

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНІ лісового і садово-паркового господарства

УДК 684.59

НОГОДЖЕНО ДОНУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Директор ІНІ ЛіСПГ

Технологій та дизайну виробів з

Завідувач кафедри

деревини

Лакида П. І

“ ” 2022 р.

Пінчевська О.О.

“ ” 2022 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «Визначення пріоритетного матеріалу з різних порід деревини для виготовлення акустичних панелей»»

Спеціальність: 187 Деревообробні та меблеві технології

Спеціалізація «Деревообробні та меблеві технології»

Магістерська програма: «Сучасні деревооброблювальні технології»

Програма підготовки: освітньо-професійний

Керівник магістерської роботи

К.Т.Н.

(підпис)

Баранова О.С.

Виконав

(підпис)

Рудницький М.М.

КИЇВ - 2019

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНІ лісового і садово-паркового господарства

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технології

деревобробки

д.т.н. проф.

Пінчевська О.О.

«    »      20     р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Рудницькому Миколі Миколайовичу

Спеціальність: 187 Деревобробні та меблеві технології

Спеціалізація «Деревобробні та меблеві технології»

Магістерська програма: «Сучасні деревоброблювальні технології»

Програма підготовки: освітньо-професійний

Тема магістерської роботи Визначення пріоритетного матеріалу з різних порід  
деревини для виготовлення акустичних панелей

Затверджена наказом ректора НУБіП України від 13.12.2021 р. № 1349 «З»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 03.12.2022 р.

Вихідні дані до магістерської роботи первинні параметри трьох порід  
деревини.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз існуючих методів неруйнівного контролю якості композиційних матеріалів.
2. Огляд основного обладнання для неруйнівного контролю якості фанери.
3. Підбір обладнання для неруйнівного контролю якості фанери.
4. Підбір методики визначення основних фізичних властивостей фанери що впливають на процес дефектоскопії фанери.
5. Обґрунтування пропозицій щодо підбору способу для автоматизації контролю якості фанери.

Дата видачі завдання « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
НУБІП України  
Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ Баранова О.С.

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Чудовець В.І.  
НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

---

ЗМІСТ

НУБІП України

## Вступ

# НУБІП України

Розвиток архітектурної акустики протягом останніх десятиліть значно змінив практику застосування акустичних дифузорів. Існує безліч прикладів їхнього успішного застосування для покращення акустики приміщень різного призначення. Акустиками-дослідниками було витрачено багато зусиль на те, як їх правильно проектувати, розраховувати та оцінювати. Проте потрібні додаткові дослідження.

# НУБІП України

В останні роки спостерігається інтенсивний розвиток нових напрямків аудіотехніки, з'являються нові системи просторового звучання, активно розробляються цифрові технології накопичення та обробки звуку.

# НУБІП України

Відповідно до акустичних властивостей приміщень для запису та прослуховування музичного матеріалу пред'являються більш високі вимоги. Йдеться про студії звукозапису, концертні зали, домашні театри, спеціалізовані музичні кімнати.

# НУБІП України

Ні для кого не секрет, що якісна звукоізоляція приміщень відіграє важливу роль у нашому житті. Проблема звукоізоляції житлових, виробничих та офісних приміщень з кожним роком стає все більш актуальною, що пов'язано, перш за все, зі зростанням кількості джерел шуму, особливо у великих містах. Попит народжує пропозицію, і на ринку з'являються нові звукоізоляційні матеріали, технології та рішення.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд існуючих видів акустичних панелей та їх особливостей

### 1.1. Огляд існуючих видів акустичних панелей.

За визначенням акустичні дифузори - це механічні елементи, призначені для рівномірного розсіювання енергії звукових хвиль, в тому числі для створення оптимального рівня звукової енергії в конкретному приміщенні. Дифузори монтуються в самі різні оздоблювальні матеріали у вигляді панелей. Таким чином, з їх допомогою можна ідеальний звуковий фон практично в будь-якому приміщенні.

**Приміщення, в яких повсюдно використовуються акустичні дифузори:**

- професійні, а також домашні студії звукозапису;
- внутрішні приміщення, театрів, кінотеатрів, концертних залів;
- переговорні кімнати, офісні приміщення, зали для проведення конференцій і зустрічей;
- окремі приміщення в будинках теле- і радіокомпаній;
- аудиторії в навчальних закладах.

### 1.2. Види дифузорів залежно від призначення:

• Звуковідображуючі

• Звукопоглинаючі

• Звукорозсіюючі (звукоперенаправляючі)

Звукопоглинаючі панелі та звуковідбивні поверхні (плоскі або криволінійні) отримали на сьогоднішній день досить широке поширення. Але застосування одних лише методів поглинання та відображення звуку не в змозі

вирішити деякі акустичні проблеми, що виникають у студійних приміщеннях  
малого об'єму чи непропорційно широким концертних залах.



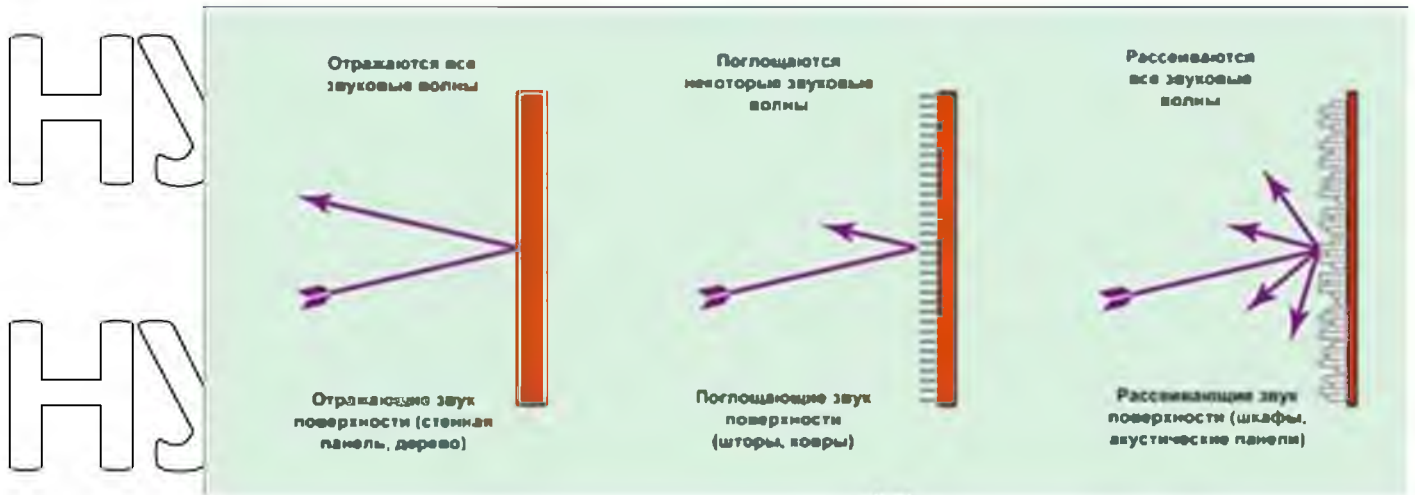
Фиг 1.1. Плити з деревної вовни (фібороліт)

Плити з деревної вовни, виробляються шляхом пресування деревного  
волокна (1-3 мм) в міцні декоративні панелі. В якості сполучника зазвичай  
використовується гірська порода магнезит або білий цемент.

Мінеральний сполучник чудово скріплює волокна деревини та  
забезпечує панелі міцністю та стабільністю розмірів.

Природні властивості натурального дерева у поєднанні з натуральним  
сполучником надають панелям високу вогнестійкість

На відміну від звуковідбивних та поглинаючих матеріалів, акустичні  
дифузори створюють просторову та тимчасову дисперсію звукової енергії.  
Зсуваючи в просторі і затримуючи в часі ранні відбиття від поверхонь, що  
захлипають, дифузори можуть змусити маленьку звукозаписну студию звучати,  
як велике повноцінне приміщення, а слухач, що знаходиться в музичній  
кімнаті невеликого об'єму, може пережити відчуття, аналогічні відвідуванню  
старовинного концерту.



**Рис 1.2.** Принцип відбиття звукових хвиль в залежності від характеру поверхні-панелі

До кінця минулого століття у всьому світі різко зріс інтерес до застосування в концертних залах звукоізольованих поверхонь. Безумовно, це стимулювало їх застосування у кімнатах для критичного прослуховування та у студійних контрольних кімнатах.



**Рис 1.3.** Приклад приміщення для прослуховування музики оснащеними акустичними панелями та дифузорами.

Каталізатором процесу широкого застосування акустичних дифузорів послужили ідеї та розробки професора фізики Геттінгенського університету Манфреда Шредера, який опублікував у 1975 році свою фундаментальну роботу на тему розсіяних відображень від поверхонь, побудованих на принципі математичної послідовності максимальної довжини.

У 1970-х роках Манфред Шредер зі своїми колегами вивчив понад 20 відомих європейських концертних залів. З'ясувалося, що слухачі сприймають звук у витягнутих у довжину залах краще, ніж у широких. Шредер зв'язав це з іншим своїм спостереженням, що глядачеві приємніше слухати сигнали, що

злегка відрізняються один від одного, що надходять у ліве і праве вухо, ніж абсолютно ідентичні

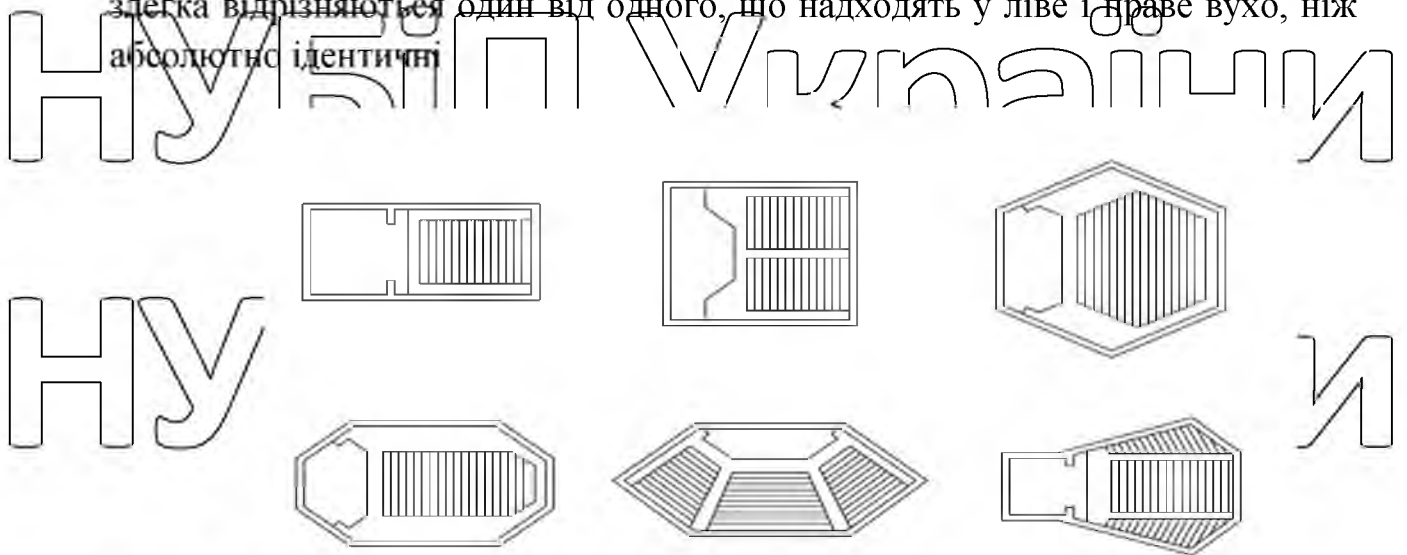
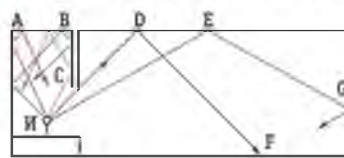


Рис 1.4. Приклади конструкцій концертних залів.

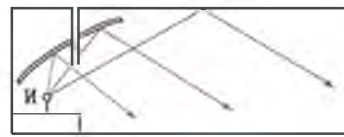
У широких залах ранні відбиття надходять до слухача від стелі. Ці відбиття формують дуже схожі для лівого та правого вуха сигнали. У вузьких і довгих залах перші відбиті сигнали надходять до слухача від бічних стінок і дуже відрізняються друг від друга.



а)



б)



в)

Рис 1.5. Типи концертних залів (вид з боку), залежно від конструкції

Після проведення цілого ряду досліджень Манфред Шредер запропонував для вирішення цієї проблеми оригінальну звукорозсіювальну конструкцію, названу згодом дифузорець Шредера.





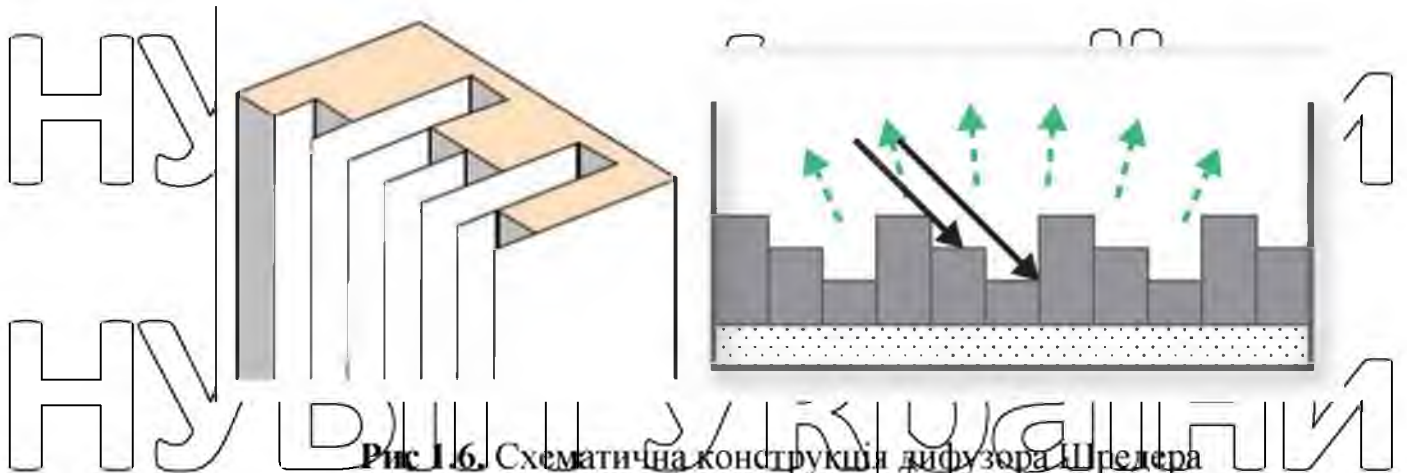


Рис 1.6. Схематична конструкція дифузора Шредера

Рис 1.7. Спрощена схема роботи дифузора Шредера

Фактично, дифузор Шредера являє собою фазову дифракційну решітку, яка розсіює звукову енергію, що падає на неї, в широкому діапазоні частот, навіть при великій величині кута падіння. Дифузор Шредера складається із серії осередків різної глибини, але однакової ширини, виконаних у корпусі з дерева, MDF або інших листових матеріалів.

