

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Оцінювання ефективності різних методів термо- та шумоізоляції
кузова автобуса в умовах інтенсивної експлуатації»**

Виконав: студент VI курсу групи Ат-62

Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”

(шифр і назва)

Назар ДИКИЙ

(ім'я та прізвище)

Керівник: Ігор ДУФАНЕЦЬ

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

к.т.н., доцент Олег СУКАЧ
“ _____ ” _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу студенту

Дикий Назар Романович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **"Оцінювання ефективності різних методів термо- та шумоізоляції кузова автобуса в умовах інтенсивної експлуатації"**

Керівник роботи _____ Дуфанець Ігор Гнатович ст. викладач
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджена наказом по університету від «28» лютого 2025 р. № 140/к-с

2. Строк подання студентом роботи «28» листопада 2025 року

3. Вихідні дані: огляд літературних джерел стосовно особливостей конструкції каркасу кузова автобуса, проблеми та недоліків термо- та шумоізоляції кузова автобуса, дослідження впливу термо- та шумоізоляції автобуса на показники експлуатації; пропозиції варіантів покращення термо- та шумоізоляції кузова автобуса; методика розрахунку економічної ефективності запропонованих технічних рішень, необхідні заходи з охорони праці при експлуатації транспортних засобів.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Обґрунтувати актуальність проблеми термо- та шумоізоляції кузова автобуса.

4.1. Проаналізувати сучасні методи й матеріали тепло- та шумоізоляції.

4.2. Визначити джерела тепловтрат і шуму в конструкції кузова.

4.3. Дослідити вплив умов інтенсивної експлуатації на ефективність ізоляції.

4.4. Виконати порівняльну оцінку різних методів ізоляції.

4.5. Розробити оптимальну комбіновану систему термо- і шумоізоляції.

4.6. Провести техніко-економічне обґрунтування запропонованого рішення.

4.7. Розробити розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Загальні висновки

Список використаних джерел

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3,4	Дуфанець І.Г. ст. викладач кафедри автомобілів та тракторів			
5	Городецький І.М., доцент кафедри інженерної механіки			

6. Дата видачі завдання 28 лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Отримання завдання. Вивчення рекомендованої літератури за темою кваліфікаційної роботи, написання аналітичного огляду.	12.09.25- 16.09.25	
2	Літературний огляд варіантів термо- і шумоізоляції каркасу кузова автобусів. Аналіз недоліків та технологічних особливостей термо- і шумоізоляції каркасу кузова.	17.09.25- 06.10.25	
3	Написання методичної частини роботи, розроблення перспективного рішення та його обґрунтування.	04.10.25- 17.10.25	
4	Розроблення та обґрунтування пропозицій щодо реалізації результатів роботи. Розроблення питань з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.	18.10.25- 25.10.25	
5	Техніко-економічне обґрунтування використання запропонованих рішень.	28.10.25- 13.11.25	
6	Завершення роботи в цілому. Представлення роботи для перевірки на плагіат.	14.11.25- 28.11.25	

Студент _____ Назар ДИКИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Ігор Дуфанець
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 629.113.066.

Дикий Н. Р. Оцінювання ефективності різних методів термо- та шумоізоляції кузова автобуса в умовах інтенсивної експлуатації. Дубляни, ЛНУВМБ імені С.З. Гжицького, 2025. 82 с.

Рисунок 19, табл. 5, бібл. посилань 36.

Метою магістерської роботи є комплексне підвищення ефективності термо- та шумоізоляції кузова автобуса шляхом наукового обґрунтування, оцінювання та порівняння сучасних методів і матеріалів ізоляції, визначення їх експлуатаційної стійкості в умовах інтенсивних теплових, вібраційних та акустичних навантажень, а також розроблення оптимізованої інтегрованої ізоляційної системи, орієнтованої на підвищення теплового та акустичного комфорту пасажирського салону.

Завдання дослідження:

- здійснити системний аналіз сучасного стану проблеми термо- та шумоізоляції автобусних кузовів та обґрунтувати актуальність проведення дослідження;
- визначити основні джерела теплових втрат і шуму в конструкції кузова автобуса та оцінити характер їх впливу на пасажирський салон;
- дослідити особливості впливу інтенсивної експлуатації на фізико-механічні, теплофізичні та акустичні властивості ізоляційних матеріалів;
- здійснити порівняльний аналіз ефективності різних методів тепло- і шумоізоляції на основі експериментальних даних, довідкових матеріалів та розрахункових моделей;
- сформулювати узагальнену теплотехнічну та акустичну модель кузова автобуса для оцінювання характеристик тепло-звукопередачі;
- визначити найбільш уразливі зони кузова щодо теплових та акустичних впливів;

- розробити та обґрунтувати оптимізовану комбіновану систему ізоляції з урахуванням конструктивних та експлуатаційних вимог;
- виконати техніко-економічну оцінку доцільності впровадження запропонованої системи ізоляції;
- розробити комплекс заходів з охорони праці та безпеки під час виконання робіт із тепло- та шумоізоляційними матеріалами.

Об’єктом дослідження є кузов автобуса як просторово-огороджувальна інженерна структура, що забезпечує тепловий режим, акустичний комфорт та експлуатаційну надійність транспортного засобу.

Предметом дослідження є ефективність сучасних методів, матеріалів і технологій термо- та шумоізоляції кузова автобуса, а також їхній вплив на теплотехнічні, акустичні та експлуатаційні показники конструкції в умовах інтенсивної експлуатації.

Методи дослідження:

У роботі застосовано: методи технічного та наукового аналізу, порівняльний аналіз ізоляційних матеріалів, теплотехнічні розрахунки, методи вимірювання акустичних параметрів, комп’ютерне моделювання процесів теплопередачі та акустичного поширення (CAE/MCE), експертно-аналітичний підхід до вибору ізоляційних рішень, а також методи техніко-економічного аналізу для визначення доцільності запропонованої системи.

Ключові слова: ТЕРМОІЗОЛЯЦІЯ, ШУМОІЗОЛЯЦІЯ, АВТОБУСНИЙ КУЗОВ, ТЕПЛОВТРАТИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КУЗОВІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.	9
1.1 Конструктивні особливості кузова автобуса та джерела тепловтрат і шуму.	9
1.2 Порівняльна характеристика сучасних термо-шумоізоляційних матеріалів та технологій.	14
1.3 Огляд нормативно-правової бази та стандартів (Україна, ЄС) щодо комфорту пасажирських перевезень.	23
1.4 Огляд стану проблеми, аналіз тенденцій та формулювання вихідних передумов дослідження.	26
2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ.....	29
2.1 Характеристика об'єкта дослідження та обґрунтування експлуатаційних умов.....	29
2.2 Методичні основи теплотехнічних розрахунків та акустичних вимірювань.....	35
2.3 Методологія комп'ютерного моделювання теплових і шумових полів у кузові автобуса в середовищах ANSYS та SolidWorks.	39
3. ЧИСЕЛЬНИЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМО- І ШУМОІЗОЛЯЦІЇ КУЗОВА	43
3.1 Дослідження теплообмінних процесів та акустичних характеристик базової конструкції та порівняльний аналіз матеріалів ізоляції.....	43
3.2 Моделювання температурних та акустичних полів при використанні різних матеріалів.	50
3.3 Оптимізація та розроблення комбінованої системи ізоляції.	53

4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСНОГО РІШЕННЯ	56
4.1 Обґрунтування вибору оптимального ізоляційного пакету за технічними показниками.	56
4.2. Технологічний процес монтажу та особливості застосування обраних матеріалів.	59
4.3 Рекомендації щодо впровадження комбінованої системи ізоляції у виробництво.	62
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ	66
СИТУАЦІЯХ.....	66
5.1. Аналіз небезпечних факторів та вимоги безпеки при роботах з ізоляцією.	66
5.2. Інженерно-технічні заходи безпеки та засоби індивідуального захисту.	69
6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.....	72
6.1 Визначення терміну окупності інвестицій у модернізацію.	72
6.2 Аналіз економічної ефективності впровадження рішення у масштабах підприємства.	74
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79

ВСТУП

Автобусний транспорт є ключовою складовою пасажирських перевезень, забезпечуючи мобільність населення у міському та міжміському сполученні. Підвищення вимог до комфорту, енергоефективності та якості транспортних послуг зумовлює необхідність удосконалення конструкції автобусних кузовів, зокрема їх тепло- та шумоізоляційних властивостей. Саме вони визначають рівень акустичного комфорту пасажирів, ефективність систем опалення й кондиціювання, а також загальні експлуатаційні витрати транспортного засобу.

У конструкції автобуса наявні численні зони, схильні до теплових втрат, проникнення структурного та повітряного шуму, що пов'язано з роботою силових агрегатів, дією вібрацій, аеродинамічними впливами та температурними коливаннями навколишнього середовища. В умовах інтенсивної експлуатації ці фактори посилюються, сприяючи прискореному старінню ізоляційних матеріалів, зниженню їх теплозахисних та акустичних характеристик і погіршенню мікроклімату салону.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр ізоляційних матеріалів — від традиційних мінераловатних плит до полімерних пін, композитних структур, демпфувальних покриттів і масонавантажених мембран. Вибір оптимального рішення залежить від їх теплофізичних, акустичних, пожежних, масових характеристик, довговічності та конструктивної сумісності з кузовом автобуса. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває комплексне дослідження ефективності матеріалів із врахуванням реальних експлуатаційних умов. З огляду на зростання вимог до екологічності, комфорту й безпеки пасажирських перевезень, такі дослідження є необхідними для розроблення сучасних інженерних рішень.

Отримані результати дозволяють формувати науково обґрунтовану оптимальну комбіновану систему ізоляції кузова автобуса, спрямовану на зменшення теплових втрат, підвищення акустичного комфорту та покращення загальної експлуатаційної ефективності транспортного засобу.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КУЗОВІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.

1.1 Конструктивні особливості кузова автобуса та джерела тепловтрат і шуму.

Завдяки мегатенденціям сталого розвитку та скорочення викидів CO₂, муніципалітети та міста збільшують використання автобусів у громадському транспорті. Однак для досягнення кліматичних цілей недостатньо лише зменшити індивідуальний рух. Системи громадського транспорту, такі як автобуси, також повинні стати більш енергоефективними та виробляти менше викидів. Теплоізоляція транспортних засобів є важливим кроком до більшої сталості в громадському транспорті. Як автобуси з двигунами внутрішнього згоряння, так і автобуси з електродвигунами отримують сталу вигоду від ефективної ізоляції.

Конструкція кузова автобуса визначає його експлуатаційну надійність, безпеку та комфорт пасажирів, а також впливає на рівень енерговитрат, пов'язаних із опаленням та кондиціонуванням салону. Автобуси різного призначення – міські, приміські, міжміські та туристичні – працюють за умов постійних механічних, теплових, акустичних і вібраційних навантажень. Кузов є складною просторовою конструкцією, що взаємодіє з шасі, силовою установкою, трансмісією та зовнішнім середовищем. У процесі експлуатації його огорожувальні елементи піддаються впливу перепадів температур, вологи, вітрових потоків, механічних ударів, коливань дороги та шумових навантажень різної природи. Така багатофакторність визначає необхідність комплексного підходу до вивчення теплотехнічних та акустичних характеристик кузова.

