заявка на патент № 94031610/ 07(031480) (Россия). Кінескоп / *Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т.* — МПК⁶ Н 01 J 31/08.- Опубл. 20.07.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996, № 20.- с. 131.
84. *Абракітов В.Э., Карпалюк И.Т.* Кінескоп. Информационный листок ИЛ №52-95. Харьков: ХОРПНТЕІ, 1995.
85. <http://sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=94031610&sort= 2&fIsob=%u0410%u0431% u0440%u0430%u043A%u0438%u0442%u043E%u0432> Пат. отд.: № публ. пат. 94031610. Кінескоп. (Публ. в Интернет пат. док. [82, 83]).
86. Патент № 15212А (Україна). Спосіб аналогового моделювання процесів розповсюдження звукових хвиль / *Абракітов В.Е., Коржик Б.М., Серіков Я.О., Карпалюк И.Т.* — МПК⁶ G09В 23/14, Опубл. 30.06.97, Бюл. № 3
87. Заявка на патент № 94018110 (Россия) Способ аналогового моделирования процессов распространения звуковых волн / *Абракітов В.Э., Коржик Б.М., Серіков Я.А., Чеботарева А.В.* — МПК⁶ G 06 G 7/48.- Опубл. 27.02.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень,

1996.- № 1 — с. 116.

88. *Абракітов В.Э.* О возможности аналогового моделирования процессов распространения звуковых волн радиоволнами // Тезисы докладов XXVIII научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. Харьков, 1996.- с.84.

89. Заявка на патент № 94018168/12 (Россия) Устройство аналогового моделирования процессов распространения звука на территории города / *Абракітов В.Э., Коржик Б.М., Серіков Я.А., Чеботарева А.В.* - МПК⁶ G 09 В 23/14.- Опубл. 10.01.96. М.: Изобретения (Заявки и патенты): Официальный бюллетень, 1996.- № 1.- ч.1.-с. 126.

90. Заявка на патент № 9407398 (Україна). Пристрій аналогового моделювання процесів розповсюдження звуку на території міста / *Сафонов В.В., Абракітов В.Е., Коржик Б.М., Серіков Я.О.* — Заявл. 26.07.94.

91. *Абракітов В.Э., Нестеренко С.В.* Аналоговое моделирование процессов распространения звука на территории города // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Вып. № 121. Харків: Харківський національний університет радіоелектроніки, 2002. — с. 87 — 94.

92. *Абракітов В.Е.* Точність, вірогідність та оцінка погрешності при моделюванні акустичних процесів // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. Вып. №. 60. К.: Техніка, 2004. — С. 251-256.

93. <http://nkj.ru/news/5584/> Акустический лазер | Новости и события | Журнал «Наука и Жизнь». (Публ. в Интернет на сайте журнала «Наука и жизнь»)

Abstract

Книга цілком базується на матеріалах власних досліджень автора, (опису окремих складових частин яких їм попереднє було присвячено більш, ніж 50 інших самостійних наукових праць), і є свого роду квінтесенцією проведених ним в період 1991-2007 р. досліджень в галузі акустичного моделювання.

В першій главі розповідається про глобальне значення моделей в процесі Пізнання; надається класифікація методів моделювання, що застосовуються в акустиці; розглянуті основні методи такого моделювання. Наданий опис одного з власних авторських винаходів — пристрою аналогового моделювання (що був присутній ще в першому виданні цієї книги), що використаний в якості прототипу задля сучасних подальших розробок. Розглянуті відомі критерії подібності, які застосовують при побудові моделей. Виявлено, що відомі вимоги подібності при фізичному моделюванні акустичних процесів не задовільняють певною мірою вимогам вірогідності, (тобто вони є не повними), — у зв'язку з тим описано один з запатентованих авторських винаходів, присвячений вирішенню цієї проблеми.

Друга глава присвячена встановленню аналогії між хвильовими явищами та хвильовими характеристиками звукового та електромагнітного випромінювання (ЕМВ), що є головною умовою правомочності побудови аналогових моделей. Глава має важливе теоретичне значення для признання факту цієї аналогії, супроводжується викладками, що описують суть основних хвильових явищ: (як для звуку, так і для ЕМВ). Закінчується глава таблицею, де зведені відомості про аналогію (чи її відсутність) хвильових явищ для звуку та ЕМВ.

Третя глава присвячена побудові системи констант подібності, що застосовується задля зв'язку адекватних параметрів моделі та природи. Це — найважливіше теоретичне обґрунтування залежності характеристик моделі від подібних їм натурних. Фактично за допомогою такої системи констант [69] можливо побудувати будь-яку модель, — (не обов'язково акустичну!?) — при суворому дотриманні вимог подоби.

Четверта глава надає описи авторських розробок, тобто пристроїв моделювання, що використовують встановлену аналогію між звуком та ЕМВ, та створюються з дотриманням зв'язку між адекватними модельними та натурними параметрами за допомогою винайденної системи констант. В главі застосовано описи чисельних власних винаходів автора в галузі побудови пристроїв аналогового моделювання, та надано результати деяких експериментів з їхнім застосуванням. Попутно описаний кінескоп за [82], який в авторських дослідженнях застосовано саме як елемент пристрою моделювання: (але він може застосуватися окремо в якості пристрою відображення будь-якої інформації та має цілком самостійне науково-технічне значення).

П'ята глава освітлює питання вірогідності результатів аналогового моделювання у взаємозв'язку результатами фізичного та математичного моделювання.

Питання створення акустичного лазера (вперше в світі згідно за [54] досягнутий результат, адекватний випромінюванню світлового лазера — але тільки не світлових, а звукових хвиль

{докладніше — на [93]}); створення звукоізолюючої панелі із максимально можливою звукоізолюючою здатністю (що являє собою максимально можливий, граничний результат в галузі створення шумозахисних засобів); філософська концепція «Керованого Натхнення» та інші найбільш відомі, вагомі та значущі наукові досягнення автора в цій книзі не описані. Опису тих винаходів, досліджень та теоретичних розробок і суті вірогідних наукових відкриттів автора присвячено окрему монографію В.Е. Абракітова «На шляху до наукових відкриттів» [53]. Також під одноособовим авторством В.Е. Абракітова підготовлена інша книга — (робоча назва «Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках»), куди війшли питання, не охоплені в монографії «На шляху до наукових відкриттів», та «Безпека життєдіяльності, екологія та охорона праці: Енциклопедичний словник.» (обсяг роботи — більш, аніж 200000 слів; представлений ще з 2002 р. на сайті www.abrakitov.narod.ru).

Ключові слова: Абракітов; аналогія звуку та світла; захист від шуму; константи подібності; аналогова, математична, фізична модель; хвильові характеристики та явища.