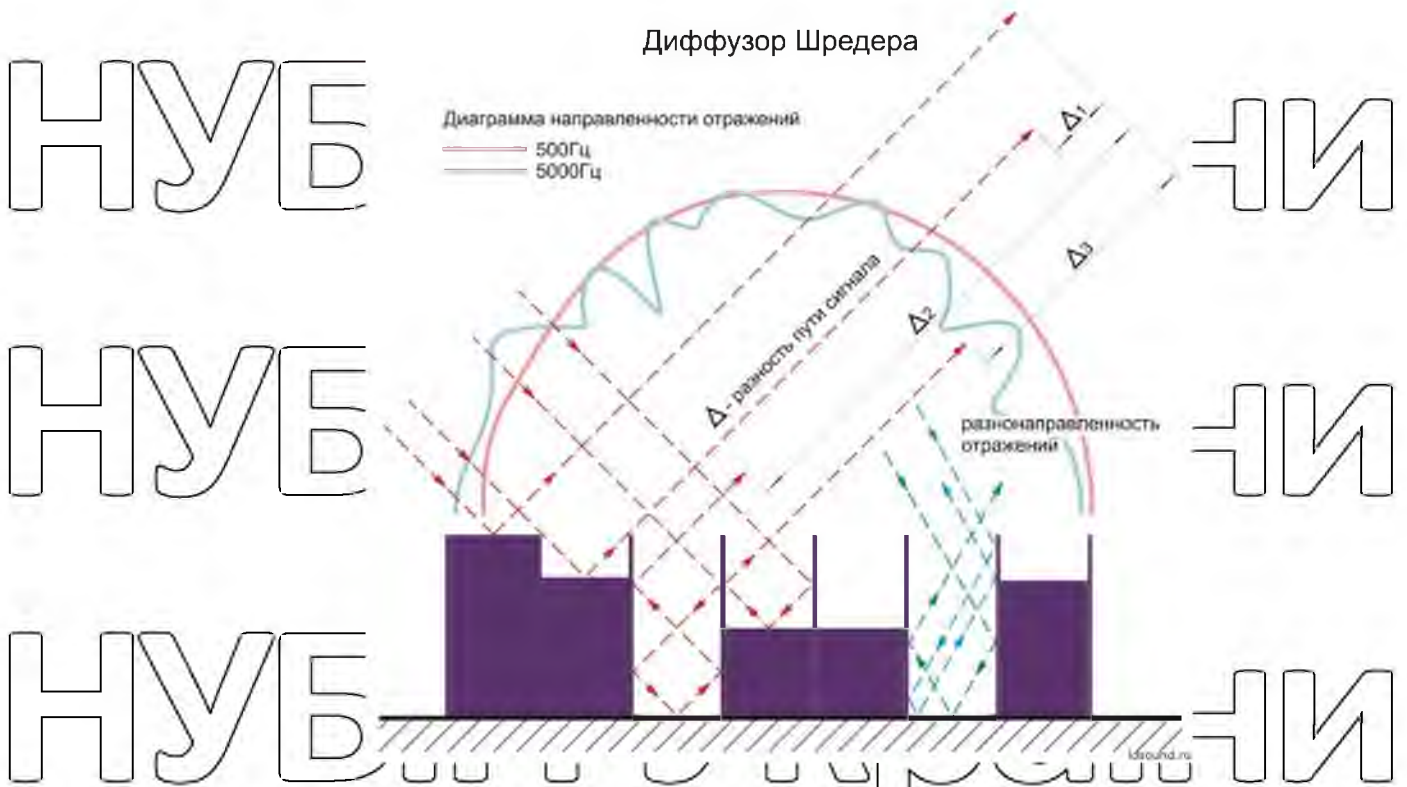


Рис 1.8. Схема роботи дифузора Шредера і принцип його взаємодії із низькочастотними і середньочастотними звуковими хвилями, на прикладі

векторів. На проектній частоті дифузор має максимальну ефективність розповсюдження звукової енергії. Нижня межа робочого діапазону дифузора залежить від розміру найглибшого осередку і має значення приблизно на

половину октави нижче проектної частоти дифузора. Верхня межа робочого діапазону залежить від ширини осередків. Перегородки, що розділяють сусідні осередки, повинні бути виконані з тонкого і жорсткого матеріалу.

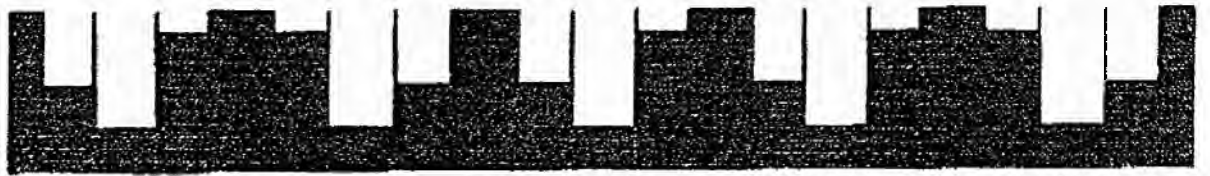


Рис 1.9. Схематичне зображення дифузора Шредера

### Що до звукоізоляції

Фахівці розкривають поняття звукоізоляції як зниження рівня звукового тиску під час проходження хвилі крізь перешкоду: стіни, підлогу чи перекриття. Звукова хвиля в даному випадку може бути як упорядкованим набором звуків у композиції, так і шумом, породженим десятками джерел, починаючи від сигналізації автомобіля або верстака, що працює, і закінчуючи водою, що капає з нещільно закритого крана.

Розрізняють два основні види шуму: повітряний та структурний. Середовищем поширення першого служить повітря, другого – тверде тіло. До повітряного шуму відноситься, наприклад, розмова людей у сусідній кімнаті або телевізор. Структурний шум може викликати пересування по підлозі, меблі або стукіт молотка. Останній, до речі, відноситься до найбільш неприємного його вигляду - ударного, який можна почути, знаходячись навіть на значній відстані від джерела.

Якщо повітряний шум переважає в офісах, то в виробничих приміщеннях набагато більшою проблемою є структурний та ударний види. Для житлових приміщень, враховуючи найвищі вимоги до рівня звукоізоляції з боку законодавства, актуальний захист від усіх видів шуму: і тучної музики, і стукоту дверей ліфта, що закриваються.

Технології шумоізоляції (звукоізоляції) використовують чотири принципи контролю як повітряного, так і структурного шуму:

**Поглинання** – перетворення звукової хвилі в іншу форму енергії (таку як теплова) за допомогою ізоляційних панелей.

**Блокування** – створення бар'єра для зупинки повітряних коливань зменшення проходження повітряного шуму.

**Заломлення/руйнування** – зниження рівня звукової енергії за рахунок проходження через різномірні структури.

**Ізоляція** – обмеження шуму в області, де він поширюється.

### **Звукоізоляція**

Використання тих чи інших звукоізоляційних матеріалів і технологій повністю залежить від призначення приміщення. Умовно тут можна виділити такі категорії: офісні, виробничі, житлові та звукозаписуючі/звукотранслюючі приміщення.

Відповідно до норм чинного законодавства, при звукоізоляції необхідно дотримуватись певних стандартів. Так "Шум на робочих місцях, у приміщеннях житлових, громадських будівель та на території житлової забудови" встановлює допустимий рівень шуму для виробничих приміщень - не більше 85 дБ, для офісних - не більше 60 дБ, для житлових - не більше 55 дБ вдень і 45 дБ вночі.

**Краще передбачити заходи щодо звукоізоляції приміщень ще на стадії проектування будівлі. Наприклад, у багатоквартирних будинках, як правило, групують кімнати з підвищеним рівнем шуму (кухня, ванна кімната) і розташовують їх ближче до сходових прольотів і далі від житлових приміщень.**

**У практиці житлового будівництва існує чотири основні напрями звукоізоляції: ізоляція стін та міжкімнатних перегородок, захист підлог, перекриттів та місць стиків зі стінами, дверей (у тому числі міжкімнатних) та вікон, звукоізоляція інженерних комунікацій, які можуть служити провідниками шуму.** При цьому звукоізоляційні матеріали повинні виконувати дві головні функції - запобігати коливанням звукової хвилі перешкоди (наприклад, міжкімнатної перегородки), а також, по можливості, поглинати і розсіювати звукову хвилю.

Як було зазначено вище, в офісних приміщеннях основною проблемою є повітряний шум. Виною тому єдиний простір, поділений на кабінети перегородками з гіпсокартону – саме така конструкція переважає зараз у ділових центрах. Різні види перегородок можуть мати власний індекс звукоізоляції. Застосування ефективних звукопоглинаючих плит дозволяє помітно підвищити звукоізолюючі властивості конструкції. Таким чином, основним напрямком звукоізоляції в офісних приміщеннях є робота над міжкімнатними перегородками та дверима. Інший напрямок – це боротьба із зовнішніми джерелами шуму. Матеріали та технологія звукоізоляції в даному випадку мало чим відрізняється від звукоізоляції житлових приміщень.

### Захист від виробничого шуму

Відповідно до ГОСТ 12.1.029-80 "ССБТ. Кошти та методи захисту від шуму. Класифікація" засоби захисту від негативного впливу виробничого шуму поділяються на засоби колективного захисту та засоби індивідуального захисту. Для колективного захисту працюючих використовуються такі методи:

- зниження шуму у джерелі його виникнення;
- розміщення робочих місць з урахуванням спрямованості випромінювання звукової енергії (зміна спрямованості випромінювання шуму);
- архітектурно-планувальні заходи, що передбачають раціональне взаєморозташування приміщень в об'єкті з урахуванням їхньої шумності;
- акустична обробка приміщень;
- зниження шуму на шляху його поширення від джерела до робочого місця.

Гранично допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку для основних типових видів трудової діяльності та робочих місць зазначені в табл.2 Додатка

Зниження шуму рахунок архітектурно-планувальних заходів передбачає раціональне планування підприємства міста і цехів з урахуванням їх шумності.

При плануванні підприємства найбільш галасливі виробництва та цехи мають бути сконцентровані в одному-двох місцях і розташовуватися на виробничій території з підвітряного боку. Відстань між шумними цехами та

тихими об'єктами (заводоуправління, конструкторське бюро тощо) має забезпечувати необхідне зниження шуму, при цьому передбачаються зони зелених насаджень, що поглинають шум. Якщо підприємство розташоване в межах міста, то галасливі цехи повинні знаходитися в глибині підприємства, по можливості далі від житлових будинків.

Всередині будівлі тихі приміщення необхідно розташовувати далеко від галасливих так, щоб їх поділяло кілька інших приміщень або огорожу з гарною звукоізоляцією.

Зниження шуму в приміщеннях може бути досягнуто за допомогою збільшення площі звукопоглинання в приміщенні за рахунок розміщення на внутрішніх поверхнях звукопоглинаючих облицювань, а також установки в приміщенні штучних звукопоглиначів. Цей захід називається акустичною обробкою приміщення.

Звукопоглинаючими матеріалами та конструкціями прийнято вважати такі, у яких коефіцієнт поглинання  $\alpha$  на середніх частотах більше 0,2. У таких матеріалів, як цегла, бетон, величина  $\alpha$  мала (0,01-0,05).

Для приміщень даних типів і призначення використовують дифузори (панелі) доцільно використовувати панелі, що виготовляються з деревної вовни з використанням сірого або білого цементу як сполучного.

Поєднуючи вогнестійкість з хорошими акустичними та теплоізоляційними властивостями.

Ці панелі широко використовуються в оформленні інтер'єру громадських та житлових будівель, він екологічний та нешкідливий для здоров'я. Панелі дуже підходять для підвісних стельових конструкцій та оздоблення стін. Завдяки своєму природному складу та видатним властивостям вони широко використовуються в приміщеннях з підвищеним акустичним навантаженням, де суттєві звукоізоляція та шумопоглинання. Панелі не змінюють своїх властивостей у приміщеннях з підвищеним рівнем вологості, вони поглинають надмірну вологість та забезпечують прийнятний мікроклімат, типовий у приміщеннях з оздобленням деревом.

НУ

НУ

НУ



**РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ визначення  
звукозахисних характеристик дифузорів**

**Шумомір Walcom NT-90A** призначений для визначення рівня шуму в місцях загального користування, на робочих місцях та в навколишньому середовищі, а також для сприяння своєчасному інформуванню про виникнення будь-яких відхилень шумового навантаження від нормативних умов, що у свою чергу забезпечує збереження слуху людини.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП

ДАІНИ

НУБІП

ДАІНИ



НУБІП

УКРАЇНИ

Рис 2.1. шумомір Walcom NT-90A

Технічні характеристики шумоміра Walcom NT-90A:

Параметр	Значення
Діапазон визначення рівня шуму	від 35 до 130 дБ
Точність вимірювання за умов контролю 94 дБ на 1 кГц і 114 дБ на 1 кГц	±1,5 дБ
Роздільна здатність	0,1 дБ
Час очікування відгуку	0,5 секунди
Діапазон частот	від 31,5 Гц до 8 кГц
Дисплей	рідкокристалічний 3½ розрядний
Мікрофон	1/2 дюймовий конденсаторний мікрофон
Автоматичне відключення	після 16 хвилин у режимі очікування
Частотне зважування	A
Температура експлуатації	від 0 до 50 °С (від 32 до 122 °F)
Відносна вологість експлуатації	від 10 до 80 % RH (без конденсату)
Температура зберігання	від -10 до 60 °С (від 14 до 140 °F)
Відносна вологість зберігання	від 10 до 75 % RH (без конденсації)
Джерело живлення	1 стандартна батарейка напругою 9В
Габаритні розміри	206,2×56×45,7 мм
Вага	110 г (без акумулятора)

Ціна	1300 грн
------	----------

### Розділ 3. Визначення пріоритетного матеріалу для виготовлення акустичних панелей

Акустичні панелі є універсальним оздоблюючим матеріалом, який використовується для ефективного затримування звукових хвиль. Щоб зрозуміти ефект, що досягається за їх допомогою, достатньо порівняти акустику в порожній кімнаті та в кімнаті з меблями. При тому, що меблі, килим, шпалери та інші елементи інтер'єру лише частково поглинають шум, більшого ефекту можна досягти за допомогою акустичних панелей, які спеціально створені для того, щоб глушити сторонні звуки та усувати відлуння.

Акустичні панелі перешкоджають виникненню реверберації звукових хвиль, так званого «ефекту луни». Сильні звуки багаторазово відбиваються від поверхонь конструкцій, що огорожують, і різних предметів у приміщенні. Повторюючись, вони поступово втрачають свою енергію та остаточно згасають.

Для виготовлення акустичних панелей запропоновано використовувати деревину дубу, ясеня та берези. У якості характеристик розглянуто такі як акустичний опір, питомий імпеданс, швидкість розповсюдження звуку, ціна.

Дубова деревина – чудовий будівельний і виробничий матеріал (ри.3.1). Вона йде на підводні та сухопутні споруди, влаштування підводних та основних частин дерев'яних суден (переважно літнього дубу) і як бондарний, екіпажний, машинний, меблевий, паркетний та столярний ліс (переважає зимовий дуб); особливо цінується для останніх морських дуб, що довго пролежав у воді (до сотні років) і має темну, майже чорну деревину.

Технічні та фізичні характеристики дубової деревини:

• Питомий імпеданс –  $2552 \text{ кН/см}^3$



НУБІП УКРАЇНИ

- Щільність (питома вага) становить 550-700 кг/м<sup>3</sup> для сухого дерева, в повітряно-сухому стані середня величина наближається до 700 кг/м<sup>3</sup>.
- Об'ємна вага – при вологості 10-15% куб сухої деревини важить 700-800 кг, маса одного м<sup>3</sup> свіжозрубаного дерева перевищує 1000 кг.