Основою конструкції сучасних автобусів виступає просторовий каркас, виготовлений зі сталевих або алюмінієвих трубчатих профілів замкнутого перерізу. Каркас виконує функцію несучої структури, на яку кріпляться зовнішні панелі, внутрішня обшивка, віконні системи, двері, сидіння та елементи інтер'єру. У конструктивному плані кузови поділяють на рамні та несучі. У

рамних конструкціях основне навантаження сприймає окрема рама, у той час як кузов має переважно огорожувальну та функціональну роль. Такий тип конструкції характерний для старіших або спеціалізованих моделей, вирізняється високою міцністю та ремонтпридатністю, але меншою жорсткістю на кручення та підвищеним рівнем структурного шуму, що передається від шасі.

Несучі кузови (монококи або напівмонококи), що переважають у сучасному автобусобудуванні, поєднують каркас і зовнішню обшивку в єдину структуру, яка забезпечує підвищену жорсткість, зменшену масу та покращені характеристики пасивної безпеки. Однак значна кількість зварних швів і стиків, різноманітність матеріалів та велика площа поверхонь становлять труднощі для забезпечення стабільної теплоізоляційної й шумоізоляційної ефективності.

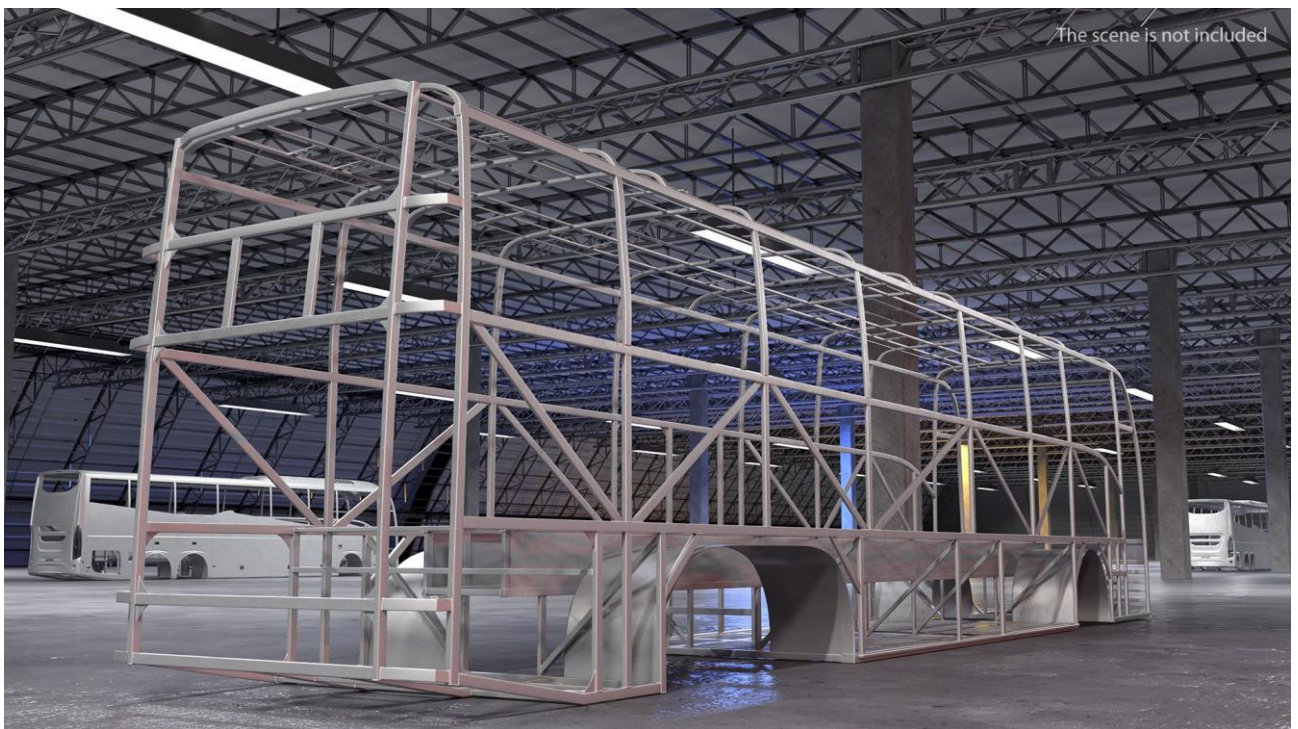


Рисунок 1.1. Каркас кузова автобуса без зовнішнього облицювання.

У будові кузова автобуса використовують кілька типів матеріалів, що по-різному впливають на його теплотехнічні й акустичні властивості. Сталеві профілі забезпечують міцність і довговічність, але мають високу теплопровідність і є ефективними каналами для поширення вібрацій. Алюмінієві елементи зменшують масу, але також проводять тепло краще, ніж композитні

матеріали. Зовнішні панелі можуть виготовлятися зі сталі, алюмінію або склопластику; у туристичних автобусах поширені композитні та сендвіч панелі, які володіють кращими теплоізоляційними властивостями. Внутрішня обшивка переважно виконується з пластиків, декоративних панелей та текстильних матеріалів, які слугують бар'єром для повітряного шуму, але часто мають низьку ефективність у боротьбі з структурними коливаннями.

Важливою особливістю конструкції автобуса є велика площа огорожувальних поверхонь, що спричиняє значні тепловтрати через стінки, дах, підлогу, двері та вікна. У міських автобусах втрати тепла зростають через часті відкриття дверей і високу інфільтрацію повітря у суворих зимових умовах. Бокові стінки з металевими каркасами утворюють численні містки холоду, особливо у місцях зварювання та кріплення обшивки. Порожнини між профілями можуть заповнюватися теплоізоляційним матеріалом, але нерівномірність заповнення та старіння ущільнювачів знижує ефективність теплоізоляційного шару протягом експлуатації.



Рисунок 1.2. Каркас кузова автобуса з зовнішнім облицюванням.

Дах автобуса є однією з найбільш вразливих зон, щодо впливу зовнішньої температури. Улітку він нагрівається до високих температур через пряму дію сонячної радіації, що створює значне теплове навантаження на систему кондиціонування. Взимку через дах відбуваються інтенсивні тепловтрати, особливо в місцях монтажу люків, кондиціонерів, вентиляційних каналів та електричних магістралей. Підлога автобуса також є джерелом відчутних втрат тепла, оскільки має безпосередній контакт з холодним дорожнім полотном. Металеві елементи шасі виконують роль теплопровідних містків, через які холод переноситься всередину салону. Застосування утеплювачів у шарі підлоги (наприклад, ППУ, ППС або екструдованого пінополістиролу) покращує тепловий стан, однак ефективність залежить від якості герметизації стиків і стану підлогового покриття.

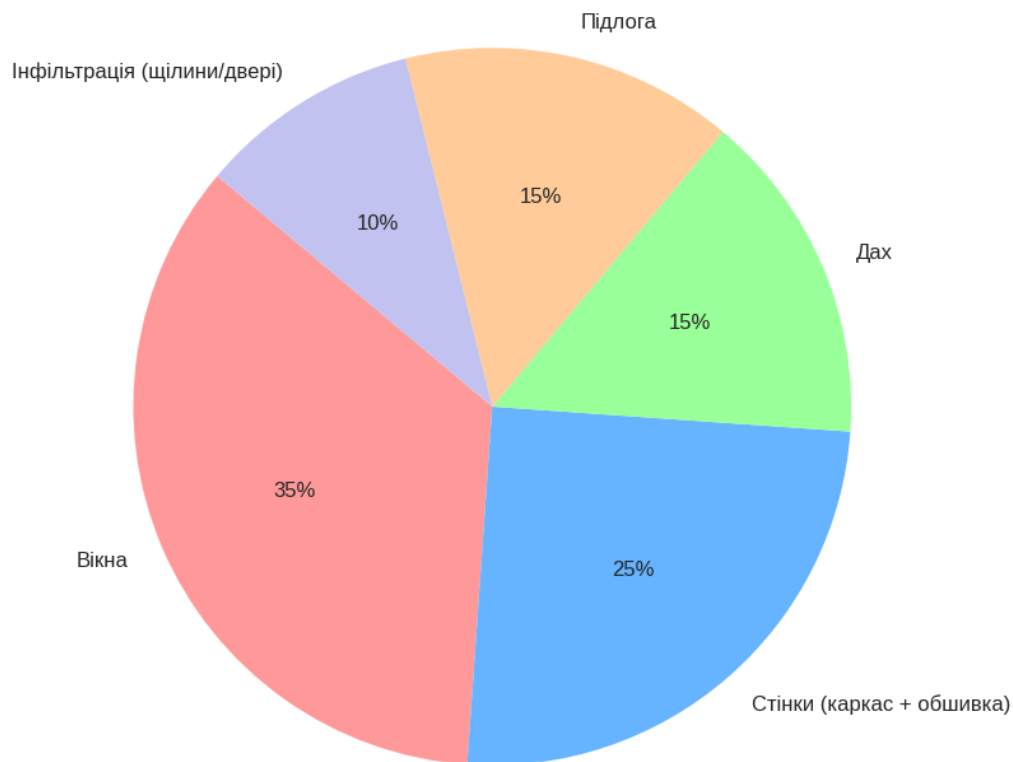


Рисунок 1.3. Структура теплових втрат кузова автобуса

Окрему увагу необхідно приділяти віконним системам, які становлять значну частку площі бокових поверхонь. Навіть сучасні багатошарові склопакети мають теплопровідність, у 4–6 разів вищу, ніж сендвіч-панелі стінок, тому вони залишаються одним із найбільш проблемних елементів щодо

тепловтрат. Крім того, віконні рами часто стають джерелом інфільтрації, особливо після тривалої експлуатації та зношення ущільнювачів.

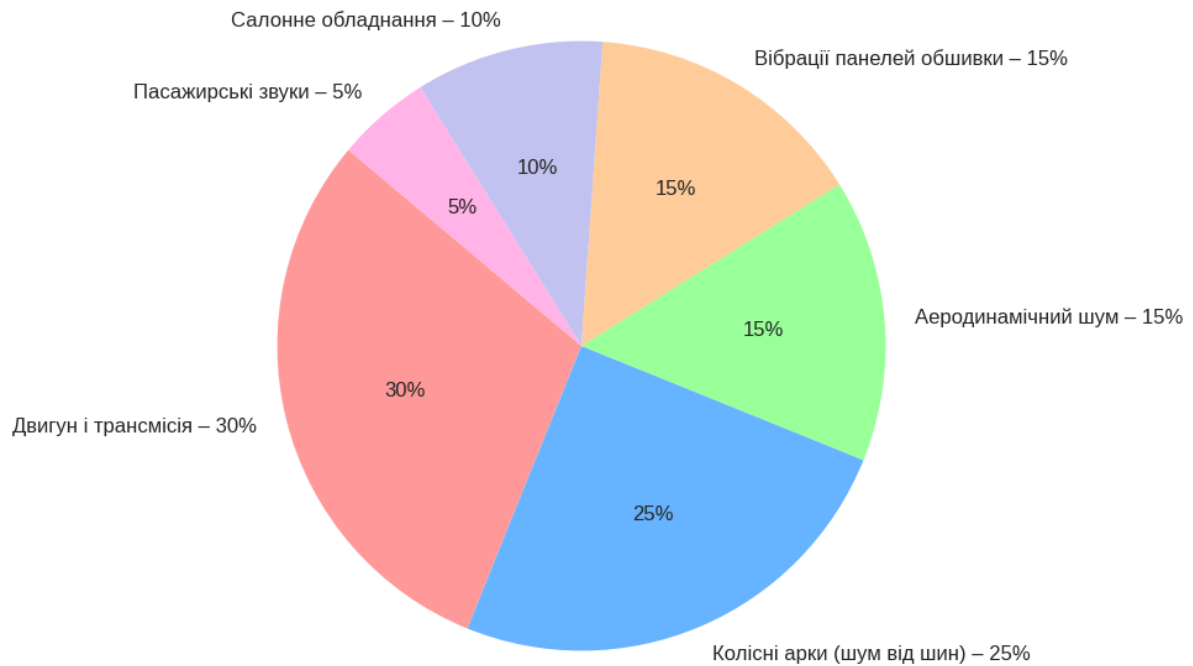


Рисунок 1.4. Діаграма джерел шуму в салоні автобуса під час руху.

Поряд із теплотехнічними аспектами конструкція кузова автобуса визначає також характер та інтенсивність акустичних навантажень у салоні. Рівень шуму формується сукупністю зовнішніх і внутрішніх джерел, серед яких основне значення мають силова установка, трансмісія, системи впуску та випуску, елементи підвіски, шини, аеродинамічні потоки та вторинні резонансні явища. Двигун є одним із найінтенсивніших джерел шуму, особливо у моделях з переднім або середнім розташуванням силового агрегату. Його вібрації передаються на кузов через кріплення і поширюються по трубчастому каркасу, викликаючи вторинні акустичні коливання внутрішніх панелей. У автобусах із заднім розташуванням двигуна рівень шуму в передній частині салону зменшується, проте зростають вимоги до шумоізоляції моторного відсіку.

Джерелом значного шуму є система випуску відпрацьованих газів та вентилятори охолодження, особливо при роботі на підвищених навантаженнях. Вібрації, що виникають у підвісці та передаються через елементи кузова, створюють структурний шум, який є одним з найскладніших для усунення.

Взаємодія коліс із дорожнім покриттям формує шум, що залежить від типу шин, швидкості руху та стану дороги. Аеродинамічний шум стає суттєвим на швидкостях вище 70 км/год, коли турбулентні потоки повітря обтікають кузов, створюють свисти у зонах стиків і підвищений акустичний тиск на передню облицювальну панель.

Усередині салону рівень шуму визначається також вторинними джерелами – розхитуванням кріплень, резонансом пластикових елементів, коливанням декоративних панелей та вентиляційних каналів. Через значний внутрішній об'єм автобуса виникають стоячі хвилі, що підсилюють окремі частотні діапазони шуму. Металевий каркас, як пружна система, розповсюджує коливання від джерел по всій конструкції, що створює складну картину акустичних взаємодій.

Комплексний аналіз конструктивних особливостей кузова автобуса свідчить, що тепло- і шумоізоляція є взаємопов'язаними елементами єдиної системи підвищення комфортності та ефективності транспорту [1]. Металеві профілі каркаса, різномірні матеріали обшивки, велика площа поверхонь і значна кількість технологічних отворів створюють канали для втрат тепла і поширення шуму. Ефективна ізоляція повинна враховувати не лише фізичні властивості матеріалів, а й особливості геометрії кузова, місця концентрації вібрацій та зони найбільших теплових втрат. Саме тому подальші розділи роботи присвячені детальному аналізу методів покращення теплоізоляційних характеристик, дослідженню акустичного середовища та формуванню оптимальної комбінованої системи термо- і шумоізоляції.

1.2 Порівняльна характеристика сучасних термо-шумоізоляційних матеріалів та технологій.

Сучасні транспортні засоби, зокрема автобуси, експлуатуються в умовах інтенсивних теплових, механічних та акустичних навантажень, що висуває високі вимоги до ізоляційних систем кузова. Матеріали, які застосовуються для

тепло- і шумоізоляції, повинні одночасно забезпечувати мінімальні теплові втрати, ефективно пригнічувати шумові та вібраційні впливи, бути стійкими до вологи, вібрацій, механічних навантажень та відповідати жорстким нормам пожежної безпеки. Порівняння сучасних рішень здійснюється на основі теплофізичних, акустичних, масових, технологічних та експлуатаційних характеристик матеріалів.

Однією з найпоширеніших груп теплоізоляційних матеріалів у автобусобудуванні є мінеральні (базальтові) волокнисті утеплювачі. Вони характеризуються низькою теплопровідністю, високим рівнем звукопоглинання та негорючістю. Ці матеріали добре працюють у широкому діапазоні температур, не підтримують горіння, мають низький коефіцієнт димоутворення і значно покращують акустичний комфорт у салоні. Водночас волокниста структура чутлива до зволоження: при намоканні теплопровідність зростає, а звукопоглинальні властивості знижуються. Також під дією вібрацій можливе злежування волокон, що погіршує довговічність системи. Тому мінеральні утеплювачі найчастіше застосовують там, де є можливість забезпечити якісний бар'єр від вологи та стабільність кріплення.



Рисунок 1.5. Базальтова вата з фольгою.

Значною групою сучасних теплоізоляційних матеріалів є жорсткі полімерні утеплювачі: пінополіуретан (PUR), поліізоціанурат (PIR) та екструдований пінополістирол (XPS). Ці матеріали вирізняються низькою теплопровідністю, малою масою та стабільною геометрією. Особливо цінним є PIR-утеплювач, який поєднує низьку теплопровідність, високу вологостійкість

та покращені показники вогнестійкості порівняно з іншими полімерами. Він широко застосовується у дахових, підлогових та бортових секціях автобусів. PUR забезпечує добрий тепловий опір і легко наноситься методом напилення, створюючи монолітний шар без стиків, що мінімізує «містки холоду». Проте його горючість вимагає застосування спеціальних антипіренових систем.



Рисунок 1.6. Пінополіуретан (PUR).

Екструдований пінополістирол (XPS) і традиційний пінопласт (пінополістирол ПСБ) використовуються там, де потрібні легкість, низьке водопоглинання та доступність. XPS має закритокоміркову структуру, що забезпечує високу вологостійкість і стабільність властивостей. Він добре працює в зоні підлоги, під сидіннями та в технічних нішах. Звичайний пінопласт (ПСБ) є економічно вигідним рішенням для великої площі покриття, однак його теплоефективність нижча, ніж у PIR, а пожежна стійкість обмежена. Крім того, пінопласт швидше руйнується під впливом вібрацій та механічних деформацій, що зменшує його актуальність у високонавантажених зонах автобуса.



Рисунок 1.7. Поліізоціанурат (PIR).

Серед високоефективних утеплювачів окрему групу складають фенольні піни, які завдяки низькій теплопровідності, високій вогнестійкості та низькому димоутворенню набули широкого поширення в сучасному транспортному машинобудуванні. Вони забезпечують значне підвищення пожежної безпеки конструкції, що особливо важливо у контексті виконання вимог UNECE R118. Водночас їхня вартість є вищою порівняно з традиційними утеплювачами.



Рисунок 1.8. Екструдований пінополістирол (XPS).

Шумоізоляційні матеріали в конструкції автобуса умовно поділяються на демпфувальні, бар'єрні та поглинаючі. Демпфувальні матеріали призначені для зменшення амплітуди коливань металевих панелей. На практиці використовуються в'язко-еластичні полімерні матеріали на основі бутилкаучуку або полімер-бітумних композицій, які наносять на внутрішню поверхню панелей кузова. Вони суттєво знижують структурний шум, зміщують частотні резонанси й забезпечують помітне зменшення металевих вібрацій. Найвищу ефективність демпфування отримують завдяки локальному, а не суцільному покриттю — зосередженому у зонах максимальних деформацій.



Рисунок 1.9. Пінопласт (ПСБ).

Бар'єрні матеріали працюють за принципом масової ізоляції. Масонавантажені мембрани є найбільш ефективними для зменшення проникнення повітряного шуму у середньочастотному діапазоні. Вони складаються зі щільного полімерного шару, часто комбінованого з еластичною підкладкою, що одночасно зменшує передачу вібрацій. Масові бар'єри широко застосовують у перегородках між салоном та моторним відсіком, підлогових конструкціях і бокових панелях. Основним їхнім недоліком є збільшення ваги кузова, що обмежує застосування таких матеріалів у міських автобусах, де вимоги до маси особливо критичні.



Рисунок 1.10. Фенольна піна.

Таблиця 1.1. Теплофізичні та експлуатаційні властивості сучасних теплоізоляційних матеріалів, застосовуваних у конструкції кузова автобуса.

Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Водопоглинання	Пожежна стійкість	Механічна стабільність	Вібраційна стійкість	Особливості застосування
Базальтова мінеральна вата	0,033–0,040	Високе без захисту	Негорючий (A1)	Середня	Схильна до злежування	Потрібен пароповітробар'єр, відмінне звукопоглинання
Пінополіуретан (PUR)	0,022–0,028	Середнє	Горючість без антипіренів	Висока	Висока	Напилення дає монолітний шар, чутливий до високих температур
Поліізоціанурат (PIR)	0,020–0,026	Низьке	Підвищена стійкість	Висока	Висока	Найкраще співвідношення теплопровідності/пожежної стійкості
Екструдований пінополістирол (XPS)	0,028–0,034	Дуже низьке	Низька	Висока	Висока	Оптимальний для підлоги та технічних ніш
Пінопласт (ПСБ)	0,035–0,042	Середнє	Низька	Низька–середня	Низька	Дешевий, але гірший у вібраційних і пожежних умовах
Фенольна піна	0,020–0,025	Низьке	Дуже висока	Середня	Висока	Висока пожежна безпека, мала товщина, дорожча за інші

Поглинаючі акустичні матеріали спрямовані на зменшення реверберації та поглинання звукової енергії, що потрапляє в салон. Найпоширенішими є меламінова піна та відкритокомірковий поліуретан. Меламінові поглиначі мають мікропористу структуру, що забезпечує високий коефіцієнт поглинання у середніх і високих частотах при мінімальній масі. Вони також характеризуються високою пожежною безпекою та стабільністю властивостей в умовах температурних коливань [2]. Відкритокоміркові поліуретанові матеріали є доступними, гнучкими та легко монтуються, проте мають нижчу вогнестійкість, що потребує додаткового захисту. Мінеральні поглинаючі матеріали забезпечують високий рівень звукопоглинання, але вимагають захисного шару, який запобігає видуванню волокон.



Рисунок 1.11. Шумоізоляція фольгована Soft Metal Армований.

У реальних умовах автобусної експлуатації найкращі результати забезпечують комбіновані системи, у яких тепло- та шумоізоляція поєднані у багатошарову конструкцію. У підлозі зазвичай поєднують XPS або PIR як тепловий шар із масонавантаженою мембраною для зменшення дорожнього шуму. У бічних панелях найчастіше використовують демпфувальні покриття, шар мінеральної або полімерної теплоізоляції та акустичний поглинач. У стелі перевага надається легким матеріалам — меламіновій піні або PIR-панелям з декоративними облицюваннями. Для моторного відсіку та інших високотемпературних зон застосовуються матеріали з підвищеною термо- та маслостійкістю.