Рис.3.1 Деревина дубу

НУБІП УКРАЇНИ

- Межа міцності - при стисканні по лінії волокон становить 56 МПа, при статичному згині наближається до 87 МПа.

НУБІП УКРАЇНИ

- Модуль пружності – 12,3 ГПа. Цей параметр вважається найвищим серед усіх видів деревини доступної цінової групи, за цим показником деревина дуба поступається лише сибірській модрині.

НУБІП УКРАЇНИ

- Природна вологість - сягає 60%. За рахунок підвищеної природної густини дубової деревини пиломатеріали в невисушеному стані характеризуються великою вагою. Після просушування маса знижується – це суттєво полегшує транспортування та обробку пиломатеріалів

НУБІП УКРАЇНИ

- Хімічний склад - органічна частина деревини дуба, що залишилася після прогорання матеріалу, включає лужноземельні, а також лужні елементи. Органічні складові містять целюлозу (20-50%), дубильні компоненти (2-10%), геміцелюлозу – 15-30%, лігнін – 15-30%, а також незначну кількість смол, що не перевищує 0,5-0,6%.

• Твердість – торцева твердість дубової деревини становить 57,3 Н/мм<sup>2</sup>, радіальна – 48,2 Н/мм<sup>2</sup>, а тангенціальна – 52,8 Н/мм<sup>2</sup>.

• Відтінкова гама широка – від майже білого до практично чорного.

Найбільш поширені сіруваті, коричневі та золотаві тони, червоні забарвлення відсутні.

• Текстура пориста, чітко простежуються радіальні промені. Саме така деревина вважається егалонною та імітується при створенні штучних декоративних покриттів.

Експлуатаційні характеристики деревини дубу:

• Температура горіння – 230 градусів за наявності джерела полум'я та 370 градусів при безполум'яному нагріванні.

• Теплопровідність – становить 200/400 мВт (м К) поперек і вздовж лінії волокон відповідно;

• Гігроскопічність – знижена;  
• Зольність – не перевищує 0,35%.

Дерева ясна відрізняється міцною, але при цьому пружною структурою деревини (рис.3.2). Серцевих променів мало – їх кількість не перевищує 15% від загального обсягу, відповідно, ясен складно розколоти.

Висока в'язкість унеможливило ручну обробку деревини. Від природи матеріал має гарний малюнок та приємний відтінок.



Рис. 3.2 Деревина ясеня

Фізичні параметри ясеня досить високі:

- Міцність. Межа міцності, виміряється при розтягуванні по лінії волокон, становить приблизно 1200-1250 кгс/см<sup>2</sup>, поперек - лише 60 кгс/см<sup>2</sup>.

- Питомий імпеданс – 2937 кН/см<sup>3</sup>
- Теплопровідність. Параметр теплопровідності деревини, термообробленого ясеня відповідає 0,20 Ккал/м х h x C. Це на 20% нижче, ніж у необробленого дерева. Знижена теплопровідність у поєднанні з винятковою щільністю вказує на здатність матеріалу утримувати тепло, не випадково ясен нерідко застосовують для монтажу системи «тепла підлога».

- Густина. Щільність пізньої ясенювої деревини в 2-3 рази більша, ніж у ранньої. На цей параметр впливає природна вологість дерева. Так, оптимальна густина матеріалу з вологістю 10-12% починається від 650 кг/м<sup>3</sup>, а найбільший показник відповідає 750 кг/м<sup>3</sup>.

- Природна вологість. Зарахунок високої густини поглинання води у деревини ясеня набагато менше, ніж, наприклад, у сосни. Тому у свіжозрубаного дерева рівень природної зволоженості зазвичай відповідає 35%, а у маньчжурського навіть сягає 78%.

- Гігроскопічність. Пиломатеріал неактивно вбирає зовнішню вологу. Однак при перебуванні у вологому середовищі межа насичення може бути перевищена. У цьому випадку матеріал починає коробитися і деформуватися, тому твердий ясен не підходить для внутрішнього оздоблення приміщень з підвищеною вологістю (басейнів та лазень).

- Твердість. Щільність ясенювої деревини при рівні вологості 10-12% становить 650-750 кг/м<sup>3</sup>. Торцева твердість ясеня становить 78,3 Н/мм<sup>2</sup>.

Цей матеріал відноситься до категорії важких та особливо жорстких, що дозволяє робити з нього масштабні архітектурні композиції. Незважаючи на виняткову щільність, ясенюва деревина досить в'язка та пружна. Після

просушування фактура поверхні залишається декоративною. Ядро світле, заболонь зазвичай з жовтим або рожевим відливом.

Горючість. Займання деревини цього сорту відбувається при нагріванні від 400 до 630 градусів. При суттєвому перевищенні температури створюються умови для утворення вугілля та попелу. Найвища

продуктивність спеки у дерева становить 87% - вона можлива при нагріванні до 1044 градусів. Під дією підвищених температур ясенсва деревина у повному обсязі втрачає геміцелюлозу. Це зводить до нуля ризик появи

патогенних мікроорганізмів та цвілі. Термообробка суттєво змінює

молекулярний склад ясенового пиломатеріалу, він стає максимально захищеним від короблення та деформації. Термооброблений пиломатеріал має однорідний відтінок від блідо-бежевого до темно-коричневого. Подібний

матеріал знайшов широке застосування при зовнішньому будівництві, зокрема

для обробки балконів, лоджій та терас. Ясен, що пройшов термічну обробку,

має незаперечні переваги: екологічна безпека, довговічність, декоративний зовнішній вигляд.

Березу відносять до без'ядрових порід, тобто до порід у яких заболонь та ядрова деревина мають однаковий колір (ри.3.3). Деревина світла, жовтувато-

біла, рожева до світло-коричневої, має легкий шовковистий блиск. Старі дерева можуть утворювати хибне ядро жовтувато-червоного або коричневого кольору. Річні кільця виразно виражені вузькими смугами пізнього приросту.

Волокна рідкісні, невеликі або середніх розмірів, із розсіяними порами. Для березової деревини характерні червонувато-коричневі плями.



Рис 3.3. Деревина берези

Фізичні параметри берези:

- Матеріал легко ріжеться, пиляється і проходить іншу обробку вручну та на верстатах. Волокна біля дерева розташовані витіювато, що створює гарний незвичайний візерунок. Колірні варіації іноді доповнюються краплення темних тонів (сліди прояву вірусної інфекції). Тоді деревина виглядає дуже привабливо. Краплення не впливають на властивості та міцність матеріалу.

- Питомий імпеданс – 2819 кН /см<sup>3</sup>

- Твердість - Коефіцієнт Брінелля 3;

- Середня щільність 610–650 кг/м<sup>3</sup>

- Межі густини 460–830 кг/м<sup>3</sup>

- Поздовжнє усихання 0,6 %

- Радіальне усихання 5,3 %

- Тангенційне усихання 7,8 %

- Радіальне набухання 0,29%

- Тангенціальне набухання 0,41%

- Міцність на вигин 120 Н/мм<sup>2</sup>

- Міцність на стиск 60 Н/мм<sup>2</sup>

- Межа міцності 437 Н/мм<sup>2</sup>

- Теплопровідність 0,142 Вт/км

- Береза відносно добре обробляється ручним інструментом або за допомогою верстатів: її можна стругати, фрезерувати; з неї можна виготовляти токарні чи різьблені деталі; добре піддається гнуттю, важко розколнується. Добре утримує кріплення (цвяхи, шурупи) і склеюється.

- При підвищеній вологості, без спеціального захисту деревина берези легко уражається грибами і швидко загниває.

# НУБІП України

## 3.1 Розрахунок пріоритетного матеріалу за методом експертних оцінок

У разі проектування об'єктів, що оцінюються як за кількісними, так і за якісними показниками для порівняння варіантів рішень можуть бути використано багато методів, серед яких:

- Метод експертних оцінок: оснований на обробленні результатів опитування груп спеціалістів про пріоритетність того чи іншого варіанту рішення окремо за кожною ознакою та за пріоритетом ознак, за якими оцінюється система, що проектується. Це дає можливість за наявності відповідного математичного оброблення думок експертів якісно оцінити в цілому проектне рішення. Експертна оцінка може бути якісною (рішення гірше, краще ті дорівнює за якістю тому, що порівнюється) або кількісною (кожне рішення може бути оцінене в балах або, якщо рішення піддається вимірюванню, то у відповідних одиницях);

- Метод розставляння пріоритетів: оснований на складанні матриць, для кінцевої оцінки якого використовують ітераційну процедуру розрахунку, що суттєво уточнює отримані оцінки;

- Метод аналізу ієрархій, запропонований в кінці 1970-х рр. американським математиком Т. Сааті, полягає у декомпозиції проблеми на більш прості складові частини і поетапному встановленні пріоритетів оцінюваних компонентів з використанням парних порівнянь.

Метод експертних оцінок є це один з основних класів методів науково-технічного прогнозування, який ґрунтується на припущенні, що на основі думок експертів можна збудувати адекватну модель майбутнього розвитку об'єкта прогнозування [1]. Для цього методу важливим є підготування анкети (листа-опитування) та вибір спеціалістів – експертів. Зазвичай приймають 5 – 7 експертів.

# НУБІП України

При розрахунках збільшення кількості експертів підвищує точність та достовірність результатів. Методика оброблення експертних оцінок включає наступні етапи:

1. Необхідно розрахувати середнє значення  $x_{ij}$ , середнє квадратичне відхилення  $S_{ij}$  по кожному ряду відповідей. Для прикладу проводимо розрахунок по в'язкості деревини [1]:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m}, \quad (3.1)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{2+3+2+3+2+3+1}{7} = 2,29,$$

де  $x_i$  – оцінка конкретного експерта по конкретному питанню,  $m$  – кількість експертів.

Для знаходження  $S_{ij}$  потрібно визначити різницю між середнім значенням бату та конкретною оцінкою експерта:

$$x_{ij} - x_i = 2,29 - 2 = 0,29$$

Даний розрахунок проводиться для кожної експертної оцінки.

Далі отримане значення підносимо до квадрату:

$$(x_{ij} - x_i)^2 = (0,29)^2 = 0,08$$

Також такий розрахунок проводимо по кожній оцінці експерта.

Розрахунок середнього квадратичного відхилення проводимо за формулою [1]:

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_i - \bar{x}_{ij})^2}{m-1}} \quad (3.2)$$
$$S_{ij} = \sqrt{\frac{0,08+0,51+0,08+0,51+0,08+0,51+1,65}{7-1}} = 0,29,$$

де  $x_{ij}$  – оцінка  $j$ -го експерта по  $i$ -му питанню;  $m$  – кількість експертів.

Порівнюючи середні квадратичні відхилення відповідей по кожному показнику, встановлюємо, в якому із них більше розсіювання відповідей експертів навколо середнього значення. Так визначається стійкість результатів середнього значення оцінки експертів. При меншому середньому квадратичному відхиленні є більш узгодженою оцінка експертів, відповідно, більшим буде коефіцієнт узгодження експертів по кожному ряду відповідей  $K_{Eij}$ .

Далі знаходимо за формулою коефіцієнту варіації,  $V_{ij}$ , для порівняння стійкості оцінок різних питань, який характеризує відносьне розсіювання результату:

$$V_{ij} = \frac{0,29}{2,29} \times 100\% = 0,13$$

Коефіцієнт варіації буде меншим при більшому загальному коефіцієнту погодження експертів  $K_E$ , відповідно, більш узгодженими є думки експертів.

Визначаємо коефіцієнт погодження експертів на прикладі в'язкості [1]:

$$K_{Eij} = 1 - 0,12 = 0,88,$$

Так само розраховуємо коефіцієнт погодження експертів для інших характеристик.

2. Потім визначаємо загальний коефіцієнт погодження експертів [1]:

$$K_E = (0,88 + 0,96 + 0,57 + 0,60 + 0,70) / 5 = 0,53,$$

де  $n$  – кількість питань в анкеті;  $m_{ij}$  – кількість оцінок по  $i$ -ому питанню в кожному з порівнянних рядів.



Із формули видно, що даний коефіцієнт відповідає вимогам  $0,5 \leq K_E \leq 1$ , тому думка експертів вважається погодженою.

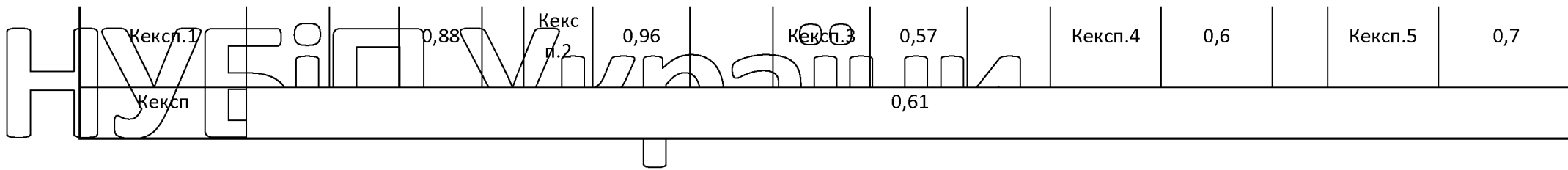
В табл. 3.1 наведено розрахунки щодо результатів експертної оцінки пріоритетних показників для інших характеристик порід деревини.

Суть методу розставляння пріоритетів полягає в попарному якісному порівнянні конкуруючих об'єктів з подальшим переходом на кількісні оцінки з використанням конкретних значень показників властивостей конкурентів, а за їх відсутності – експертних оцінок. Порівняння проводять в матричній формі (за допомогою знаків  $>$ ;  $<$ ;  $=$ ), що дозволяє в подальшому за відповідної математичної обробки отримати кількісні значення пріоритетів рішень конкуруючих рішень (об'єктів) по кожній властивості окремо і за комплексом показників (ознак). Загальна таблиця характеристик порід деревини вказана в табл. 3.2.

Таблиця 3.1

## Результат експертної оцінки показників

К-ть експертів	Акустичний опір Па•с/м			Питомий імпеданс, кН/см <sup>3</sup>			Швидкість розповсюдження звуку уздовж волокон, м/с			Терmostійкість °С		Ціна, грн/кг			
	$X_i$	$X_c$ - $X_i$	$(X_c - X_i)^2$	$X_i$	$X_c$ - $X_i$	$(X_c - X_i)^2$	$X_i$	$X_c - X_i$	$(X_c - X_i)^2$	$X_i$	$X_c - X_i$	$(X_c - X_i)^2$	$X_i$	$X_c - X_i$	$(X_c - X_i)^2$
1	2	0,29	0,08	2	-0,14	0,02	5	-2,14	4,59	3	0,00	0,00	5	-2,00	4,00
2	3	-0,71	0,51	1	0,86	0,73	1	1,86	3,45	2	1,00	1,00	3	0,00	0,00
3	2	0,29	0,08	2	-0,14	0,02	5	-2,14	4,59	5	-2,00	4,00	5	-2,00	4,00
4	3	-0,71	0,51	2	-0,14	0,02	2	0,86	0,73	1	2,00	4,00	3	0,00	0,00
5	2	0,29	0,08	2	-0,14	0,02	2	0,86	0,73	5	-2,00	4,00	5	-2,00	4,00
6	3	-0,71	0,51	2	-0,14	0,02	3	-0,14	0,02	3	0,00	0,00	3	0,00	0,00
7	1	1,29	1,65	2	-0,14	0,02	2	0,86	0,73	2	1,00	1,00	2	1,00	1,00
Середнє значення балу		2,29			1,86			2,86			3,00			3,71	
Середнє квадратичне відхилення		0,29			0,07			1,24			1,17			1,08	
Коеф. варіації/100%		0,13			0,04			0,43			0,4			0,3	



НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Таблиця 3.2

## Характеристики порід деревини

	Дуб	Ясень	Береза
Акустичний опір Па·с/м	31	30	29
Швидкість розповсюдження звуку уздовж волокон, м/с	4175	5065	3625
Питомий імпеданс, кН/см <sup>3</sup>	2552	2937	2819
Ціна, грн/м <sup>3</sup>	15000	13000	7000

В даному випадку в конкурсі беруть участь 3 породи та 4 характеристики. Тому будують квадратні матриці бінарних відношень, яких буде 4. Для кожної характеристики складаємо свою матрицю.

Першою буде матриця порівняння матеріалів за акустичним опором (табл.

3.3)

Таблиця 3.3

Матриця порівняння матеріалів за акустичним опором

	A1	A2	A3	K	w
	31	30	29		
A1	31	>	>	3	0,50
A2	30	<	=		
A3	29	<	=		

У даній таблиці: A1-A3 – це породи дерев; K – показник, який показує у скільки разів найкраща оцінка відрізняється від найгіршої; w – коефіцієнт переваги.

Символами краще «>», дорівнює «=», гірше «<» позначаються співвідношення об'єктів у відповідних стовпцях та рядках.

Згідно з цим, показник K розраховується за формулою [1]:

$$K_j = \frac{X_{ij \max}}{X_{ij \min}} \quad (3.3)$$

де  $X_{ij \max}$  – максимальна оцінка  $i$ -того об'єкта по  $j$ -му показнику;  $X_{ij \min}$  – мінімальна оцінка  $i$ -того об'єкта по  $j$ -му показнику. Для першого випадку буде:

$$K_j = \frac{3}{1} = 3$$

За знайденим коефіцієнтом K визначають коефіцієнт  $\alpha_j$  [1]

$$\omega_j = \left( \frac{K-1}{K+1} + \sqrt{\frac{0,05}{n}} \right) \beta_v, \quad (3.4)$$

Для першої ітерації  $\beta_v = 1$

$$\omega_j = \left( \frac{3-1}{3+1} + \sqrt{\frac{0,05}{7}} \right) * 1 = 0,50$$

За таким самим принципом складаємо матриці для інших характеристик.

Матриця порівняння матеріалів за питомим імпедансом наведена у табл. 3.4.5

Таблиця 3.4

Матриця порівняння матеріалів за питомим імпедансом

	A1	A2	A3		
	2552	2937	2819		
A1	2552	=	<	<	2,00
A2	2937	>	=	>	0,34
A3	2819	>	<	=	

Матриця порівняння матеріалів за швидкістю розповсюдження звуку уздовж волокон наведена у табл. 3.5

НУБІП України

Таблиця 3.5

# НУБІП України

Матриця порівняння матеріалів за швидкістю розповсюдження звуку уздовж волокон, м/с

		A1	A2	A3		
		4175	5065	3625		
A1	4175	=	<	>	5	0,67
A2	5065	>	=	>		
A3	3625	<	<	=		

Матриця порівняння за термостійкістю наведена у табл.3.6

Таблиця 3.6

Матриця порівняння за термостійкістю

		A1	A2	A3		
		900	1000	800		
A1	900	=	<	>	5	0,67
A2	1000	>	=	>		
A3	800	<	>	=		

# НУБІП України

# НУБІП України

Матриця порівняння за ціною наведена у табл.3.7

Таблиця 3.7

Матриця порівняння за ціною

	A1	A2	A3
A1	15000	13000	7000
A2	15000	=	>
A3	13000	<	=

Після цього переходимо до наступного етапу: замість знаків «<», «=» та

«>» записуємо кількісні значення. Члени  $a_{ij}$  матриць суміжності  $A_j = \| a_{ij} \|$

визначають наступним чином [1]:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 + \alpha & \text{при } X_{ij} > X_{ej} \\ 1 & \text{при } X_{ij} = X_{ej} \\ 1 - \alpha & \text{при } X_{ij} < X_{ej} \end{cases}$$

Таку процедуру виконуємо до кожної із характеристик.



Матриця порівняння матеріалів за акустичним опором наведена у табл.3.8.

# НУБІП УКРАЇНИ

Таблиця 3.8

Матриця кількісних значень порівняння матеріалів за акустичним опором

	A1	A2	A3
A1	1	0,5	0,5
A2	30	1	0,5
A3	29	1,5	1

Матриця порівняння матеріалів за питомим імпедансом наведена у табл. табл.

3.9.

# НУБІП УКРАЇНИ

Таблиця 3.9

Матриця кількісних значень порівняння матеріалів за питомим імпедансом

	A1	A2	A3
A1	1	0,66	1,34
A2	2937	1	1,34
A3	2819	0,66	1

# НУБІП УКРАЇНИ

Матриця порівняння матеріалів за швидкістю розповсюдження звуку уздовж волокон представлена у табл. 3.10.

# НУБІП України

Таблиця 3.10

Матриця кількісних значень порівняння матеріалів за швидкістю

розповсюдження звуку уздовж волокон

	A1	A2	A3
	4175	5065	3625
A1	4175	1	0,33
A2	5065	1,67	1
A3	3625	0,33	0,33

Матриця порівняння матеріалів за термостійкістю представлена в табл. 3.11.

# НУБІП України

Таблиця 3.11

Матриця кількісних значень порівняння матеріалів за термостійкістю

	A1	A2	A3
	900	1000	800
A1	900	1	1,67
A2	1000	1,67	1
A3	800	1,5	1,5

# НУБІП України

Матриця порівняння матеріалів за ціною зображена в табл. 3.12

Таблиця 3.12

Матриця кількісних значень порівняння матеріалів за ціною

		A1	A2	A3
		15000	13000	7000
A1	15000	1	0,57	0,57
A2	13000	1,43	1	0,57
A3	7000	1,43	1,43	1

За допомогою матриць кількісних значень, для кожної характеристики складаємо матрицю суміжності, використовуючи знайдені значення.

Матриця порівняння матеріалів за акустичним опором зображено в табл. 3.13

Таблиця 3.13

Матриця порівняння матеріалів за акустичним опором

	A1	A2	A3	P1	P1*	P2	P2*	P3	P3*
	31	30	29						
A1	1	0,5	0,5	2,00	0,08	4,75	0,27	11,13	0,27
A2	1,5	1	0,5	3,00	0,12	7,25	0,41	17,13	0,42
A3	1,5	0	1	2,50	0,10	5,50	0,31	12,63	0,31
				25	0,30	17,50	1,00	40,88	1,00

Для підвищення точності розрахунків після першого розрахунку пріоритету  $P1^*$  проводять дві ітерації – визначають  $P2^*$  і  $P3^*$ , що дає можливість поступово наблизитися до правильного результату.

Розрахунок пріоритету  $P1^*$  проводять шляхом сумування значень кожного рядку:  $1+1,34+1,34+1,34=5,04$  (табл.3.13), далі сумують значення сум всіх рядків:  $5,02+4+4+2,98=16,0$ , потім визначають пріоритет по кожному рядку шляхом ділення значення суми кожного рядка на суму значень стовбця  $P1$ :  $5,02/16=0,29$ . Аналогічні обрахунки проводять для визначення пріоритетів по кожному рядку. Сума значень стовбця  $P1^*$  повинна дорівнювати 1.

Значення  $P2$  отримують наступним чином (перемножують рядок на стовпчик та сумують:  $(1*5,02)+(1,34*4)+(1,34*4)+(1,34*2,98)=19,733$  (табл.3.13), далі аналогічно з розрахунком  $P1$  сумують значення по кожному рядку, потім визначають пріоритет по кожному рядку шляхом ділення значення суми кожного рядка на суму значень стовбця  $P2$ , сума значень стовбця  $P2^*$  також повинна дорівнювати 1. Потім повторюють аналогічний розрахунок з визначенням  $P3$  та  $P3^*$ .

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Результати розрахунків пріоритетів за іншими параметрами наведено у  
табл. 3.13-3.3.17.

# НУБІП УКРАЇНИ

Таблиця 3.14

Матриця суміжності за питомим імпедансом

	A1	A2	A3	P1	P1*	P2	P2*	P3	P3*
	2552	2937	2819						
A1	1	0,66	1,34	3,00	0,12	8,54	0,33	24,69	0,33
A2	1,34	1	1,34	3,68	0,15	10,81	0,41	31,27	0,41
A3	0,66	0,66	1	2,32	0,09	6,73	0,26	19,50	0,26
	25	0,36	26,08	1,00	75,45	1,00			

Таблиця 3.15

Матриця суміжності за швидкістю розповсюдження звуку уздовж волокон

	A1	A2	A3	P1	P1*	P2	P2*	P3	P3*
	4175	5065	3625						
A1	1	0,33	1,67	3,00	0,12	7,20	0,30	18,91	0,30
A2	1,67	1	1,67	4,34	0,17	12,56	0,52	32,15	0,52
A3	0,33	0,33	1	1,66	0,07	4,52	0,19	11,05	0,18
	25	0,36	24,29	1,00	62,11	1,00			

Таблиця 3.16

Матриця суміжності за термостійкістю

	A1	A2	A3	P1	P1*	P2	P2*	P3	P3*
	900	1000	800						
A1	1	0	0	1,00	0,04	1,00	0,06	1,00	0,02
A2	1,67	1	0	2,67	0,11	4,34	0,27	24,60	0,39
A3	1,67	1,67	1	4,34	0,17	10,47	0,66	37,54	0,59
				25	0,32	15,81	1,00	63,13	1,00

Таблиця 3.17

Матриця суміжності за ціною

	A1	A2	A3	P1	P1*	P2	P2*	P3	P3*
	15000	13000	7000						
A1	1	0,57	0,57	2,14	0,09	6,05	0,24	17,15	0,24
A2	1,43	1	0,57	3,00	0,12	8,26	0,32	23,30	0,32
A3	1,43	1,43	1	3,86	0,15	11,21	0,44	31,67	0,44
				25	0,36	25,52	1,00	72,12	1,00

Наступним етапом будемо матрицю бінарних відношень, використовуючи середні значення балу з табл.3.20. Спочатку створюємо порівняльну матрицю –табл.3.18.

Таблиця 3.18

Матриця порівняння за середніми значеннями

	Y1	Y2	Y3	K	w
	2,29	1,86	2,86		
2,29	=	>	<		
1,86	<	=	<	2,00	0,34
2,86	>	>	=		

Далі переходимо до кількісних значень, та визначаємо показники P1, P1\*, P2, P2\*, аналогічно попередній методиці –табл.3.19.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Таблиця 3.19

Матриця бінарних відношень за кількісними значеннями

	Y1	Y2	Y3	K	W	P1	P1*	P2	P2*
	2,29	1,86	2,86						
	2,29	1	0,66	1,34		5,67	0,227	27,24	0,226
	1,86	1,34	1	1,34	2,00	6,35	0,254	31,31	0,260
	2,86	0,66	0,66	1	0,34	5,00	0,200	23,66	0,196
						4,33	0,173	20,51	0,170
						3,65	0,146	17,81	0,148
						25,01	1,00	120,54	1,00

Знаючи пріоритети матеріалів по одиничних показниках і пріоритети показників, будують підсумкову матрицю (табл. 3.20) для розрахунку комплексного пріоритету матеріалу (табл.18), який проводять за аналогією

розрахунку пріоритету для кожного матеріалу:

$$(0,319 \cdot 0,274) + (0,279 \cdot 0,350) + (0,228 \cdot 0,212) + (0,320 \cdot 0,164) = 0,286$$



Матеріал	Підсумкова матриця			Пріоритет показника по матриці бінарних відношень	Комплексний пріоритет матеріалів	
	Пріоритет матеріалів по підсумкових показниках					
Л	1	2	3	Но-мер	Значен-ня	
Дуб	0,272	0,327	0,304	1	0,226	0,206
Ясень	0,419	0,414	0,518	2	0,260	0,304
Береза	0,309	0,258	0,178	3	0,196	0,172

Виходячи з розрахунків, видно, що за даним методом максимальний комплексний пріоритет має матеріал «Ясень».

### 3.2 Розрахунок пріоритетного матеріалу за методом аналізу ієрархій

Метод аналізу ієрархій (МАІ) було розроблено у 70-80 роки минулого століття американським вченим Томасом Сааті як метод порівняльного аналізу та ранжування об'єктів, що характеризуються наборами критеріїв і показників, кількісних і якісних [1].

МАІ — це математичний інструмент системного підходу до складних проблем прийняття рішень. Він не диктує особі, що приймає рішення, прийняття будь-якого «правильного» рішення, а дозволяє знайти в інтерактивному режимі такий варіант (альтернативу), який найкращим чином узгоджується з розумінням суті проблеми та вимогами до її вирішення.

За допомогою даного методу спочатку будемо якісну модель проблеми вигляді ієрархії, що включає мету альтернативні варіанти досягнення цілі та критерії для оцінки якості альтернатив.

Мета: Визначення пріоритетного матеріалу з різних порід деревини для виготовлення акустичних панелей.

Критерії:

- Акустичний опір;
- Питокий імпеданс;
- Швидкість розповсюдження звуку уздовж волокон;
- Ціна.

Альтернативи:

- Деревина Дуба;
- Деревина Ясеня;
- Деревина Берези;

Першим етапом позначаємо альтернативи та критерії скороченими назвами (табл.3.21)

# НУБІП УКРАЇНИ

Таблиця 3.21

Характеристика критеріїв та альтернатив

№	Критерії	№	Альтернативи
Kp1	Акустичний опір;	A1	Деревина Дуба;
Kp2	Питомий імпеданс;	A2	Деревина Ясеня;
Kp3	Швидкість розповсюдження звуку уздовж волокон;	A3	Деревина Ясеня;
Kp4	Ціна.	A4	Деревина Берези;

Далі рішення завдання здійснюється шляхом заповнення матриць парних порівнянь (МПП). Для заповнення МПП використовують шкалу Сааті ([1])

Наступним етапом буде заповнення матриці парних порівнянь (МПП) критеріїв відносно мети

Формули для розрахунку значень [1]

Визначаємо середнє геометричне значення елементів матриці [1]:

$$G_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}) = (a_{i1} \times a_{i2} \times \dots \times a_{is})^{1/s}, \quad (3.5)$$

# НУБІП УКРАЇНИ

де  $i$  - номер рядка матриці;  $s$  - кількість елементів в  $i$ -му рядку матриці [1]

$$a_{i1} = w_1/w_1; a_{i2} = w_1/w_2; \dots; a_{is} = w_1/w_s. \quad (3.6)$$

Наступним етапом буде визначення локального пріоритету [1]:

$$ЛПPr_n = \frac{\left[ \left( \frac{w_n}{w_1} \right)^{G_1} \left( \frac{w_n}{w_2} \right)^{G_2} \dots \left( \frac{w_n}{w_n} \right)^{G_n} \right]^{1/n}}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} \quad (3.7)$$

Приклад розрахунку локального пріоритету для щільності:

Сума геометричних значень наведена в табл.3.22 та дорівнює 4,772.

$$ЛПPr_n(\text{щільності}) = \frac{\left( \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{4}}}{4,772} = 0,083$$

Таблица 3.22

Матриця парних порівнянь відносно мети

Критерії	Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	G	Лпр	
Щільність	Кр1	1	1/5	1/2	1/4	0,398	0,083
Міцність на згин	Кр2	5	1	1/4	1/2	1,988	0,417
Коеф.надійності	Кр3	2	2/5	1	1/2	0,795	0,167
Ціна	Кр4	4	4/5	2	1	1,591	0,333
	Сума					4,772	1,000

Після заповнення поля МПП, визначення середнього геометричного та локальних пріоритетів (ЛПPr) знаходять такі показники:

$$L_{am} = (1+5+2+4)*0,083 + (1/5+1+2/5+4/5)*0,417 + (1/2+2/2+2+2)*0,167 + (1/4+1/4+1/2+1)*0,333 = 4,16.$$
 Далі визначаємо індекс узгодженості МНП[1]:

$$CI = \frac{4,16 - 4}{4 - 1} = 0,053 \quad (3.8)$$

де 4 – розмір матриці парних відношень.  
 Ці показники використовують для знаходження останнього CR, який показує наскільки узгоджені судження про об'єкти. Значення CR вважається допустимим, якщо не перевищує 0,10-0,20. Інакше рекомендується переглянути оцінки.

$$CR = \frac{0,053}{0,9} = 0,058$$

де 0,9 – значення індексу узгодженості, залежить від розміру матриці.  
 Значення CR є допустимим бо не перевищує встановлених норм.  
 Наступним кроком проводимо попарні порівняння відносно до кожного критерію, за аналогічними обрахунками (табл.3.23-3.26).