Таблиця 1.2. Порівняльні характеристики шумоізоляційних матеріалів для кузова автобуса.

Група матеріалів	Приклади	Основні властивості	Частоти ефективності	Переваги	Обмеження
Демпфувальні матеріали	Бутилкаучукові та полімер-бітумні листи	Знижують вібрації металевих панелей	80–500 Гц	Ефективно пригнічують резонанси	Збільшують масу; потрібне локальне нанесення
Бар'єрні матеріали (масонавантажени мембрани)	MLV-мембрани	Перешкоджають проникненню повітряного шуму	250–2000 Гц	Високий індекс звукоізоляції	Висока маса, обмеження для легких кузовів
Поглинаючі матеріали	Меламінова піна, ППУ відкритокомірковий, мінеральні мати	Поглинають звукову енергію всередині салону	500–4000 Гц	Легкі, високий коефіцієнт поглинання	Поліуретан горючий, мінеральні волокна потребують захисту
Комбіновані системи	Демпфер + утеплювач + акустичний шар	Комплексний ефект	Широкосмугова дія	Найкращий результат для автобуса	Вища вартість і складність монтажу

Комплексне порівняння сучасних матеріалів демонструє, що жоден із них не може одночасно виконати всі функції. Волокнисті утеплювачі забезпечують високе звукопоглинання, але потребують захисту від вологи. Пінополістирол і

XPS мають низьку теплопровідність та високу водостійкість, але слабші акустичні та пожежні властивості. PIR-утеплювачі мають кращий баланс теплових, пожежних і експлуатаційних характеристик. Демпфери та масові бар'єри ефективні у зниженні вібрацій і повітряного шуму, але додають масу конструкції.

Таблиця 1.3. Порівняння застосування тепло і шумоізоляційних матеріалів у різних конструктивних зонах кузова автобуса.

Конструктивна зона	Основні впливи	Рекомендовані матеріали	Обґрунтування застосування
Підлога	Дорожній шум, вібрації, холод від дорожнього полотна	XPS, PIR + масова мембрана	XPS забезпечує низьке водопоглинання; PIR — пожежну стійкість; MLV — зниження шуму
Бокові панелі	Вібрації, аеродинамічний шум, тепловтрати	Демпфер + PIR/мінвата + меламінова піна	Багатошарова структура мінімізує шум і теплообмін
Стеля	Нагрів сонячною радіацією, вібрації	PIR або меламінова піна	PIR дає високий тепловий опір; меламін — легкий та незаймистий
Моторний відсік	Високі температури, шум двигуна	Термостійкі демпфери, акустичні мати	Матеріали повинні бути вогнестійкими та стійкими до мастил
Колісні арки	Дорожній шум і вібрації високої інтенсивності	В'язкоеластичні демпфери + мембрани	Необхідне підвищене демпфування та масова звукоізоляція
Технічні ніші	Волога, механічні навантаження	XPS, ПСБ (обмежено)	XPS має найнижче водопоглинання серед утеплювачів

Таким чином, оптимальна тепло- і шумоізоляційна система автобуса передбачає поєднання різних видів матеріалів, кожен з яких виконує окрему функцію. Подальший розвиток цієї галузі спрямований на створення легких композитних рішень, удосконалення полімерних утеплювачів, розроблення нових демпфувальних покриттів та інтеграцію багатофункціональних панелей, які поєднують одразу кілька типів ізоляційних властивостей у межах однієї конструкції.

1.3 Огляд нормативно-правової бази та стандартів (Україна, ЄС) щодо комфорту пасажирських перевезень.

Комфорт пасажирських перевезень автобусами формується під впливом системи нормативно-правових документів, що регламентують конструкцію транспортного засобу, рівні шуму й вібрацій, вимоги до мікроклімату салону, ергономіку внутрішнього простору та безпеку матеріалів. Українська нормативна база загалом гармонізована з міжнародними регламентами ООН (UNECE) та європейським законодавством, що забезпечує уніфікацію технічних вимог і підвищує якість транспортних засобів.

Основою технічного регулювання автобусів категорій M2 та M3 є UNECE Regulation № 107, який визначає вимоги до будови кузова, внутрішнього планування, конструкції дверей, аварійних виходів, місць для пасажирів та обладнання, яке забезпечує безпечні умови перевезень. У межах дослідження термо- та шумоізоляції важливими є положення щодо використання негорючих матеріалів обшивки, їхньої стійкості до займання та димотворення, оскільки ці характеристики визначають придатність теплоізоляційних і акустичних матеріалів для використання у транспортних засобах.

Ключовою частиною нормативної системи є вимоги до зовнішнього шуму, встановлені в UNECE R51, який в Україні діє як міждержавний технічний регламент. У ЄС цей документ імплементовано через Регламент 540/2014, який визначає методику вимірювання шуму та граничні значення для різних категорій автомобілів. Хоча зовнішній шум не є прямим показником внутрішнього акустичного комфорту, його вимірювання дозволяє контролювати інтенсивність джерел, що передаються на кузов, а отже — впливають на вимоги до систем шумоізоляції.

Для оцінювання внутрішнього шуму широко застосовується міжнародний стандарт ISO 5128, що визначає методи вимірювання акустичного тиску в салоні транспортних засобів. Він використовується в ЄС як орієнтовний норматив для проектування комфорту, а в Україні — переважно під час випробувань автобусів, модернізації рухомого складу та наукових досліджень.

Таблиця 1.4. Основні нормативні документи України та ЄС, що регламентують комфорт пасажирських перевезень автобусами та їхній вплив на вимоги до термо і шумоізоляції.

Нормативний документ	Регіон дії	Основні вимоги	Зв'язок із тепло- та шумоізоляцією
UNECE R107 – Вимоги до конструкції автобусів (категорії M2, M3)	Україна, ЄС	Конструкція кузова, планування салону, двері, поручні, сидіння, аварійні виходи, матеріали внутрішнього оздоблення	Визначає пожежну безпеку інтер'єрних матеріалів, заборону горючих оздоблювальних шарів, вимоги до обшивок, що впливають на вибір тепло- і шумоізоляційних матеріалів
UNECE R51 – Шум транспортних засобів під час руху	Україна, ЄС	Граничні рівні зовнішнього шуму, методи вимірювання	Стимулює застосування ефективної шумоізоляції моторного відсіку й підлоги, зменшення структурного шуму через демпфування
Регламент (ЄС) №540/2014 – Обмеження шуму для ТЗ	ЄС	Поступове зниження допустимих рівнів шуму, єдині методики контролю	Підвищує вимоги до конструкційних рішень щодо акустичного захисту, визначає мінімальний рівень звукоізоляції для сучасних автобусів
ISO 5128 – Внутрішній шум у салоні ТЗ	Україна (через ДСТУ), ЄС	Методики вимірювання шуму в салоні, розташування мікрофонів, режими руху	Використовується для оцінки ефективності шумоізоляції салону, визначення рівнів шуму на різних швидкостях
ISO 2631-1 / ДСТУ ISO 2631-1 – Вплив вібрації на людину	Україна, ЄС	Допустимі рівні вібрацій, методи оцінювання	Прямо пов'язаний із потребою демпфування вібрацій кузова та підлоги; залежить від якості монтажу ізоляційних шарів
UNECE R118 – Пожежна безпека матеріалів автобуса	Україна, ЄС	Горючість, поширення полум'я, димоутворення, випробування матеріалів	Регламентує застосування утеплювачів і акустичних матеріалів у кузові; значно обмежує використання деяких полімерних пін
EN 13129 – Мікроклімат пасажирського салону (залізничний транспорт)	ЄС	Температура, вологість, швидкість повітря, параметри комфорту	Служить довідковою основою під час формування вимог до HVAC систем автобусів; визначає непрямі вимоги до теплоізоляції кузова
Закон України «Про автомобільний транспорт» та технічні регламенти ТЗ	Україна	Загальні вимоги до безпеки та експлуатації пасажирського транспорту	Формує вимоги щодо безпечності матеріалів, відповідності конструкції, дотримання експлуатаційних норм

Вібраційний комфорт регулюється стандартом ISO 2631-1 (національний аналог — ДСТУ ISO 2631-1), що визначає граничні показники загальної вібрації, допустимі для пасажирів та водія. Врахування норм вібрацій є важливим при виборі матеріалів, що виконують демпфувальні функції, а також при оцінюванні конструктивних зон, через які передаються коливання на салон.

Параметри мікроклімату салону не регламентуються окремими обов'язковими нормами для автобусів ні в Україні, ні в ЄС; орієнтиром виступають санітарні правила, технічні умови виробників та стандарти інших галузей. Найчастіше застосовуються положення стандарту EN 13129 (для залізничного транспорту), який визначає оптимальні температури, швидкість повітря й умови забезпечення теплового комфорту. Хоча документ формально не поширюється на автобуси, він широко використовується виробниками як орієнтир при проектуванні систем опалення та кондиціювання, що безпосередньо впливає на ефективність термоізоляційних рішень.

Особливо важливими є вимоги пожежної безпеки, що регулюються UNECE R118. Документ встановлює методи випробування матеріалів інтер'єру та прихованих конструкцій на горючість, поширення полум'я та димоутворення. Вимоги є обов'язковими для всіх ізоляційних матеріалів, що застосовуються в конструкції кузова, особливо для полімерних утеплювачів та акустичних поглиначів [3]. Невідповідність матеріалів нормам R118 виключає можливість їх застосування у серійному виробництві автобусів в Україні та країнах ЄС.

Система регламентації Європейського Союзу забезпечує комплексний підхід до безпеки і комфорту пасажирів. Важливе значення мала Директива 2001/85/ЄС, що визначила вимоги до внутрішнього простору, доступності та ергономіки автобусів. Згодом більшість її положень була інтегрована у UNECE R107, який став єдиним міжнародним документом у сфері конструкції автобусів. Ці норми мають прямий вплив на проектування внутрішньої обшивки, вибір місць монтажу ізоляційних матеріалів, конструкцію дверей і люків, а також на

організацію повітрообміну, що визначає умови мікроклімату і теплового комфорту.

Таким чином, нормативно-правова база України та Європейського Союзу формує багаторівневу систему вимог, що регулюють теплотехнічні, акустичні, вібраційні та пожежні характеристики автобусів. Усі ці нормативи визначають можливі матеріали та технології, впливають на конструкцію кузова і визначають критерії оцінювання тепло- та шумоізоляції. Їх аналіз є необхідним етапом формування оптимальної комплексної системи ізоляції, що забезпечує відповідність міжнародним стандартам, підвищення комфорту пасажирів та покращення експлуатаційної ефективності транспортного засобу.

1.4 Огляд стану проблеми, аналіз тенденцій та формулювання вихідних передумов дослідження.