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Таблиця 3.23

Матриця парних порівнянь альтернатив відносно до критерію «Акустичний опір»

Альтернативи	A1	A2	A3	A4	G	Лпр
Дуб A1	1	1/2	1/2	1/3	0,537	0,125
Ясень A2	2	1	1	2/3	1,075	0,25
Береза A3	2	1	1	2/3	1,075	0,25
Сума	5	2,5	2,5	1,67	2,68	0,62

$$L_{am}=4,001$$

$$CI=0,0003$$

$$CR=0,0003$$

Таблиця 3.24

Матриця парних порівнянь альтернатив відносно до критерію «Питомий імпеданс»

Альтернативи	A1	A2	A3	A4	G	Лпр
Дуб A1	1	1/3	1/3	1/7	0,355	0,073
Ясень A2	3	1	1	1/2	1,107	0,227
Береза A3	3	1	1	1/2	1,107	0,227
Сума	14	4,33	4,33	2,14	4,87	1,000

$$L_{am}=4,003$$

$$CI=0,001$$

$$CR=0,001$$

Таблиця 3.25

Матриця парних порівнянь альтернатив відносно до критерію «Швидкість розповсюдження звуку уздовж волокон»

Альтернативи	A1	A2	A3	A4	G	Лпр
Дуб A1	1	1	1	1/2	0,841	0,200
Ясень A2	1	1	1	1/2	0,841	0,200
Береза A3	1	1	1	1/2	0,841	0,200
Сума	5	5,00	5,00	2,50	4,20	1,000

$$L_{am}=4$$

$$CI=0$$

$$CR=0$$

Таблиця 3.26

Матриця парних порівнянь альтернатив відносно до критерію «Ціна»

Альтернативи	A1	A2	A3	A4	G	Лпр
Дуб A1	1	1/3	1/5	1/5	0,340	0,071
Ясень A2	3	1	3/5	3/5	1,019	0,214
Береза A3	5	1 2/3	1	1	1,699	0,357
Сума	14	4,67	2,80	2,80	4,76	1,000

$$L_{am}=4$$

$$CI=0$$

$$CR=0$$

Наступним кроком буде визначення глобального пріоритету, для цього наведемо матрицю пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив кожного з критеріїв – табл.3.27.

Таблиця 3.27

Матриця пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив кожного з критеріїв

Альтернативи	Критерії				Глобальні пріоритети
	Щільність	Міцність на згин	Коеф.надійності	Ціна	
	Числове значення вектора пріоритету				
	0,083	0,417	0,167	0,333	
Дуб	0,125	0,073	0,200	0,071	0,0979
Ясень	0,250	0,227	0,200	0,214	0,2203
Береза	0,250	0,227	0,200	0,357	0,2679

Визначення глобального пріоритету розраховується за формулою:

$$G_{lpr}(ДСГ) = (0,083 * 0,125) + (0,417 * 0,073) * (0,167 * 0,200) + (0,333 * 0,71) = 0,0979$$

Аналогічно проводимо розрахунки для інших матеріалів та заносимо результати до таблиці.

Визначивши глобальні пріоритети зводимо їх до однієї таблиці – табл.3.28.



Альтернативи		Глобальні пріоритети
A1	Береза	0,0979
A2	Дуб	0,2203
A3	Ясень	0,2679

Виходячи з розрахунку, бачимо, що альтернатива A3 має найбільше значення глобального пріоритету, тому деревина ясеня є найкращим матеріалом для досягнення даної мети, за даним методом визначення.

Визначивши пріоритетні матеріали за даними методами зробимо висновок по кожному з них.

За методом експертних оцінок експертних оцінок та методом розставляння пріоритетів визначеним матеріалом є деревина ясеня, метод розставляння пріоритетів базувався на експертних оцінках. Бачимо, що різниця між комплексним пріоритетом ясенем і дубом є невеликою, сутність в тому, що більша увага приділялась такому показнику як ціна, різнобіжність за іншими показниками є невеликою або відсутня (коєф.надійності). Виходячи з цього ясеня і є пріоритетним матеріалом.

За методом аналізу ієрархії, найвищий глобальний пріоритет має дуб, і є пріоритетним матеріалом. Це пояснюється тим, що за цим методом для досягнення визначеної мети, найбільше числове значення має вектор пріоритету швидкості проходження звукових хвиль вдоль волокон, а в даному матеріалі вона є найвищим показником в порівнянні з іншими альтернативами, та займає більшу частку в глобальному пріоритеті.

Проаналізувавши підсумки даних методів, в якості пріоритетного матеріалу оберемо ясень.

# НУБІП України

## Розділ 4. Теоретичні основи і Матеріали та методи Акустичне поглинання в пористих матеріалах

Звук - це механічні коливання газоподібних, рідких, або тверді пружні середовища, в ході яких проходить енергія що виділяється з джерела у вигляді акустичних хвиль. Для поздовжньої хвилі — швидкість поширення  $c$  (м с<sup>-1</sup>) розраховується відповідно до Формули Гука. (2008) :

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \text{ and}$$
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)},$$

(1) країни

(2)

де  $K$  — об'ємний модуль (Па),  $E$  — модуль Юнга (Па),  $\nu$  — коефіцієнт Пуассона, а  $\rho$  — середня щільність (кг м<sup>3</sup>). Матеріали, що характеризуються малою швидкістю поширення звуку поширення хвилі мають низький акустичний опір. для пористих матеріалів (таких як деревина), питомий опір  $Z_c$  (N s m<sup>-3</sup>) і хвильове число  $k$  можна виразити засобами густини  $\rho$  і об'ємного модуля  $K$  :

$$Z_c = \sqrt{K \cdot \rho}, \text{ and}$$
$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K}},$$

(3) країни

(4)

де  $\omega = 2 \pi f$ , а  $f$  — частота (Гц). Чим вище щільність деревини, тим вище її еластичність. Це також тягне за собою вищий імпеданс Eq. (3). Одночасно при вищій густині середовища швидкість акустичної хвилі знижується. (1). Тому деревна акустика залежить від її пористість  $D_w$ , звивистість  $K_c$ , і питомий опір повітряного потоку  $\xi$  (Н с м<sup>-4</sup>). Пористість в стані абсолютної сухості описується як

# НУБІП України

$$D_w = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}, \quad (5)$$

де  $\rho_w$  – густина в абсолютно сухому стані (кг м<sup>3</sup>), а  $\rho_s$  – щільність клітинної стінки деревини ( $\rho_s = 1500$  кг м<sup>3</sup>). Звивистість  $\epsilon$  мірою відхилення волокон від норми курс і  $\epsilon$  показником структури матеріалу:

$$k_s = \frac{1}{\sqrt{D_w}}. \quad (6)$$

Питомий опір потоку  $\xi$  можна визначити або емпірично за допомогою лабораторних експериментів, або за допомогою аналітичного розрахунку. Рішення, наведене нижче, використано Біс і Хансен (1996) і КоКсі Д'Антоніо (2009):

$$\xi = 7.95 \cdot 10^{-10} \left( \frac{\rho^{1.53}}{a^2} \right), \quad (7)$$

де  $a$  — радіус волокна, а  $\rho$  — щільність (кг м<sup>3</sup>). Для більшості волокнистих матеріалів з пористістю близько до 1, Delany і Bazley (1970) запропонував аналітичне рішення, що описує хвильове число  $k$  і питомий імпеданс  $Z_c$  (Аллард і Шампу 1992; КоКсі Д'Антоніо 2009):

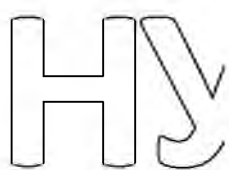
$$Z_c = \rho_0 c_0 [1 + 0.0571(\rho_0 f / \xi)^{0.754} - j0.0870(\rho_0 f / \xi)^{0.732}], \quad (8)$$

$$k = \omega / c_0 [1 + 0.0978(\rho_0 f / \xi)^{0.700} - j0.1890(\rho_0 f / \xi)^{0.595}]. \quad (9)$$

де  $\rho_0$  та  $c_0$  – густина повітря та швидкість звуку в повітрі відповідно ( $\rho_0 = 1,21$  кг м<sup>3</sup> і  $c_0 = 343$  м с<sup>-1</sup>).

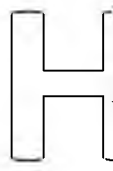
Рівняння, мають подібну структуру і відрізняються від наведеної вище моделі Делані та Базлі лише використовуваними коефіцієнтами:

НУБІП України



$$Z_c = \rho_0 c_0 [1 + 5.50(10^3 f/\xi)^{-0.632} - j8.43(10^3 f/\xi)^{-0.632}], \quad (10)$$

$$k = \omega/c_0 [1 + 7.81(10^3 f/\xi)^{-0.618} - j11.41(10^3 f/\xi)^{-0.618}]. \quad (11)$$

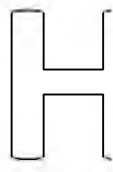


Ці рівняння застосовні для критеріїв:  $D_w \approx 1,0$ ,  $0,01 < \rho_0 f / \xi < 1,0$ ,  $1000 \leq \xi \leq 50\,000 \text{ Н с м}^{-4}$ . Згідно з Wassilieff (1996), наведені вище рівняння не описують саме звукопоглинання деревними волокнами, чия пористість і звивистість помітно відрізняються від прийнятих обмеження.

З урахуванням властивостей пористих матеріалів, включаючи питомий опір потоку, пористість, звивистість, і характерну довжину  $\Lambda$  можна розрахувати їх питомий імпеданс і хвильове число. Починаючи з класичної моделі поширення звуку, Аттенборо (1992) продемонстрували, що густина  $\rho$  і об'ємний модуль пружності  $K$  пористого середовища може бути висловлений:

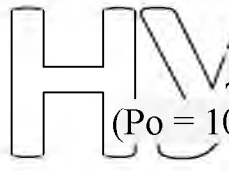
$$\rho = \rho_0 k_s \left( 1 - \frac{\tanh(\sqrt{i}\beta)}{\sqrt{i}\beta} \right)^{-1}, \quad (12)$$

$$K = \gamma P_0 \left( 1 - \frac{(\gamma - 1) \tanh(\sqrt{N}\sqrt{i}\beta)}{\sqrt{N}\sqrt{i}\beta} \right)^{-1} \quad (13)$$



Де  $\Lambda$  – характерна довжина

$$\beta = \left( \frac{6\pi f \rho_0 \left( \frac{c}{c_0} \right)^2}{D_w \xi} \right)^{0.5}, \quad (14)$$



де  $\gamma$  – питома теплоємність повітря ( $\gamma = 1,401$ ),  $P_0$  є атмосферним тиск ( $P_0 = 101\,325 \text{ Н м}^{-2}$ ), а  $N$  – число Прандтля ( $N = 0,71$ ).

Навпаки, хвильове число  $k$  і питомий опір  $Z_c$  пористого матеріалу залежать від густини  $\rho$  і об'єму модуль Позд Пружності  $K$  :



$$k = i\omega \left( \frac{\rho}{K} \right)^{0.5}, \text{ and} \quad (15)$$

$$Z_c = \frac{(\rho K)^{0.5}}{D_w}. \quad (16)$$

Пам'ятаючи про інерцію та ефект в'язкої муфти між жорстким каркасом і повітряним пористим матеріалом, Джонсон та ін. (1987) запропоновані моделі динамічної щільності і модуль об'ємної пружності. Ці моделі були прийняті авторами Champoux і Allard (1991), Allard and Champoux (1992), Ван і Торні (2001), Аталла і Паннетон (2005) та КоКсі Д'Анжеліо (2009). Для Алларда моделі (Champoux and Allard 1991; Allard and Champoux 1992), динамічна щільність пористого матеріалу можуть бути описані як

$$\rho = k_s \rho_0 \left( 1 + \frac{\xi D_w}{2j\pi f p_0 k_s} \sqrt{1 + \frac{8jk_s^2 \eta \rho_0 \pi f}{\zeta^2 \Lambda^2 D_w^2}} \right), \quad (17)$$

тоді як динамічний модуль об'ємної Позд Пружності дорівнює:

$$K = \frac{\gamma P_0}{\gamma - 1} \frac{1}{1 + \frac{8\eta}{2j\Lambda'^2 N \pi f \rho} \sqrt{1 + \frac{2j\rho \pi f N \Lambda'^2}{16\eta}}}, \quad (18)$$

де

$$\Lambda = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{8\eta k_s}{D_w \zeta}}, \text{ and} \quad (19)$$

$$\Lambda' = 2\Lambda, \quad (20)$$

$s$  – константа; для більшості абсорберів з порами мають круглий, квадратний і трикутного перерізу,  $s$  вважається таким 1,0, 1,07 і 1,14 відповідно (тут  $s = 1,07$ ).

Також у цьому випадку хвильове число  $k$  і специфічне імпеданс  $Z_c$  пористого матеріалу залежать від динаміки щільності  $\rho$  і об'ємний модуль Позд Пружності  $K$  Eq. (15), де

$$Z_c = \sqrt{K\rho}. \quad (21)$$

Аналітичне моделювання коефіцієнта поглинання  $\alpha$  передбачає визначення питомого акустичного опору  $Z$  (Н с м<sup>3</sup>) на поверхні зразка товщиною  $d$  визначенням коефіцієнта відбиття  $R$ :

$$Z = -jZ_c \cdot \cot(k \cdot d), \text{ and} \quad (22)$$

$$R = \frac{Z - \rho_0 \cdot c_0}{Z + \rho_0 \cdot c_0}. \quad (23)$$

Коефіцієнт звукопоглинання визначається за

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (24)$$

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## Матеріали та методи

Для цього було обрано кілька місцевих і тропічних порід деревини

вільха *Alnus glutinosa* L. Gearthn.,

ясен *Fraxinus excelsior* L.,

бальза *Ochroma lagopus* Sw.,

береза *Betula pendula* Roth.,

в'яз *Ulmus minor* Mill.,

меранти *Shorea* spp.,

дуб *Quercus robur* L.,

сосна *Pinus sylvestris* L.,

тополя *Populus nigra* L.

сапелі *Entandro phragma cylindricum* (Sprague) Sprague].