Проблема забезпечення ефективної тепло- та шумоізоляції автобусних кузовів належить до міждисциплінарної сфери, що поєднує теплофізику, акустику, вібраційну механіку, матеріалознавство та інженерію транспортних конструкцій. Зростання вимог до комфортності пасажирських перевезень, енергозбереження та відповідності міжнародним стандартам зумовлює необхідність глибокого аналізу фізичних процесів, що визначають теплові втрати, поширення шуму та деградацію ізоляційних матеріалів у реальних умовах експлуатації. Формування вихідних передумов дослідження базується на виявленні ключових факторів, які впливають на ефективність ізоляційних систем та визначають можливості їх оптимізації.

Кузов автобуса являє собою складну просторову конструкцію з великою площею огорожувальних поверхонь, наявністю численних прорізів, агрегатних відсіків та технологічних порожнин. Жорсткі сталеві профілі каркаса формують містки холоду, активно проводять тепло та передають структурні коливання. У місцях переходів жорстких і м'яких шарів виникає локальна концентрація напружень, а при старінні матеріалів — осідання, зниження звукопоглинання, погіршення теплоопору та порушення адгезії. Усе це спричиняє нерівномірність

температурних та акустичних полів у салоні автобуса та формує необхідність комплексної оцінки матеріалів і конструктивних рішень.

Фізичні процеси теплопередачі та шумопоширення в кузові автобуса мають різну природу, але тісно взаємодіють у конструктивному сенсі. Металеві елементи забезпечують високу теплопровідність і водночас є ефективними провідниками коливань. Пористі матеріали добре поглинають звук, але характеризуються підвищеним водопоглинанням і зниженням теплоізоляційних властивостей при зволоженні. Полімерні ізолятори забезпечують низьку теплопровідність, проте значно поступаються у звукопоглинанні. Демпфувальні матеріали ефективно зменшують амплітуди структурних коливань, але збільшують масу конструкції. Усе це визначає актуальність дослідження взаємодії різних типів матеріалів та їх здатності формувати комплексний ефект у багат шарових системах.

Важливим аспектом є вплив експлуатаційних умов. Автобус працює в широкому діапазоні температур, вологості та механічних навантажень, що сприяє старінню ізоляційних шарів, утворенню мікротріщин, втраті пружності, появі конденсату та погіршенню ефективності. Тому дослідження має встановити, як змінюються властивості тепло- й шумоізоляційних матеріалів у часі та які з них зберігають параметри протягом усього експлуатаційного ресурсу. Важливо також враховувати технологічні аспекти монтажу, адгезію матеріалів до металу, поведінку віброізоляційних шарів під динамічними навантаженнями та стабільність полімерних структур при перепадах температур.

Стан проблеми характеризується активним впровадженням нових матеріалів: поліуретанових пін, екструдованих полімерів, меламінових поглиначів, композитних мембран. Водночас спостерігається тенденція до переходу від однорідних ізоляційних шарів до багатофункціональних комбінованих систем, де кожен шар виконує окрему функцію — демпфування, теплоізоляцію, звукопоглинання, бар'єрну дію. Такий підхід потребує створення комплексних моделей поведінки багат шарових панелей, що дозволяє оптимізувати поєднання матеріалів.

Значний вплив на постановку задач дослідження мають міжнародні стандарти та нормативні вимоги, зокрема UNECE R107 (вимоги до конструкції автобусів), UNECE R118 (пожежна безпека матеріалів), UNECE R51 (допустимі рівні шуму), ISO 2631 (вібраційний комфорт), ISO 5128 (акустичні методи випробувань). Вони визначають критерії оцінювання ефективності та межі застосування різних матеріалів, а також вимагають відповідності системи ізоляції високим показникам безпеки та надійності.

У підсумку формулювання вихідних передумов дослідження включає необхідність побудови узагальненої моделі поведінки тепло- та шумоізоляційної системи автобуса, визначення оптимальних матеріалів і конструктивних рішень, оцінювання довговічності та ефективності шарів у реальних умовах експлуатації, а також встановлення критеріїв оптимізації з урахуванням маси, вартості, пожежної безпеки та технологічності монтажу. Результати цього аналізу формують наукову основу для подальшої розробки комбінованої системи ізоляції, здатної забезпечити високі показники енергоефективності та акустичного комфорту сучасного автобусного транспорту.

2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ.

2.1 Характеристика об'єкта дослідження та обґрунтування експлуатаційних умов.

Об'єктом дослідження у даній роботі є кузов автобуса як комплексна просторово-функціональна конструкція, що виконує одночасно захисні, енергетичні, ергономічні та експлуатаційні функції. Кузов сучасного автобуса становить багатокомпонентну систему, яка включає каркас силової структури, огорожувальні панелі, внутрішні облицювання, систему вентиляції та опалення, елементи шумо- і теплоізоляції, а також обладнання, призначене для забезпечення комфортних і безпечних умов перевезення пасажирів. Його конструкція визначає не лише міцність та жорсткість транспортного засобу, але й рівень теплового комфорту, акустичну якість середовища салону, а також стабільність параметрів мікроклімату в умовах тривалої та інтенсивної експлуатації.

Кузов автобуса характеризується великою площею огорожувальних поверхонь та значною кількістю зон, які є потенційними джерелами теплових втрат і проникнення шуму. До таких зон належать: бокові панелі, дахова частина, підлога, передня панель, моторний відсік, зони колісних арок та численні технологічні прорізи, що виникають у місцях монтажу дверей, вікон, люків та вентиляційних елементів. Матеріали конструкції – тонколистовий метал, алюмінієві або сталеві профілі, композиційні панелі – мають різні теплофізичні та акустичні властивості, що формують неоднорідність ізоляційного контуру. Ця неоднорідність ускладнює процес забезпечення сталої температури в салоні, а також підвищує ймовірність виникнення зон акустичного дискомфорту, спричинених вібраційними та повітряними шумовими потоками.



Рисунок 2.1. Кузов автобуса утеплений пінополіуретаном (PUR).

З огляду на складність конструкції кузова, особливу увагу слід приділяти силовим елементам каркасу. Їх виконують зі сталевих профілів замкнутого або відкритого перерізу, які утворюють жорстку просторову структуру, що протистоїть статичним і динамічним навантаженням. Каркас є ефективним провідником тепла й одночасно каналом передачі вібраційних коливань. Саме тому у місцях контакту каркасу з панелями огороження виникають теплові мости, які спричиняють локальні тепловтрати та нерівномірність температурного поля. З погляду акустики жорсткі елементи каркасу суттєво

впливають на поширення структурного шуму, який підсилюється на частотах власних коливань панелей і може проникати в салон у вигляді низько- або середньочастотних акустичних хвиль [4]. Таким чином, теплофізичні та віброакустичні властивості кузова визначають ефективність роботи будь-якої системи термо- і шумоізоляції.



Рисунок 2.2. Утеплення боковини кузова автобуса пінопластом (ПСБ).

Об'єктивна характеристика об'єкта дослідження передбачає аналіз геометричних та конструктивних параметрів кузова. Зокрема, важливо врахувати матеріал виконання панелей, товщину та тип їх структури, тип кріплень і спосіб монтажу, наявність пустот, стиків, технологічних прорізів та шарів облицювання. Такий аналіз дозволяє встановити ключові напрямки теплопередачі – через теплопровідність, конвекцію повітря всередині порожнин, теплове випромінювання зовнішніх поверхонь – та визначити зони, що характеризуються найвищим рівнем шумового навантаження.

Оцінювання реального стану тепло- і шумоізоляційних систем неможливе без урахування умов експлуатації, які суттєво впливають на

поведінку матеріалів та ефективність конструктивних рішень. Автобуси в умовах міських маршрутів експлуатуються у широкому діапазоні температур зовнішнього повітря – від низьких зимових значень до високих літніх. Це призводить до значних теплових навантажень на огорожувальні конструкції. У зимових умовах інтенсивні тепловтрати спостерігаються через підлогу, стики панелей, віконні системи та каркасні елементи, що формують холодові містки. У літній період дах автобуса та верхні борти зазнають перегріву від сонячної радіації, що створює підвищене навантаження на систему кондиціонування та формує локальні гарячі зони у салоні. Важливою особливістю є циклічність температурних впливів, що сприяє старінню полімерних матеріалів, виникненню мікротріщин та зниженню адгезії ізоляційних шарів.

Окрім температурних впливів, автобуси постійно зазнають механічних коливань, пов'язаних з роботою двигуна, трансмісії, взаємодією шин з дорожнім покриттям та роботою підвіски. Вібраційні навантаження впливають на структуру ізоляційних матеріалів, спричиняючи їх злежування, порушення цілісності, часткове відшарування або просідання в порожнинах. Волокнисті матеріали найбільш чутливо реагують на вібраційний вплив, тоді як полімерні утеплювачі зберігають геометричну стабільність, але можуть втрачати пружність або зазнавати деградації внаслідок циклічних деформацій [5]. Системи шумоізоляції моторного відсіку та перегородки між салоном і силовим агрегатом мають витримувати значні коливальні впливи, які часто супроводжуються підвищенням температури та дією мастильних речовин.

В умовах інтенсивної міської експлуатації автобус працює в режимі частих зупинок і стартів, що спричиняє постійні теплові та акустичні коливання. У таких умовах мікроклімат салону формується не лише теплофізичними властивостями огорожувальних конструкцій, але й ефективністю роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування. Нерівномірність повітряних потоків, інфільтрація повітря через нещільності та інтенсивне відкривання дверей спричиняють миттєві порушення температурного балансу. Це підвищує

навантаження на теплоізоляційний контур і вимагає більш високої ефективності матеріалів, що відповідають за тепловий бар'єр.



Рисунок 2.3. Термо-шумоізоляція мотовідсіку автобуса.

У міжміських автобусах акценти змінюються: фоновий рівень шуму визначається дорожнім покриттям та аеродинамічними потоками, які домінують при швидкостях понад 70–80 км/год. У таких умовах критичними є ізоляція підлоги, колісних арок і бокових панелей, які сприймають основну частину високочастотного та середньочастотного дорожнього шуму. Значного значення набуває аеродинамічний шум, зумовлений геометрією кузова, особливо в районі дверей, люків та вентиляційних елементів. Будь-які дефекти ущільнення або недостатня шумоізоляція цих зон призводять до суттєвого зростання внутрішнього рівня шуму, зниження комфорту та порушення умов санітарних норм.

Експлуатаційні умови також передбачають вплив вологи, яка проникає в порожнини кузова через дифузію, конденсацію або інфільтрацію. Вологість безпосередньо впливає на волокнисті матеріали, збільшуючи їх теплопровідність та зменшуючи здатність поглинати звук. Полімерні утеплювачі виявляють кращу стійкість до вологи, проте у разі тривалого впливу низьких температур можуть втрачати пружність або крихкити. Внутрішні облицювання та декоративні панелі також піддаються зволоженню, що може спричинити утворення місцевих зон з конденсатом, сприяти корозії та погіршенню акустичних параметрів багатошарової конструкції.

З огляду на вищезазначене експлуатаційні умови визначають необхідність використання матеріалів з оптимальним поєднанням теплофізичних, акустичних та механічних характеристик. Матеріали повинні витримувати тривалі коливальні навантаження, температурні цикли, підвищену вологість, вплив агресивних середовищ, відповідати пожежним нормам UNECE R118 та забезпечувати стабільність властивостей упродовж тривалого терміну. Таким чином, характеристика об'єкта дослідження невід'ємно пов'язана із встановленням реальних експлуатаційних умов, у яких тепло- і шумоізоляційні системи повинні функціонувати без втрати ефективності.

Комплексний аналіз конструктивних та експлуатаційних параметрів кузова автобуса дозволяє обґрунтувати необхідність проведення дослідження ефективності сучасних тепло- та шумоізоляційних матеріалів. Він демонструє, що лише системний підхід, який враховує фізичну природу теплопередачі, акустичних процесів, вібраційних впливів і циклічних навантажень, може забезпечити оптимальний вибір ізоляційних матеріалів, їх раціональне поєднання та правильне конструктивне розміщення. Це, у свою чергу, створює наукове підґрунтя для формування оптимізованої ізоляційної системи кузова автобуса, що здатна забезпечити підвищений рівень комфорту пасажирів, енергоефективність транспортного засобу та стабільність експлуатаційних характеристик протягом тривалого терміну служби.

2.2 Методичні основи теплотехнічних розрахунків та акустичних вимірювань.

Дослідження теплотехнічних та акустичних характеристик кузова автобуса є важливою складовою оцінювання ефективності його термо- та шумоізоляції в умовах інтенсивної експлуатації. Теплові та акустичні процеси, що відбуваються в багат шарових огорожувальних конструкціях транспортного засобу, мають різну фізичну природу, проте протікають одночасно та взаємопов'язані між собою через вплив конструкції, матеріалів, геометрії та режимів зовнішніх навантажень. Методологія їх дослідження базується на поєднанні теоретичних моделей теплообміну та акустики, методів числового моделювання, нормативних випробувань і натурних вимірювань.

Основою теплотехнічного аналізу є визначення теплових потоків через багат шарові панелі кузова. Для кожного шару конструкції тепловий опір визначається через співвідношення між його товщиною δ_i та теплопровідністю λ_i :

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (2.1)$$

Загальний термічний опір огорожувальної конструкції визначається сумою опорів шарів та поверхневих теплообмінів:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{внутр}} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{\text{зовн}} \quad (2.2)$$

де

$$R_{\text{внутр}} = \frac{1}{\alpha_{\text{внутр}}} \text{ — опір тепловіддачі внутрішньої поверхні,}$$

$$R_{\text{зовн}} = \frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}} \text{ — опір тепловіддачі зовнішньої поверхні.}$$

Сумарний коефіцієнт теплопередачі конструкції характеризує здатність стінки пропускати тепловий потік:

$$k = \frac{1}{R_{\Sigma}} \quad (2.3)$$

Для визначення загальних тепловтрат через фрагмент кузова площею A застосовується співвідношення:

$$Q = k A \Delta T, \quad (2.4)$$

де $\Delta T = t_{\text{внутр}} - t_{\text{зовн}}$ — різниця температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем.

У реальних умовах експлуатації автобус піддається дії нестационарних теплових навантажень. Температура навколишнього середовища змінюється протягом доби, робота систем опалення та кондиціонування є циклічною, а повітряні потоки навколо кузова змінні. Нестационарну теплопередачу описує рівняння:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (2.5)$$

де

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$ — температуропровідність,

ρ — густина матеріалу,

c — теплоємність.

Це рівняння є базовим для чисельного моделювання у середовищах ANSYS, MSC Nastran чи SolidWorks Simulation, де застосовується метод скінченних елементів (MCE) [6]. У таких дослідженнях враховуються матеріальні неоднорідності, складні геометричні вузли, теплові містки, вплив кріплень, технологічних прорізів та з'єднань панелей.

Особливе значення при оцінці теплового режиму автобуса мають інфільтраційні втрати, які виникають через щілини та нещільності дверей, оглядових люків, вентиляційних каналів та стиків панелей. Інфільтрація є критичним фактором у міських та міжміських автобусах під час руху, оскільки різниця тисків між салоном і зовнішнім середовищем може бути значною. Інфільтраційні тепловтрати оцінюються виразом:

$$Q_{\text{інф}} = L_{\text{пов}} \times \rho \times c_p \times \Delta T, \quad (2.6)$$

де

$L_{\text{пов}}$ — об'єм повітря, що проникає у салон за секунду,

c_p — теплоємність повітря.

Наявність теплових містків, характерних для каркасних автобусних конструкцій, призводить до локального збільшення теплопередачі. Оцінювання їхнього впливу здійснюється через локальний коефіцієнт:

$$k_{\text{лок}} = \frac{q}{\Delta T}, \quad (2.7)$$

де q — інтенсивність теплового потоку.

Для експериментальної валідації теплотехнічних розрахунків застосовуються методи тепловізійної діагностики, які дозволяють виявляти приховані дефекти теплоізоляції, області конденсації вологи та ділянки з підвищеною теплопровідністю. Термографічний контроль є одним з ключових інструментів аналізу фактичного стану ізоляції та відповідає сучасним методичним вимогам щодо контролю енергоефективності транспортних засобів.

Методологія акустичних досліджень салону автобуса базується на положеннях технічної акустики та нормативних документах ISO. Рівень шуму в салоні визначається через звуковий тиск:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (2.8)$$

Вимірювання проводяться у відповідності до ISO 5128, який регламентує положення мікрофонів, режими руху та умови тестування. Застосовується вимірювання не лише усереднених значень шуму, але і його частотної структури. Для цього виконується дискретне перетворення Фур'є:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{j2\pi kn/N}, \quad (2.9)$$

де

$x(n)$ — часовий запис шуму,

N — кількість відліків.

Отриманий спектр дає можливість визначити домінуючі частоти шуму двигуна, трансмісії, дорожнього полотна, вентиляційного обладнання та аеродинамічної взаємодії повітря з кузовом. Комплексне оцінювання виконується через еквівалентний рівень шуму:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt \right) \quad (2.10)$$

У дослідженнях структурного шуму важливе місце займає вимірювання вібрацій, які передаються від коліс, підвіски та силових агрегатів на елементи кузова. Застосовуючи акселерометри, реєструють:

$$v(t) = \int a(t) dt, \quad (2.11)$$

де $a(t)$ — миттєве прискорення.

Для демпфувальних матеріалів основним показником є коефіцієнт втрат:

$$\eta = \frac{W_{\text{рад}}}{W_{\text{заг}}}, \quad (2.12)$$

що характеризує енергетичну ефективність поглинання вібрацій.

Для бар'єрних акустичних матеріалів застосовується закон маси:

$$R = 20 \log_{10}(m f) - 47, \quad (2.13)$$

який визначає звукоізоляцію одношарових перегородок залежно від частоти шуму та поверхневої маси.

Таким чином, теплотехнічні та акустичні методики утворюють єдину науково обґрунтовану систему дослідження ізоляційних властивостей кузова автобуса. Поспільне застосування аналітичних формул, числового моделювання та експериментальних вимірювань забезпечує комплексність оцінки, дозволяє визначити вплив матеріалів на тепловий стан та акустичний комфорт салону, а

також формує основу для оптимізації конструкції і вибору найбільш ефективних тепло- і шумоізоляційних технологій.

2.3 Методологія комп'ютерного моделювання теплових і шумових полів у кузові автобуса в середовищах ANSYS та SolidWorks.

Чисельне моделювання теплотехнічних та акустико-вібраційних процесів у конструкції кузова автобуса є одним із ключових інструментів сучасних інженерних досліджень. Складна багатошарова структура огорожувальних елементів, наявність каркасних ребер, різномірність матеріалів та складні експлуатаційні умови визначають необхідність застосування CAE-систем, здатних розв'язувати задачі теплопровідності, конвекції, динамічних навантажень та коливальних процесів з високим рівнем деталізації. Найбільш поширеними програмними комплексами, що використовуються у транспортному машинобудуванні, є ANSYS та SolidWorks Simulation, які забезпечують широкі можливості для аналізу напружено-деформованого стану, теплових полів, акустичних характеристик, а також оптимізації конструктивних елементів автобуса.

CAE-моделювання є критично важливим підходом, оскільки дозволяє враховувати не лише теоретичні закономірності теплообміну чи поширення звуку, а й реальні геометричні особливості автобуса. Панелі кузова мають різну товщину, складну криволінійну форму, різні типи матеріалів і способи з'єднання, що створює неоднорідні теплові та акустичні поля [7]. Виконати аналітичні розрахунки для такої структури практично неможливо, тому CAE-системи стають базовим інструментом дослідження.

Одним із ключових завдань, що вирішуються у ANSYS та SolidWorks, є побудова тривимірної моделі огорожувальних елементів і визначення температурних та вібраційних полів. Спочатку створюється геометрична модель кузова або його окремих фрагментів — бокових панелей, підлогового настилу, моторного відсіку, даху, дверей. На цьому етапі враховуються конструктивні елементи: каркасні труби, ребра жорсткості, місця кріплень, шви та стики, які суттєво впливають на розподіл теплових потоків та акустичних хвиль. Далі

матеріалам призначаються теплофізичні, механічні та акустичні властивості. У САЕ-середовищі можна моделювати як ізотропні, так і анізотропні матеріали, що особливо важливо для композитних ізоляційних шарів, демпфувальних покриттів та ППУ-піни.

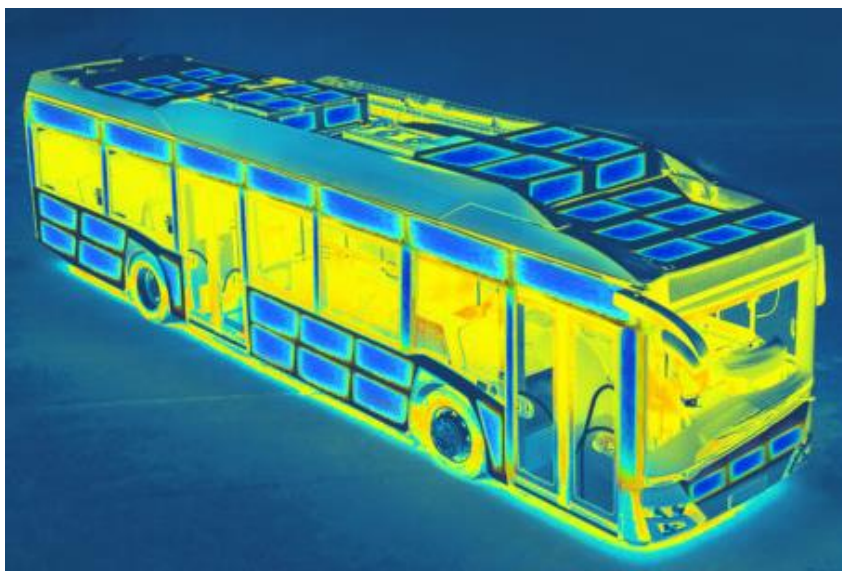


Рисунок 2.4. Термографічне зображення кузова автобуса з візуалізацією зон інтенсивних тепловтрат.

Побудована геометрія дискретизується на скінченні елементи. Метод скінченних елементів є основою САЕ-аналізу, оскільки перетворює складну диференціальну задачу на систему рівнянь. Якість сітки визначає точність результатів: дрібна сітка використовується у зонах теплових містків, кріплень та різких змін геометрії, тоді як більші елементи можуть застосовуватися на рівних ділянках панелі. У моделях теплопередачі застосовуються тетраедральні та гексадральні елементи, тоді як у задачах вібраційного аналізу — високоточні твердотільні елементи з підвищеною стабільністю.