Матеріал повинен представляти традиційні види для виробництва меблів і відрізнятися щодо кольору, дизайну, пористості, щільності та еластичності. Бальза і деревина тополі слугуватимуть еталоном через їх низьку щільність і висока пористість. Ці матеріали розглядалися як поглиначі та/ або дифузори.

Деревина (необрізний брус) 28 і 35 мм товстий. Розрізи поздовжні/тангенціальні (ПОЗД/ТАНГ) і поздовжні/радіальні (ПОЗД/РАД). Відібрані шматки пиломатеріалів піддавали витримці в лабораторних умовах Позд Ради відносній вологості повітря 65 % при приблизно 20 °C. Пиломатеріали стругали і відшліфовані для отримання необхідних стандартних розмірів. Всього було відбрано 35 зразків для кожної породи деревини та анатомічного напрямку. Щільність, вологість (ВОЛОГІСТЬ), міцність на вигин і акустичні дані визначали на основі 10, 10, 10 і 5 зразків відповідно. Таким чином, загальна кількість досліджених зразків склала 715.

Застосовувалися стандарти ВОЛОГІСТЬ (PN-77/D-04100), щільність (PN 77/D-04101), модуль міцності (МОД/МЦІ) (PN-77/D-04103) і модуль Позд пружності (МП) (PN-63/D-04117). Рівняння пористості (5) – звивистість рівняння (6), рівняння питомого опору потоку (7), модуль об'ємної Позд Пружності Eq. (2), і питомий імпеданс Eq. (3) були розраховані. Визначено питомий поверхневий опір та коефіцієнти звукопоглинання. Метод передавальної функції, як описано в PN-EN ISO 10534-2:2003 використовувався стандарт. Обчислення дійсної та уявної частин питомого імпедансу деревини були виконані відповідно до модель Miki Eqs. (10) і (11), рівняння моделі Агтенборо. (12), (13), (15) і (16), а також рівняння моделі Алларда. (17), (18) та (21). Питомий поверхневий імпеданс розраховували за формулою (22), а коефіцієнт звукопоглинання отримано за допомога Eqs. (23) і (24) залежно від застосованих моделей. Обчислення проводилося з використанням системи GNU Octave-3.2.4.

## Результати і обговорення

### Фізико-механічні властивості

У таблиці 1 представлені фізико-механічні властивості досліджувани породи деревини. Видно, що всі матеріали мають подібну ВОЛОГІСТЬ в діапазоні від 5,6% (бальза) до 9,5% (сапелі). У межах однієї породи деревини збільшення щільності веде за собою збільшення модуля Позд Пружності. Очікувано, для більшості зразків, модуль пружності зростає разом із щільністю (тополя, сосна, вільха ПОЗД РАД, мерангі ПОЗД РАД, в'яз ПОЗД РАД, дуб ПОЗД РАД, береза ПОЗД ТАНГ, ясен). Це спостереження також, коли інші зразки порівнюють один з одним (бальза ПОЗД ТАНГ, вільха ПОЗД ТАНГ, меранти ПОЗД ТАНГ, в'яз ПОЗД ТАНГ, дуб ПОЗД ТАНГ і сапелі). На малюнку 1а видно лінійну залежність між щільністю та модулем Позд Пружності. Як наслідок, у більш високих діапазонах щільності, високий модуль Позд Пружності та об'єм спостерігалися значення модуля та питомого опору.



Найменший питомий імпеданс зафіксовано для бальзи ПОЗД ТАНГ (240 кН с м-3) та тополі ПОЗД ТАНГ та ПОЗД РАД (1164 та 1199 кН с м-3), а найвищий зафіксований у деревині ясена ПОЗД РАД і ПОЗД ТАНГ (2937 і 2852 кН с м-3) і березовий ПОЗД ТАНГ (2819 кН с м-3) відповідно (табл. 1). Деревні породи низької щільності демонструючи малий питомий імпеданс, може бути хорошим звуком абсорбери. На цю властивість також впливає пористість, звивистість і питомий опір потоку. У таблиці 2 розрах результати наведено з точки зору вищезазначених фізичних параметрів. Відповідно, найвища була пористість спостерігається для бальзи ПОЗД ТАНГ, тополі ПОЗД ТАНГ і ПОЗД РАД та сосни ПОЗД ТАНГ і ПОЗД РАД деревини становлять 0,945, 0,763 і 0,660 відповідно, тоді як ліси ясена ПОЗД ТАНГ і ПОЗД РАД і сапелі ПОЗД ТАНГ і ПОЗД РАД мають свої найнижчі значення в цьому відношенні (0,515 і 0,509).

Зворотний знайдено співвідношення для звивистості деревини та потоку повітря питомий опір. бальзи ПОЗД ТАНГ і тополя показали найнижчу звивистість (1,03 і 1,14) і питомий опір потоку (1937 і 17 026 Н с. м-4). Найбільша звивистість виявлена для ясена та сапеля лісів (1,41, 1,40), Позд Ради цьому найбільший питомий опір потоку був знайдено в сапелі та дубі (214 844 та 197 525 Н с м-4).

Це звісно з таблиць 1 і 2 видно, що значення питомого опору потоку повітря чітко корелюють з розмірами волокон, деревини щільність і її пористість. Питомий опір повітряному потоку зменшувався паралельно збільшенню радіуса волокон і пористості деревини при одночасному зниженні щільності і звивистості. Рисунок 1 б ілюструє лінійну залежність звивистості деревини до її щільності.

Також очевидним є лінійно пропорційне зменшення пористості деревини разом зі збільшенням її звивистості. Експоненціальна залежність питомого опору повітряного потоку від щільності проілюстрована на рисунку 1 е. Відповідно, пов'язані хороші звукопоглинальні властивості до низької щільності, низького питомого опору потоку та звивистості та високого пористості. Це додатково підтверджено на малюнку 1d, який ілюструє лінійну залежність питомого імпедансу від щільності. Деревина низької щільності має низький імпеданс і отже, більша здатність до звукопоглинання.

## Акустичні властивості деревини

### Експериментальні результати

На рисунку 2а наведені значення коефіцієнтів звукопоглинання.

Порівняння з результатами чисельних розрахунків виявляє помітно нижчі дані.

Це може означати, що модель цитованих дослідників була невідповідною або що вхідні дані були неправильними. Рисунок 2a показує, що найвищий коефіцієнт звукопоглинання для частоти 2 кГц зафіксовано для дуба ПОЗД ТАНГ, ясеня ПОЗД ТАНГ, сапелі ПОЗД РАД, сосни ІОЗД РАД, та деревини ПОЗД РАД ясеня 0,20, 0,19, 0,19, 0,19 та 0,18, відповідно. Примітно, що тільки сосна LR має високу пористість (0,671) і низький питомий опір повітряному потоку ( $35\ 540\ \text{Н}\cdot\text{см}^{-4}$ ). Інші зразки деревини мають нижчі дані по пористості, тобто 0,539, 0,515, 0,509 і 0,505 відповідно, і вищий питомий опір потоку повітря (198 844, 132 150, 214 855 і 136 338  $\text{Н}\cdot\text{см}^{-4}$ ). На малюнку 1e показано, що можна помітити лише незначну кореляцію між середнім значенням коефіцієнта поглинання та щільністю деревини. Подання однієї і тієї ж залежності для кожної частоти окремо (рис 1f) показує значне збільшення коефіцієнта звукопоглинання разом із збільшенням щільності деревини на частотах 2 і 4 кГц. Для інших частот ця залежність була несуттєвою.

### Числові результати

На рисунку 2 показано порівняння емпіричних результатів з отриманими розрахунками згідно з Моделю Мікі, Атенборо та Аллард. Тут тільки ПОЗД ТАНГ поверхні Позд Радедставлені в Позд Радипушенні, що поверхня ПОЗД РАД результати схожі.

Таблиця 1 Фізико-механічні властивості деревини.

Напечатать	Среднее число стд.	Вологістість (%)	Густина (кг м <sup>-3</sup> )	Модуль розриву (МПа)	Модуль пружності (МПа)	Об'ємний модуль (МПа)	Питомий імпеданс (кН/с м <sup>-3</sup> )
Бальза ПОЗД ТАНГ	x	5.6	82	6.7	840	700	240
	S	0.66	24	4.1	451		
Березовый ЛТ	x	6.9	706	137.7	13 512	11 260	2819
	S	0.51	20	19.5	735		
Дубовый ЛР	x	7.6	688	120.0	11 355	9463	2552
	S	0.72	26	5.9	589		
Дубовый ЛТ	x	8.0	691	112.7	10 734	8945	2486
	S	0.64	34	11.8	750		
Ясень	x	7.4	743	144.0	15 935	11 613	2937

ПОЗД РАД	X	0.35	29	18.5	1214		
Ясень ПОЗД ТАНГ	X	7.3	728	142.3	13 405	11 171	2852
	S	0.35	21	21.2	1067		
Меранти ЛР	X	9.2	584	103.3	11 652	9710	2381
	S	0.92	41	14.4	372		
Меранти ЛП	X	9.2	503	106.6	10 609	8841	2309
	S	1.11	30	7.2	379		
Ольха ЛР	X	8.2	570	108.7	11 248	9373	2311
	S	0.64	25	11.7	1220		
Ольха ПОЗД ТАНГ	X	7.8	519	90.0	8905	7421	1963
	S	1.04	20	5.2	423		
Сапели ЛР	X	9.2	737	125.3	11 524	9603	2660
	S	0.95	25	16.1	1134		
Сапели ПОЗД ТАНГ	X	9.5	737	116.0	10 672	8893	2560
	S	0.90	16	7.5	572		
Сосна ПОЗД РАД	X	8.2	494	88.0	9028	7523	1928
	S	1.34	20	4.9	610		
Сосновы й ПОЗД ТАНГ	X	8.4	510	98.4	10 447	8706	2107
	S	1.01	11	12.0	931		
Тополь ПОЗД РАД	X	7.8	360	48.2	4789	3991	1199
	S	1.33	8	7.5	654		
Тополь ПОЗД ТАНГ	X	7.9	355	48.0	3578	3815	1164
	S	1.25	4	7.0	544		
ЛР Вязь	X	7.3	569	126.9	11 992	9993	2586
	S	0.81	52	18.8	1443		
Элемент ПОЗД ТАНГ	X	7.1	510	112.4	10 560	8800	2317
	S	0.5	35	13.8	1101		

НУБІП України

Видно, що коефіцієнт поглинання значення за моделями Мікі та Алларда залежать від частоти (рис. 2, b і d). На 2 кГц, бальзове дерево показали найменший коефіцієнт поглинання (0,192 а 0,467 відповідно), потім тополя (0,583 і 0,923), сапелі (0,631 і 0,680), дуба (0,651 і 0,683).

Найвищі коефіцієнти поглинання спостерігаються для в'яза (0,794 і 0,797) і сосна (0,766 і 0,937). Однак ці дані в два-шість разів перевершують ті, що встановлені експериментально.

Навпаки, деревина бальзи та тополі стабільно демонструвала найнижчі коефіцієнти поглинання. Модель Аттенборо (рис. 2 с) є більш сприятливою в цьому контексті. Розраховані коефіцієнти не перевищують 0,36 і явно подібні до емпіричних значень.

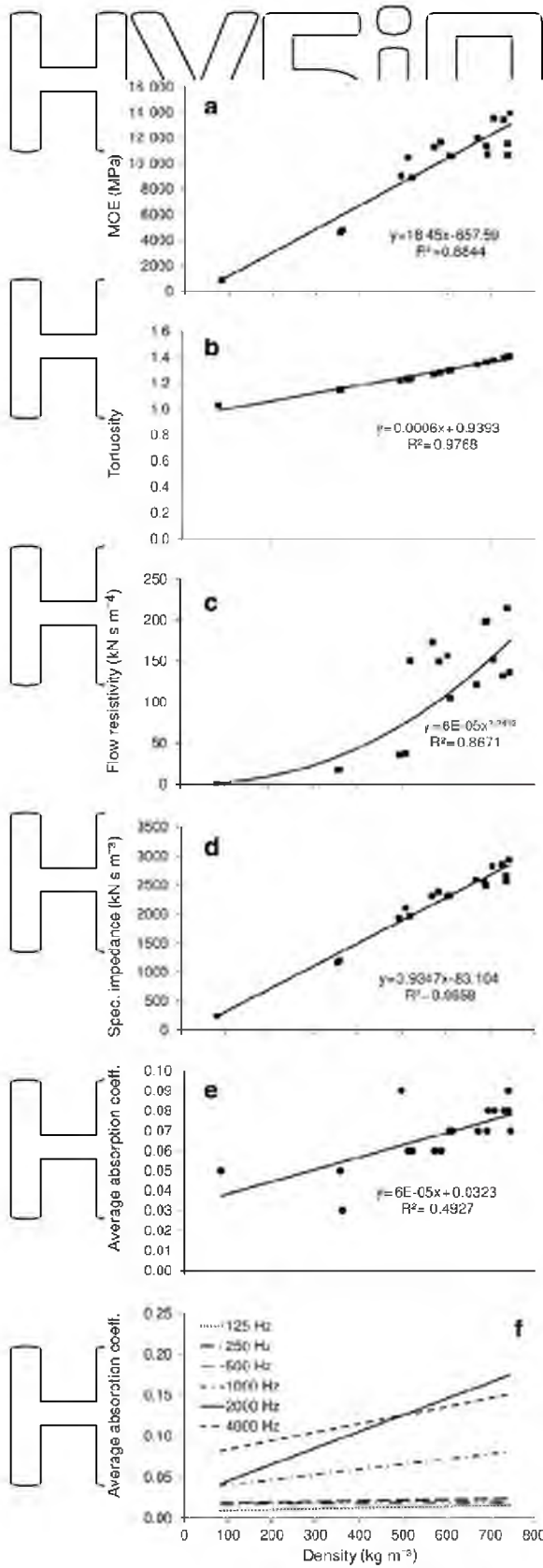
однак, вони відрізняються за своїми якісними ознаками. На відміну від результатів лабораторних досліджень, аналітична модель вказує на 2 кГц ясен (0,161), сапел (0,176) і дуб як матеріали з нижчим звукопоглинанням, а бальза (0,358), тополя (0,271) і вільха як породи з нижчим звукопоглинанням. найвищі звукові коефіцієнти. У цій моделі породи деревини низької щільності, високої пористості та низького опору потоку мають низький поверхневий імпеданс. найвищі звукові коефіцієнти.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



**Таблиця 2** Радіус волокна, пористість, звивистість і питомий опір потоку.

Назва матеріалу	Радіус волокна (мкм)	Пористість	Звивистість	Питомий опір потоку (Ns m <sup>-4</sup> )
Бальне ПОЗД ТАПГ	18.65	0.945	1.03	193.7
Березовий ЛП	10.95	0.529	1.37	151.429
Дубовий ЛП	9.40	0.540	1.36	197.525
ЛП	9.40	0.539	1.36	198.844
Ясень ПОЗД РАД	12.00	0.505	1.41	136.338
Ясень ПОЗД ТАПГ	12.00	0.515	1.39	132.150
Деревинний ЛП	8.55	0.611	1.25	148.927
Морозовий ЛП	8.35	0.598	1.25	156.403
Синьий ЛП	8.20	0.620	1.25	172.909
ЛП	8.20	0.634	1.24	149.801
Синьий ЛП	9.50	0.508	1.40	114.855
ПОЗД ТАПГ	9.50	0.508	1.40	214.855
Синьий ЛП	17.20	0.631	1.25	155.540
Деревинний ЛП	17.20	0.660	1.25	17.311
ПОЗД РАД	19.30	0.760	1.15	17.194
ЛП	19.30	0.760	1.15	17.194
Березовий ЛП	11.25	0.551	1.34	121.114
ЛП	11.25	0.593	1.31	105.159