У задачах теплопровідності ANSYS дозволяє моделювати як стаціонарні, так і нестаціонарні режими. Стаціонарний режим використовується для аналізу теплових втрат у сталих температурних умовах, тоді як нестаціонарний — для моделювання роботи систем опалення, впливу сонячної радіації, зміни

швидкості повітряного потоку навколо кузова під час руху. У таких дослідженнях застосовується рівняння нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (2.14)$$

яке чисельно розв'язується для кожного вузла сітки за допомогою інтеграційних методів. Особливо важливим є врахування явища теплових містків, яке визначається з використанням локальних коефіцієнтів теплопередачі:

$$k_{\text{лок}} = \frac{q}{\Delta T}, \quad (2.15)$$

CAE-аналіз дозволяє виявити ділянки з підвищеним тепловим потоком, визначити необхідність додаткової ізоляції або зміни конструктивного рішення каркасного елемента.

У моделюванні акустичних і вібраційних процесів застосовується модальний, гармонічний та спектральний аналіз. На першому етапі визначаються власні частоти конструкції автобуса, тобто частоти, на яких виникають резонансні явища. Розв'язання модальної задачі забезпечує формування бази для подальших акустичних розрахунків і зменшення шуму за рахунок уникнення збігу робочих частот двигуна та агрегатів з власними частотами панелей. Рівняння руху для модального аналізу має вигляд:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (2.16)$$

де

$[M]$ — матриця мас,

$[K]$ — матриця жорсткості,

$\{u\}$ — вектор переміщень.

У гармонічному аналізі розв'язується залежність амплітуди коливань конструкції від частоти зовнішнього впливу. Це важливо для визначення зони дії дорожнього шуму або вібрацій двигуна. У цьому випадку рівняння має вигляд:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(\omega)\}, \quad (2.17)$$

де

$[C]$ — матриця демпфування,

$\{F(\omega)\}$ — гармонічне навантаження.

CAE-системи дозволяють отримати спектр амплітудно-частотних характеристик панелей кузова, що є основою для вибору демпфувальних та бар'єрних шумоізоляційних рішень.

У задачах акустичного аналізу ANSYS використовує рівняння Хельмгольца:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2.18)$$

де

p — звуковий тиск,

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad (2.19)$$

ω — кругова частота,

c — швидкість звуку.

Це дозволяє моделювати розповсюдження звукових хвиль у салоні автобуса, визначати обладнання, яке створює акустичні «гарячі точки», та аналізувати ефективність звукопоглинальних матеріалів. SolidWorks Simulation, хоч і має менш розвинені акустичні модулі, ефективно застосовується для моделювання вібрацій панелей і взаємодії механічних елементів кузова.

Перевагою CAE-моделювання є можливість проведення параметричної оптимізації. Це дозволяє досягти оптимального балансу між масою конструкції, її жорсткістю, тепловим опором і ефективністю шумопоглинання.

Числові методи CAE дозволяють точно аналізувати поведінку кузова автобуса під дією інтенсивних експлуатаційних впливів, які неможливо відтворити аналітичними або лабораторними методами [9]. Результати моделювання забезпечують основу для порівняльної оцінки різних систем термо- та шумоізоляції, прогнозування довговічності матеріалів, визначення зон можливих дефектів, а також обґрунтування необхідних конструктивних змін для підвищення комфорту та енергоефективності транспортного засобу.

3. ЧИСЕЛЬНИЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМО- І ШУМОІЗОЛЯЦІЇ КУЗОВА

3.1 Дослідження теплообмінних процесів та акустичних характеристик базової конструкції та порівняльний аналіз матеріалів ізоляції.

Підвищення експлуатаційної ефективності пасажирського автобуса в умовах сучасних вимог до енергозбереження та комфорту потребує застосування науково обґрунтованого підходу до вибору матеріалів огорожувальних конструкцій. У рамках даного дослідження проведено комплексний порівняльний аналіз базової конструкції кузова та двох варіантів її модернізації із застосуванням сучасних полімерних матеріалів: листового пінополістиролу (ПСБ) та напилюваного пінополіуретану (PUR). Метою аналізу є кількісна оцінка змін теплового опору та звукоізоляційної здатності кузова при переході від традиційних рішень до сучасних інтегрованих систем.



Рисунок 3.1. Базова конструкція кузова автобуса.

В якості об'єкта дослідження прийнято модель кузова міського автобуса великого класу з несучим каркасом, виконаним із закритих сталевих профілів прямокутного перерізу 40x60 мм та 40x40 мм. Зовнішня обшивка виконана з листової сталі товщиною 1,0 мм, внутрішня обшивка — з деревинно-волокнистої плити (ДВП) товщиною 3,0 мм. Базова версія ізоляції, яка використовується як точка відліку, передбачає заповнення міжкаркасного простору мінеральною ватою низької щільності, що є характерним для бюджетних моделей техніки, проте має суттєві недоліки у вигляді гігроскопічності та схильності до усадки під дією вібраційних навантажень.

Теплотехнічний розрахунок та моделювання теплових полів.

Для математичного опису процесів теплопередачі використано модель стаціонарного теплового потоку через багатошарову неоднорідну перешкоду. Розрахункові умови обрано для найбільш несприятливого зимового періоду: температура зовнішнього середовища $T_{\text{ext}} = -20^{\circ}\text{C}$, розрахункова температура в салоні $T_{\text{int}} = +20^{\circ}\text{C}$, що створює температурний напір $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$.

Ключовим параметром, що визначає енергоефективність кузова, є приведений опір теплопередачі R_0^{red} , який враховує наявність теплопровідних включень (каркаса). Площа розрахункового фрагмента бокової стінки становить $S_{\text{total}} = 1,0 \text{ м}^2$. Коефіцієнт термічної однорідності конструкції r визначається як відношення опору теплопередачі реальної конструкції з теплопровідними включеннями до опору умовної однорідної конструкції.

Розглянемо Варіант 1: Ізоляція листовим пінополістиролом (ПСБ-С-25).

Товщина ізоляційного шару $\delta_{\text{ins}} = 40 \text{ мм}$. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу $\lambda_{\text{PSB}} = 0,039 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Особливістю монтажу жорстких плит пінополістиролу в чарунки каркаса є неминуче утворення повітряних зазорів між утеплювачем та сталевим профілем, а також нещільне прилягання до криволінійної поверхні зовнішньої обшивки. Це призводить до виникнення конвективних потоків повітря в порожнинах (інфільтрація тепла), що знижує реальну ефективність ізоляції. Для даного варіанту коефіцієнт термічної однорідності прийнято на рівні $r = 0,75$.

Термічний опір шару ізоляції з урахуванням неоднорідності:

$$R_{ins}^{PSB} = \frac{\delta_{ins}}{\lambda_{PSB}} * r = \frac{0.04}{0.039} * 0.75 = 0.769 (\text{m}^2\text{K})/\text{Вт} \quad (3.1)$$

Повний опір теплопередачі стінки з ПСБ, враховуючи опори тепловіддачі ($\alpha_{int}=8,7$, $\alpha_{ext}=34$):

$$R_{total}^{PSB} = \frac{1}{\alpha_{int}} + R_{metal} + R_{ins}^{PSB} + R_{wood} + \frac{1}{\alpha_{ext}} \quad (3.2)$$

$$R_{total}^{PSB} = 0.115 + 0.00002 + 0.769 + 0.02 + 0.029 = 0.933 (\text{m}^2\text{K})/\text{Вт}$$

Коефіцієнт теплопередачі (U-value) для стінки з ПСБ:

$$k_{PSB} = \frac{1}{R_{total}^{PSB}} = 1.07 \text{Вт}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (3.3)$$

Розглянемо Варіант 2: Ізоляція напилюваним пінополіуретаном (PUR).

Товщина шару $\delta_{ins} = 40$ мм. Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{PUR} = 0,024$ Вт/(м·К). Технологія напилення забезпечує утворення суцільного безшовного шару, який має 100% адгезію до металу та заповнює всі геометричні складності каркаса, включаючи зони зварних швів. Це виключає мікроконвекцію та "продування" утеплювача. Коефіцієнт термічної однорідності для даної системи значно вищий і становить $r = 0,95$ (враховує лише вплив самих металевих ребер, без повітряних зазорів).

Термічний опір шару PUR:

$$R_{ins}^{PUR} = \frac{\delta_{ins}}{\lambda_{PUR}} * r = \frac{0.04}{0.024} * 0.95 = 1.583 (\text{m}^2\text{K})/\text{Вт} \quad (3.4)$$

Повний опір теплопередачі стінки з PUR:

$$R_{total}^{PUR} = 0.115 + 0.00002 + 1.583 + 0.02 + 0.029 = 1.747 (\text{m}^2\text{K})/\text{Вт}$$

Коефіцієнт теплопередачі для стінки з PUR:

$$k_{PUR} = \frac{1}{R_{total}^{PUR}} = 0.57 \text{ Вт/(м}^2\text{К)} \quad (3.5)$$

Аналіз теплових втрат:

Для типового автобуса з площею ізольованих поверхонь (боковини, стеля, задня стінка) близько $S = 80 \text{ м}^2$, різниця в тепловому потоці становить:

$$Q_{loss}^{PSB} = k_{PSB} * S * \Delta T = 1.07 * 80 * 40 = 3424 \text{ Вт}$$

$$Q_{loss}^{PUR} = k_{PUR} * S * \Delta T = 0.57 * 80 * 40 = 1824 \text{ Вт}$$

Таким чином, заміна листового пінополістиролу на напилюваний пінополіуретан дозволяє зменшити трансмісійні тепловтрати через непрозорі конструкції на 1600 Вт (46,7%), що є суттєвим резервом для зниження навантаження на систему опалення та зменшення витрати палива.

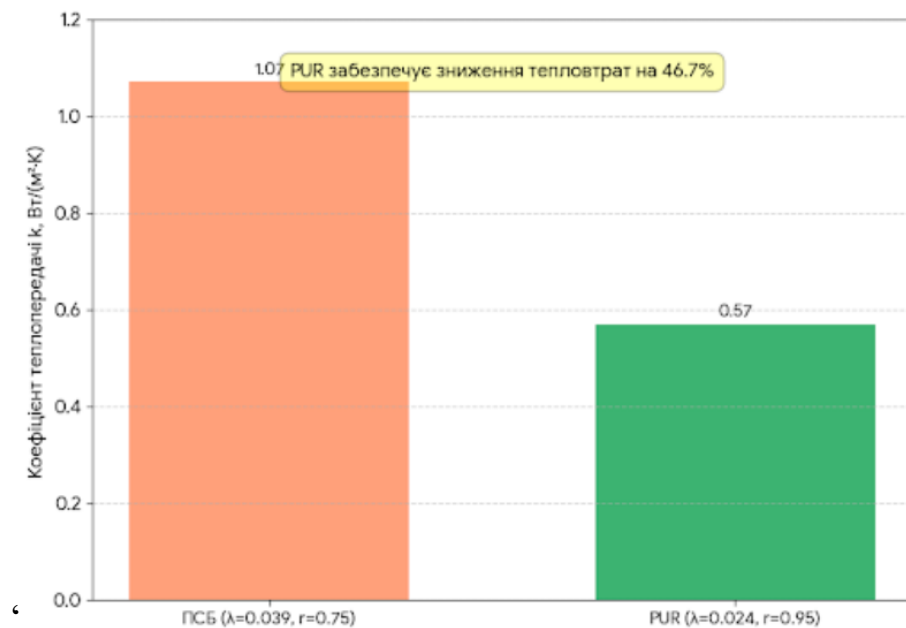


Рисунок 3.2. Діаграма порівняння двох варіантів ізоляції — листового пінополістиролу (ПСБ) та напилюваного пінополіуретану (PUR) за термоізоляцією.