НУБІП

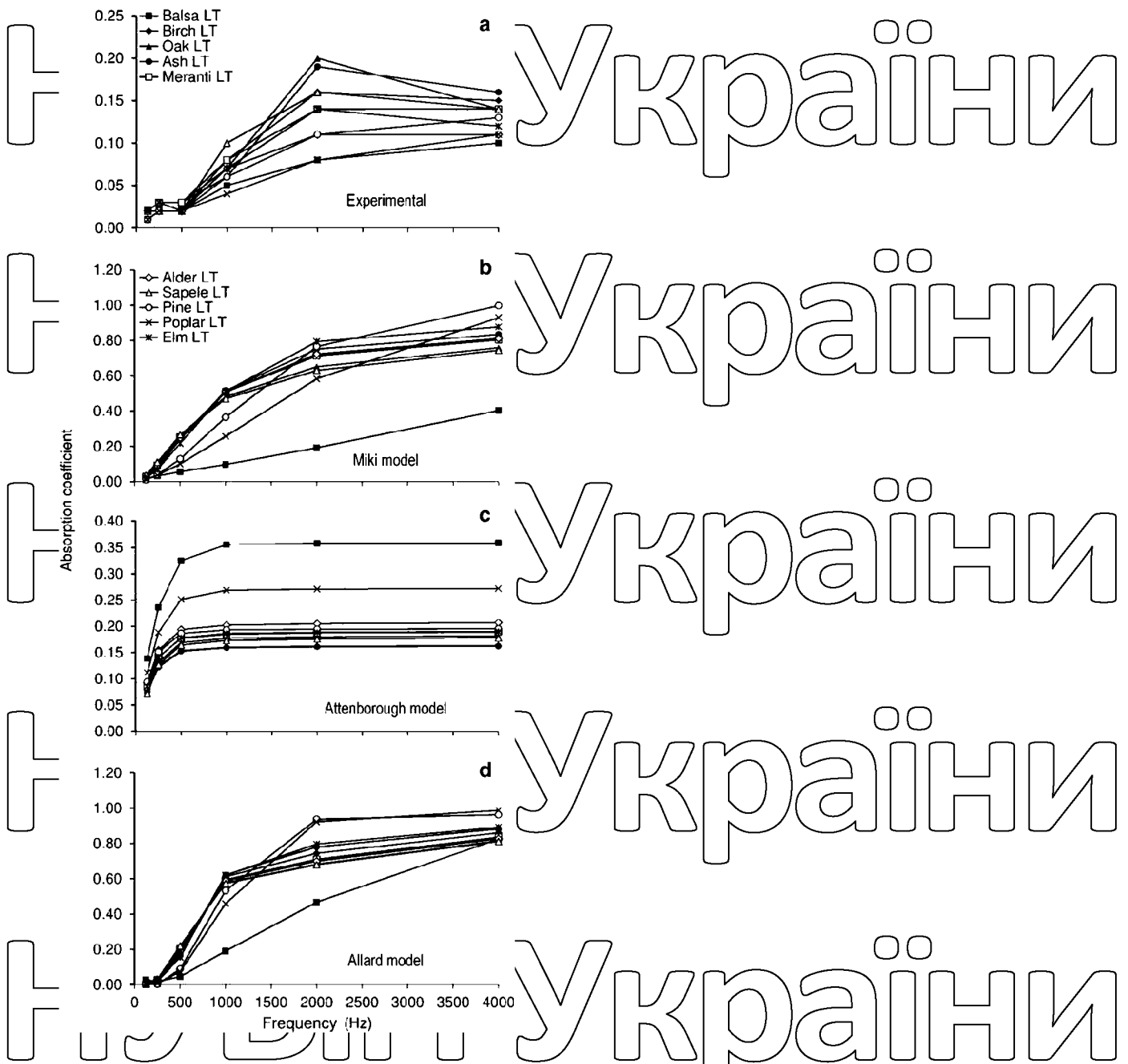
України

**Рисунок 1.** Різні дані як функція щільності (а) модуль Позд Пружності, (b) звивистість, (c) питомий опір потоку повітря, (d) питомий імпеданс, (e) середнє значення коефіцієнта звукопоглинання та (f) середнє значення коефіцієнта звукопоглинання в окремих октавах (для 2 кГц  $y = 0,0002x + 0,0255$ ,  $R^2 = 0,6173$ ; для 4 кГц  $y = 0,0001x + 0,0736$ ,  $R^2 = 0,4797$ ).

Очевидно, що ці моделі мають обмежену цінність розрахунку акустичних властивостей деревини. Загальне очікування полягає в тому, що зі збільшенням щільності еластичність і імпеданс також будуть підвищені. Одночасно таке саме збільшення щільності середовища викликало зменшення швидкості акустичної хвилі ( Krzysik 1978 ; Оно та Норімото 1983; По ж гай та ін. 1997 рік; K ú dela і Kunštár 2011). Крім того, короткі волокна з широким і прямокутним поперечним перерізом впливають на швидкість звуку в матеріалі та знижують питомий опір (Chauan та ін. 2005 рік; Мохеббі та ін. 2007). Таким чином, деревина низької щільності та високої пористості повинна демонструвати, подібно до моделі Аттенборо, високе звукопоглинання. Однак, всупереч очікуванням, результати лабораторних дослідів показали різну поведінку дуба, ясеня, сапеля, і сосна. Ці породи деревини мають високу щільність, але високу звивистість і питомий опір потоку, а також відносно добре поглинають звук. Це спостереження не було випадковим. Дуже важливу роль при цьому відіграє макроскопічна будова деревини. Представлені види листяних порід відносяться до кільчасто-пористої деревини. Діаметр їх судин вдвічі більший, ніж у вільхи, бальзи, берези, в'яза, меранті, тополі. ( Wagenf ù hr 2007 ). Крім того, у випадку з ясенем, дубом, і сосни, також дуже важливою є циклічна неоднорідність їх структури (рання деревина з високою пористістю і пізня деревина з високою щільністю і низькою пористістю). Цими елементами створені завихрення на поверхні деревини. Покращує шумопоглинання деревиною.

НУБІП України

НУБІП України



**Рисунок 2** Залежність коефіцієнта звукопоглинання від частоти: (а) експериментальні дані та (б) – (г)

На малюнку 3, а представлені емпірично визначені компоненти питомого поверхневого опору та їх співвідношення з частотою. Виходячи з цих даних, найвищі значення дійсної частини поверхневого імпедансу спостерігаються при 125 Гц. Навпаки, для бальзи ПОЗДОВЖ ТАНГЕНЦ, сосни ПОЗДОВЖ ТАНГЕНЦ і тополі ПОЗДОВЖ ТАНГЕНЦ уявна частина поверхневого імпедансу демонструвала найнижчі значення при 500 Гц. На частоті 2 кГц найнижчі значення дійсної частини поверхневого

Імпедансу визначено для сапелі Позд Радіал, дуба ПОЗДОВЖ ТАНГЕНЦ, сапелі ПОЗДОВЖ ТАНГЕНЦ, ясена ПОЗДОВЖ ТАНГЕНЦ та ясена L з 14,6, 15,8, 16,4, 17,1 і 18,4 Н см-4 відповідно. для сосни ПОЗД РАД, цей імпеданс склав 46,7 Н см-4 . Результати вказують на більш високу звукопоглинальну здатність породи деревини з пористістю 0,5, щільністю 680 – 730 кг м3, і питомий опір потоку в межах 132 150 – 214 855 Н см-4

. На рис. 3 б – г представлено чисельно розраховані складові питомого поверхневого імпедансу. Відповідно, найвищі значення дійсної частини поверхневого опору виникають при 125 Гц, тоді як уявна частина поверхневого опору є найнижчою. Це спостереження якісно узгоджується з даними експериментальних вимірювань (Малюнок 3 а). У всіх аналітичних моделях послідовність розташування кривих

зберігається відповідно до імпедансу окремих порід деревини. Однак існує значна різниця з кількісної точки зору, особливо для частоти понад 250 Гц. Лабораторні вимірювання показують, що бальза, сосна і тополя мають найвищий імпеданс, тоді як сапелі, дуб і в'яз демонструють найменший імпеданс. Навпаки, результати розрахунків (Рис. 3 б – д)

вказують на найвищий імпеданс у сапелі, дуба та меранті, але найменший у бальзи, тополі та сосни. Крім того, розрахункові дані в декілька разів перевищують дані експериментальних вимірювань. Ці коефіцієнти для дійсної частини поверхневого імпедансу становлять 5, 75 і 9 відповідно до Мікі, Аттенборо та Алларда. Що стосується уявної частини, то коефіцієнти 30, 12 і 57. Ці високі значення складових поверхневого імпедансу впливають на коефіцієнти звукопоглинання.

На малюнку 4 представлено коефіцієнти поглинання як функції частоти. Зрозуміло, що моделі Мікі та Алларда забезпечують завищені значення коефіцієнтів звукопоглинання, тоді як модель Аттенборо забезпечує результати, найближчі до лабораторних вимірювань. Однак навіть ця модель далека від досконалості і потребує значного вдосконалення.

НУБІП України

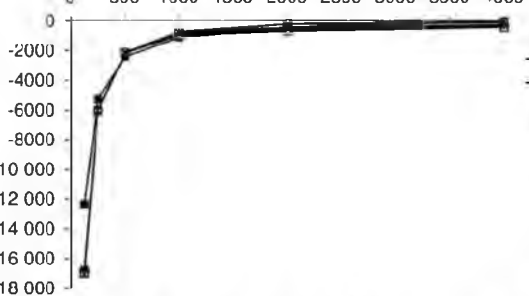
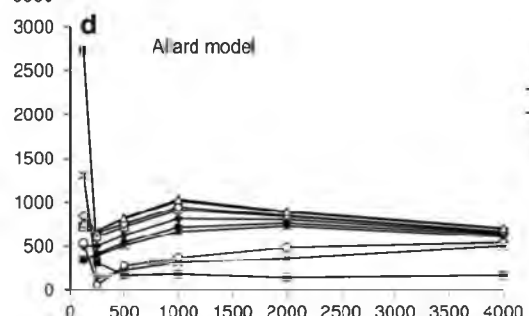
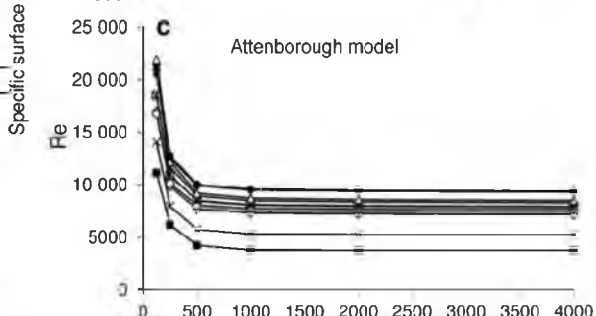
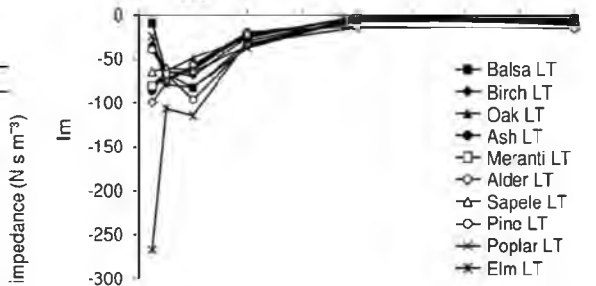
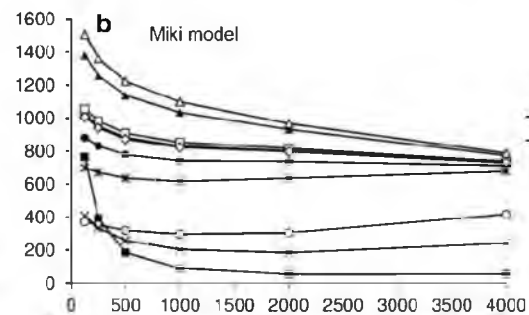
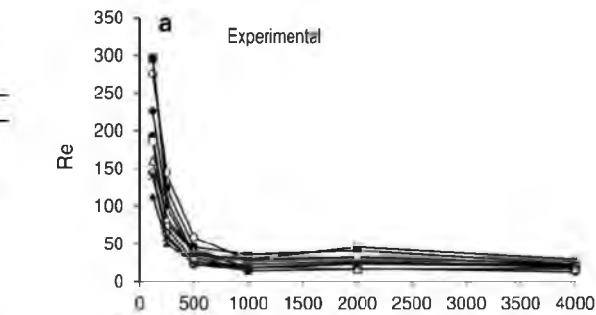
НУБІП України



## Висновок

Таким чином при дослідженні, результати зають змогу зрозуміти. Що в залежності від призначення стінових панелей є можливість варіювати між деревиною з високою густиною та твердістю для виключення можливості, або суттєво знизити проходження звукових хвиль крізь панелі. Використовувати з м'якими і легкими породами за- для зниження ефекту ехо та зайвої реверберації в приміщенні. Або-ж комбінувати матеріали для покращення обидвох характеристик що можуть виконувати стінові панелі.

DE GRUYTER

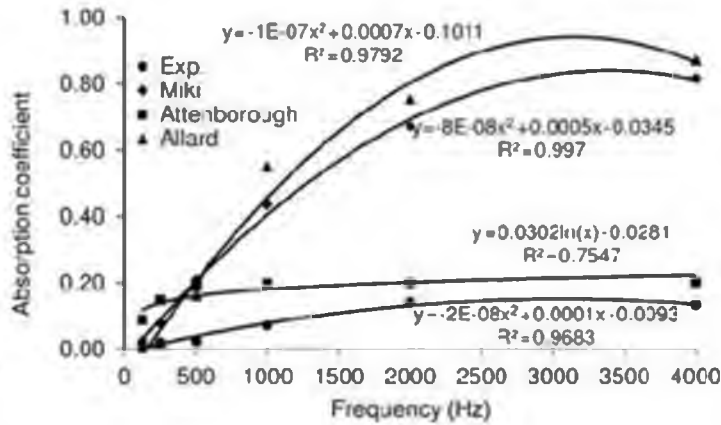


Frequency (Hz)

Frequency (Hz)

Україні

**Рисунок 3** Залежність питомого поверхневого імпедансу від частоти:  
 (а) експериментальні дані та (б) – (г) дані моделі відповідно до Мікі, Атенборо та Алларда відповідно.



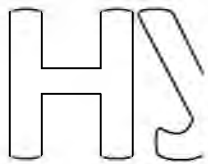
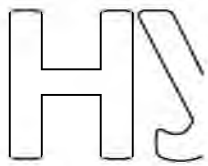
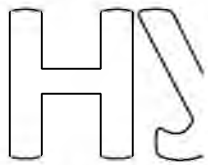
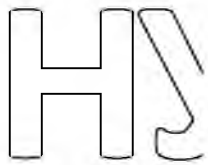
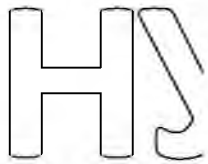
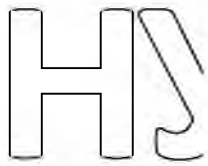
**Рисунок 4** Коефіцієнт звукопоглинання як функція частоти.

НУБІП України

НУБІП України  
 Креслення виробу

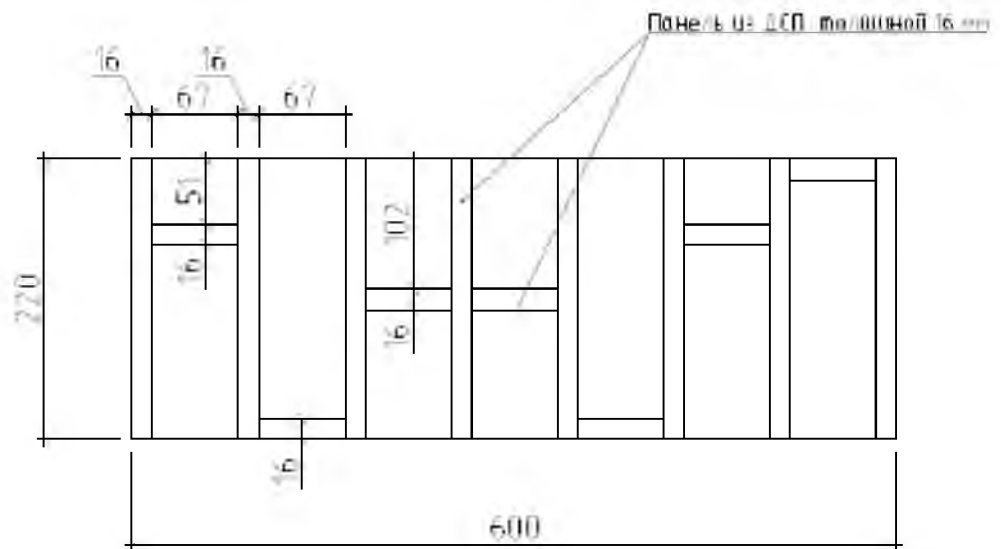
НУБІП України

НУБІП України



## Схема устройства диффузора Шредера 980x600x220 мм

Тип 3



Согласовано:	

Изм. №	
Дата	

Подпись и дата	

Изм. №	
Подп.	
Разраб.	
Н. Контр.	

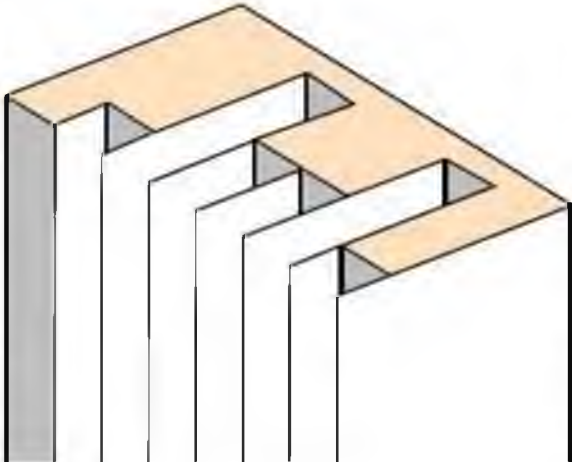
- Примечания:
1. Данный лист рассматривать совместно с листом №
  2. Диффузор Шредера выполняется из панелей ДСП толщиной 16 мм.
  3. Количество по помещению диффузоров Тип 3 составляет 2шт.

Изм.	Кол.уч.	Лист	Надс.	Подпись	Дата
ГМП		Климова В.С.			31/10
Прое.					
Разраб.		Свержик А.Ю.			
Разраб.		Раскольников			
Н. Контр.					

Музыкальная комната  
Схема устройства  
диффузора Шредера  
Тип 3

Стадия	Лист	Листов
Р		

НУ зраїни  
НУ зраїни



НУБІП УкРАїни

НУБІП УкРАїни

НУБІП УкРАїни

НУБІП УкРАїни

НУБІП УкРАїни

# НУБІП УКРАЇНИ

Список використаної літератури

• Allard, J.F. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials. Elsevier Applied Science, New York, 1993.

• Allard, J.F., Atalla, N. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials. John Wiley and Sons, Ltd., London, 2009.

• Allard, J.F., Champoux, Y. (1992) New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. J. Acoust. Soc. Am. 91:3346 – 3353.

• Atalla, Y., Panneton, R. (2005) Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. Can. Acoust. 33:11 – 24.

• Attenborough, K. (1992) Ground parameter information for propagation modeling. J. Acoust. Soc. Am. 91:418 – 427.

• Attenborough, K. (1993) Models for the acoustical characteristics of air-filled granular materials. Acta Acoust. 1:213 – 226

• Bies, D.A., Hansen, C.H. Engineering Noise Control. Theory and Practice, 2nd Edn. E&FN Spon, New York, 1996.

• Champoux, Y., Allard, J.F. (1991) Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. J. Appl. Phys. 70:1975 – 1979.

• Champoux, Y., Stinson, M.R. (1992) On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. J. Acoust. Soc. Am. 92:1120 – 1131.

• Chauan, S., Entwistle, K.M., Walker, J.C.F. (2005) Differences in acoustic velocity by resonance and transit-time methods in an anisotropic laminated wood medium. Holzforschung 59:428 – 434.

• Cox, T., D'Antonio, P. Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory. Design and Application. 2nd Edn. Taylor & Francis, New York, 2009.

• Delany, M.E., Bazley, E.N. (1970) Acoustical properties of fibrous

absorbent materials. *Appl. Acoust.* 3:105 – 116.

• Eda, K., Yasuda Y., Sakuma, T. (2010) Acoustical effects of columns, beams and furniture on sound fields in small enclosures. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, 23-27 August 2010, Sydney, Australia.

• Gibson, L.J., Ashby, M.F. *Cellular Solids. Structure and Properties*, 2nd Edn. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

• Gruca, M., Grzelka, J., Pyrc, M., Szwaja, S., Tutak, W. *Miernictwo i systemy pomiarowe*. Wydawnictwo Politechniki Cz ę stochowskiej, Cz ę stochowa, 2008.

• Ikeda, A., Nakahara, M., Kai, C., Omoto, A. (2005) The acoustical effect of audio equipment and furniture in a mixing room. *J. Acoust. Soc. Jpn. E* 26:233 – 236.

• Johnson, D.L., Koplik, J., Dashen, R. (1987) Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* 176:379 – 402.

• Kamiński, T., Kinash, R., Pilch, A., Rubacha, J. (2011) Acoustics of Lviv Polytechnic National University Assembly Hall. *Architecture. Czasopismo techniczne*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 11:91 – 98.

• Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Lucky, I.K., Nugroho, N., Hadi Y.S. (2012a) Acoustical properties of particleboard made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *BioResources* 7:5700 – 5709.

• Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Lucky, I.K., Nugroho, N., Hadi Y.S. (2012b) Development of particleboard for acoustical panel from tropical fast growing species. *J. Trop. For. Sci.* 24:64 – 69.

• Khedari, J., Charoenvai, S., Hirunlabh, J. (2003) New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Build. Environ.* 38:435 – 441.

• Kollmann, F.F.P., C ô t é , W.A. Jr. *Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 1984.

• Krzysik, F. Nauka o drewnie. PWN, Warszawa, 1978. Kódelá, J., Kunštár, M. (2011) Physical-acoustical characteristics of maple wood with wavy structure. *Ann. Warsaw Univ. Life Sci. SGGW. For. Wood Technol.* 75:12 – 18.

• Labonnote, N., Rønquist, A., Malo, K.A. (2013) Semi-analytical prediction and experimental evaluation of material damping in wood panels. *Holzforschung* 67:333 – 343.

• Li, P., Kim, B.-J., Wang, Q., Wu, Q. (2013) Experimental and numerical analysis of the sound insulation property of wood-plastic composites (WPCs) filled with precipitated CaCO<sub>3</sub>. *Holzforschung* 67:301 – 306.

• Martellotta, F., Cirillo, E. (2009) Experimental studies of sound absorption by church pews. *Appl. Acoust.* 70:441 – 449.

• Miki, Y. (1990) Acoustical properties of porous materials: modifications of Delany-Bazley models. *J. Acoust. Soc. Jpn.* E 11:19 – 24.

• Mohammad, J.I., Johari, N., Fouladi, M.H. (2010) Numerical investigation on the sound absorption coefficients of Malaysian wood. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, 23 – 27 August 2010, Sydney, Australia.*

• Mohebbi, B., Yaghoobi, K., Roshnia, M. (2007) Acoustic properties of hydrothermally modified mulberry (*Morus alba* L.) wood. *The Third European Conference on Wood Modification*, Eds. Hill, C.A.S., Jones, D., Militz, H., Ormondroyd, G.A. The Angel Hotel, Cardiff, UK, 15 – 16 October 2007.

• Nor, M.J.M., Ayub, M., Zulkifli, R., Amin, N., Fouladi, M.H. (2010) Effect of different factors on the acoustic absorption of coir fiber. *J. Appl. Sci.* 10:2887 – 2892.

• Ono, T., Norimoto, M. (1983) Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Jpn. J. Appl. Phys.* 22:611 – 614.

• Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Інноваційні технології оброблення деревини» [Пінчевська О.О., Головач В.М.] – Київ: «Видавничий центр НУБІП України», 2021;

<https://www.taginterio.com/post/%D0%B7%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BC-%D0%BD%D1%83%D0%B6%D0%BD%D1%8B-%D0%B0%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B3%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D0%B8>

<https://www.taginterio.com/post/%D0%B0%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BB%D0%B8-%D0%B3%D0%B4%D0%B5->

<https://www.taginterio.com/post/%D0%BA%D1%83%D0%BF%D0%B8%D1%82%D1%8C%D0%BA%D0%B0%D0%BA-%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BE%D1%8C%D0%BD%D0%BE->

<https://www.taginterio.com/post/%D0%B2%D1%8B%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%8C>

<https://birzhaplus.ru/opisanie-i-preimushhestva-zvukopogloshhayushhh-panelei/>

- <http://shumniv.ru/materialy/akusticheskie-panei.html>
- <https://livelydav.ru/dekorativnye-zvukoizolyatsionnye-panei-dlya-sten-v-kvartire/>

<https://m-strana.ru/articles/shumopogloshchayushchie-panei/>

- <https://ecosp.bv/321-rekomendatsii>

<file:///D:/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0/1%20%D0%94%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BC/vlivanie-nekotoryh-faktorov-na-akusticheskie-svoystva-drevesiny.pdf>

- <https://www.odrova.ru/blogs/poleznnye-sovety/kakaya-temperatura-goreniya-drov-v-pechi-porody-dereva-kakie-drova-luchshe-vybrat#:~:text=%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80>



<https://www.acoustic.ua/recommendations/587>

Allard, J.F. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials. Elsevier Applied Science, New York, 1993.

Allard, J.F., Atalla, N. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials. John Wiley and Sons, Ltd., London, 2009.

Allard, J.F., Champoux, Y. (1992) New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. J. Acoust. Soc. Am. 91:3346 – 3353.

Atalla, Y., Panneton, R. (2005) Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. Can. Acoust. 33:11 – 24.

Attenborough, K. (1992) Ground parameter information for propagation modelling. J. Acoust. Soc. Am. 91:418 – 427.

• Attenborough, K. (1993) Models for the acoustical characteristics of air filled granular materials. *Acta Acoust.* 1:213 – 226.

• Bies, D.A., Hansen, C.H. *Engineering Noise Control. Theory and Practice*, 2nd Edn. E&FN Spon, New York, 1996.

• Champoux, Y., Allard, J.F. (1991) Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J. Appl. Phys.* 70:1975 – 1979.

• Champoux, Y., Stinson, M.R. (1992) On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. *J. Acoust. Soc. Am.* 92:1120 – 1131.

• Chauhan, S., Entwistle, R.M., Walker, J.C.F. (2005) Differences in acoustic velocity by resonance and transit-time methods in an anisotropic laminated wood medium. *Holzforschung* 59:428 – 434.

• Cox, T., D'Antonio, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application*. 2nd Edn. Taylor & Francis, New York, 2009.

• Delany, M.E., Bazley, E.N. (1970) Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl. Acoust.* 3:405 – 416.

• Eda, K., Yasuda Y., Sakuma, T. (2010) Acoustical effects of columns, beams and furniture on sound fields in small enclosures. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, 23-27 August 2010, Sydney, Australia.

• Gibson, L.J., Ashby, M.F. *Cellular Solids. Structural and Properties*, 2nd Edn. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

• Gruca, M., Grzelka, J., Pyrc, M., Szwaja, S., Tutak, W. *Miernictwo i systemy pomiarowe*. Wydawnictwo Politechniki Cz ę stochowskiej, Cz ę stochowa, 2008.

• Ikeda, A., Nakahara, M., Kai, C., Omoto, A. (2005) The acoustical effect of audio equipment and furniture in a mixing room.

J. Acoust. Soc. Jpn. E 26:233 – 236.

- Johnson, D.L., Koplik, J., Dashen, R. (1987) Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. J. Fluid Mech. 176:379 – 402.

- Kamisiński, T., Kinash, R., Pilch, A., Rubacha, J. (2011) Acoustics of Lviv Polytechnic National University Assembly Hall. Architecture. Czasopismo techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 11:91 – 98.

- Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Lucky, I.K., Nugroho, N., Hadi Y.S. (2012a) Acoustical properties of particleboard made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. BioResources 7:5700 – 5709.

- Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Lucky, I.K., Nugroho, N., Hadi Y.S. (2012b) Development of particleboard for acoustical panel from tropical fast growing species. J. Trop. For. Sci. 24:64 – 69.

- Khedari, J., Charoenvai, S., Hirunlabh, J. (2003) New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. Build. Environ. 38:435 – 441.

- Kollmann, F.F.P., Côté, W.A. Jr. Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 1984.

- Krzysik, F. Nauka o drewnie. PWN, Warszawa, 1978. Kúdelá, J., Kunštár, M. (2011) Physical-acoustical characteristics of maple wood with wavy structure. Ann. Warsaw Univ. Life Sci. SGGW. For. Wood Technol. 75:12 – 18.

- Labonnote, N., Rønquist, A., Malo, K.A. (2013) Semi-analytical prediction and experimental evaluation of material damping in

wood panels. *Holzforschung* 67:333 – 343.

- Li, P., Kim, B.-J., Wang, Q., Wu, Q. (2013) Experimental and numerical analysis of the sound insulation property of wood plastic composites (WPCs) filled with precipitated CaCO<sub>3</sub>. *Holzforschung* 67:301 – 306.

- Martellotta, F., Cirillo, E. (2009) Experimental studies of sound absorption by church pews. *Appl. Acoust.* 70:441 – 449.

- Miki, Y. (1990) Acoustical properties of porous materials – modifications of Delany-Bazley models. *J. Acoust. Soc. Jpn. E* 11:19 – 24.

- Mohammad, J.K., Johari, N., Fouladi, M.H. (2010) Numerical investigation on the sound absorption coefficients of Malaysian wood. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, 23 – 27 August 2010, Sydney, Australia.

- Mohebbi, B., Yaghoubi, K., Roohnia, M. (2007) Acoustic properties of hydrothermally modified mulberry (*Morus alba* L.) wood. *The Third European Conference on Wood Modification*, Eds Hill, C.A.S., Jones, D., Militz, H., Ormondroyd, G.A. The Angel Hotel, Cardiff, UK, 15 – 16 October 2007.

- Nor, M.J.M., Ayub, M., Zulkifli, R., Amin, N., Fouladi, M.H. (2010) Effect of different factors on the acoustic absorption of coir fiber. *J. Appl. Sci.* 10:2887 – 2892.

- Ono, T., Norimoto, M. (1983) Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. *Jpn. J. Appl. Phys.* 22:611 – 614.

НУБІП УКРАЇНИ