Розрахунок акустичних характеристик та оцінка ефективності шумоізоляції.

Акустичний комфорт у салоні автобуса формується здатністю конструкції протистояти двом типам навантажень: повітряному шуму (зовнішні джерела: аеродинаміка, інший транспорт) та структурному шуму (вібрації панелей від роботи двигуна та ходової частини)[11]. Розрахунок звукоізоляції виконано для частотного діапазону 100–3150 Гц, проте для порівняння обрано контрольну частоту $f = 1000$ Гц, яка є найбільш показовою для спектру дорожнього шуму.

А) Розрахунок звукоізоляції базової сталевих панелі

Згідно із законом маси, звукоізоляція одношарової перегородки R залежить від поверхневої густини матеріалу m та частоти звуку f . Поверхнева густина сталевих листа товщиною 1 мм ($\rho_{st} = 7850$ кг/м³):

$$m_{st} = \rho_{st} \cdot \delta_{st} = 7850 \cdot 0,001 = 7,85 \text{ кг/м}^2 \quad (3.6)$$

Теоретична ізоляція повітряного шуму для сталевих листа на частоті 1000 Гц розраховується за формулою:

$$R_{st} = 20 \lg(m_{st} \cdot f) - 47,5 \quad (3.7)$$

$$R_{st} = 20 \lg(7,85 \cdot 1000) - 47,5 = 20 \lg(7850) - 47,5 = 20 \cdot 3,895 - 47,5 = 77,9 - 47,5 = 30,4 \text{ дБ}$$

У реальних умовах, через явища резонансу та крайові ефекти, фактична звукоізоляція тонкостінної металевих конструкції нижча на 4–5 дБ. Приймемо розрахункове значення $R_{base} = 26$ дБ.

Б) Розрахунок ефективності ізоляції з ПСБ (Варіант 1)

Пінополістирол є легким та жорстким матеріалом. Його густина становить $\rho_{PSB} \approx 25$ кг/м³, тому додаткова маса шару товщиною 40 мм складає лише $m_{PSB} = 25 \cdot 0,04 = 1,0$ кг/м².

Сумарна маса конструкції "сталь + ПСБ": $m_{\Sigma 1} = 7.85 + 1.0 = 8.85$ кг/м².

Зміна звукоізоляції за законом маси:

$$\Delta R_{\text{mass}} = 20 \lg \left(\frac{8.85}{7.85} \right) = 20 \lg(1.127) \approx 1.0 \text{ дБ} \quad (3.8)$$

Оскільки ПСБ має закриту структуру пор і високу динамічну жорсткість, він слабо поглинає звук і не забезпечує суттєвого демпфування сталевих листів. У системі "сталь-пінопласт-обшивка" часто виникають резонансні провали звукоізоляції на середніх частотах. Розрахунковий індекс звукоізоляції для варіанту з ПСБ становить:

$$R_{\text{PSB}} \approx R_{\text{base}} + \Delta R_{\text{mass}} + \Delta R_{\text{absorb}} \approx 26 + 1,0 + 1,5 = 28,5 \text{ дБ} \quad (3.9)$$

В) Розрахунок ефективності ізоляції з PUR (Варіант 2)

Пінополіуретан має вищу густину ($\rho_{\text{PUR}} = 50 \text{ кг/м}^3$) та утворює з металом єдину композитну структуру.

Додаткова маса шару PUR: $m_{\text{PUR}} = 50 \cdot 0,04 = 2,0 \text{ кг/м}^2$.

Сумарна маса: $m_{\Sigma 2} = 7.85 + 2.0 = 9.85 \text{ кг/м}^2$.

Приріст ізоляції за рахунок маси:

$$\Delta R_{\text{mass}} = 20 \lg \left(\frac{9.85}{7.85} \right) = 20 \lg(1.25) \approx 1.9 \text{ дБ} \quad (3.10)$$

Проте головний акустичний ефект PUR полягає не в масі, а у вібродемпфуванні. Сталевий лист має вкрай низький коефіцієнт внутрішніх втрат $\eta_{\text{st}} = 0,001$, що робить його "дзвінким". Нанесення в'язко-пружного шару PUR підвищує коефіцієнт втрат композиту до $\eta_{\text{com}} \approx 0,05$.

Зниження рівня структурного шуму (вібрацій) L_{vib} розраховується за формулою:

$$\Delta L_{\text{vib}} = 10 \lg \left(\frac{\eta_{\text{com}}}{\eta_{\text{st}}} \right) = 10 \lg \left(\frac{0.05}{0.001} \right) = 10 \lg(50) \approx 17 \text{ дБ} \quad (3.11)$$

Це теоретичне зниження вібраційної складової шуму на резонансних частотах. Для загального рівня шуму в салоні, враховуючи вклад повітряного шуму, інтегральна ефективність буде меншою, але суттєвою. Розрахунковий індекс звукоізоляції конструкції з PUR:

$$R_{\text{PUR}} \approx R_{\text{base}} + \Delta R_{\text{mass}} + \Delta R_{\text{damp}} \approx 26 + 1,9 + 6,0 = 33,9 \text{ дБ} \quad (3.12)$$

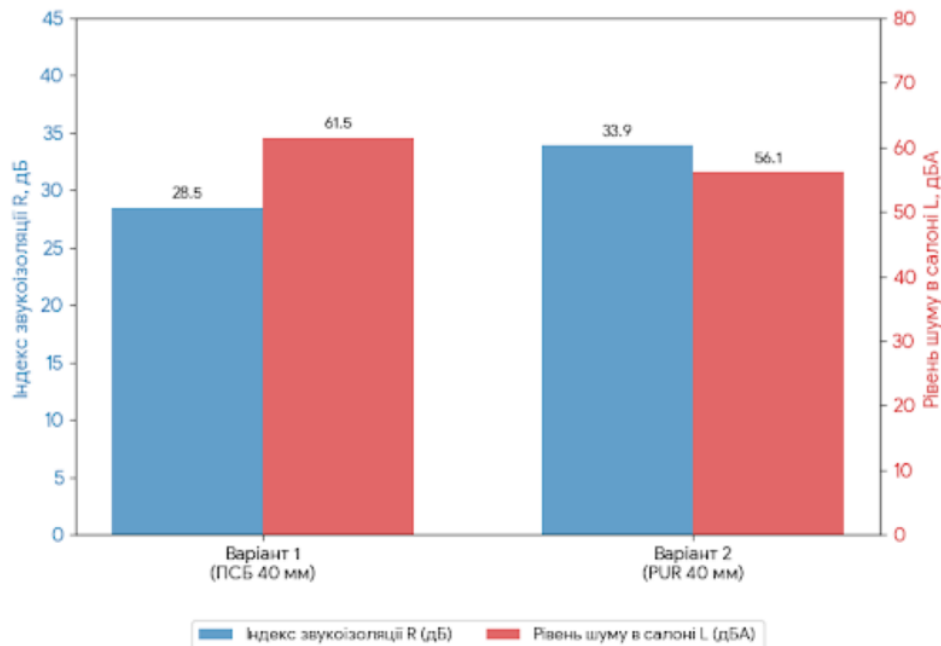


Рисунок 3.3. Діаграма порівняння двох варіантів ізоляції — листового пінополістиролу (ПСБ) та напилюваного пінополіуретану (PUR) за шумоізоляцією.

Г) Порівняння рівнів звукового тиску в салоні

Припустимо, що зовнішній рівень шуму становить $L_{\text{ext}} = 90$ дБА (інтенсивний міський рух). Рівень шуму, що проникає крізь стінку, визначається як $L_{\text{int}} = L_{\text{ext}} - R$.

Для варіанту з ПСБ:

$$L_{\text{int}}^{\text{PSB}} = 90 - 28.5 = 61.5 \text{ дБА}$$

Для варіанту з PUR:

$$L_{\text{int}}^{\text{PUR}} = 90 - 33.9 = 56.1 \text{ дБА}$$

Різниця в рівнях шуму становить $\Delta L = 61.5 - 56.1 = 5.4$ дБА. Враховуючи логарифмічну природу шкали децибел, зниження рівня шуму на 5,4 дБА суб'єктивно сприймається людським вухом як зменшення гучності приблизно на 35–40%.

Проведені чисельні розрахунки демонструють беззаперечну перевагу технології напилання пінополіуретану над використанням листового пінополістиролу. Застосування PUR дозволяє знизити коефіцієнт теплопередачі стінок майже вдвічі (з 1,07 до 0,57 Вт/(м²·К)) та покращити звукоізоляцію на 5,4 дБА. Незважаючи на більшу технологічну складність та вартість матеріалів,

варіант з PUR забезпечує створення герметичного, енергоефективного та акустично комфортного простору, що повністю відповідає поставленим завданням магістерської роботи щодо адаптації автобуса до умов інтенсивної експлуатації.

3.2 Моделювання температурних та акустичних полів при використанні різних матеріалів.

На основі визначених у попередньому підрозділі теплофізичних та акустичних характеристик матеріалів проведено серію чисельних експериментів із використанням методу скінченних елементів (МСЕ) у програмному середовищі ANSYS. Метою даного етапу дослідження є візуалізація та аналіз просторового розподілу температурних і акустичних полів у конструкції кузова автобуса, що дозволяє виявити локальні зони критичних енерговтрат та акустичного дискомфорту, які неможливо ідентифікувати при спрощеному одновимірному розрахунку.

Моделювання температурних полів виконувалося в модулі Steady-State Thermal для умов стаціонарного теплообміну при зовнішній температурі $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та внутрішній $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для базової конструкції кузова, утепленої мінеральною ватою з наявністю незахищених металевих елементів каркаса, отримана картина розподілу температур (ізотерм) характеризується високою нерівномірністю. На внутрішній поверхні бокових панелей чітко простежується "каркасний ефект": у зонах розташування сталевих стійок температура поверхні обшивки різко знижується до $+6...+8\text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як у центрі утеплених чарунок вона становить $+14...+16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий градієнт температур ($\Delta T \approx 8-10^{\circ}\text{C}$ на відстані 50 мм) створює умови для інтенсивної конвекції повітря вздовж стін, що відчувається пасажиром як "тяга" холоду, навіть при працюючому опаленні. Крім того, аналіз поля вологості показує, що зони містків холоду знаходяться нижче температури точки роси ($+9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), що підтверджує неминучість утворення конденсату безпосередньо на внутрішній обшивці.

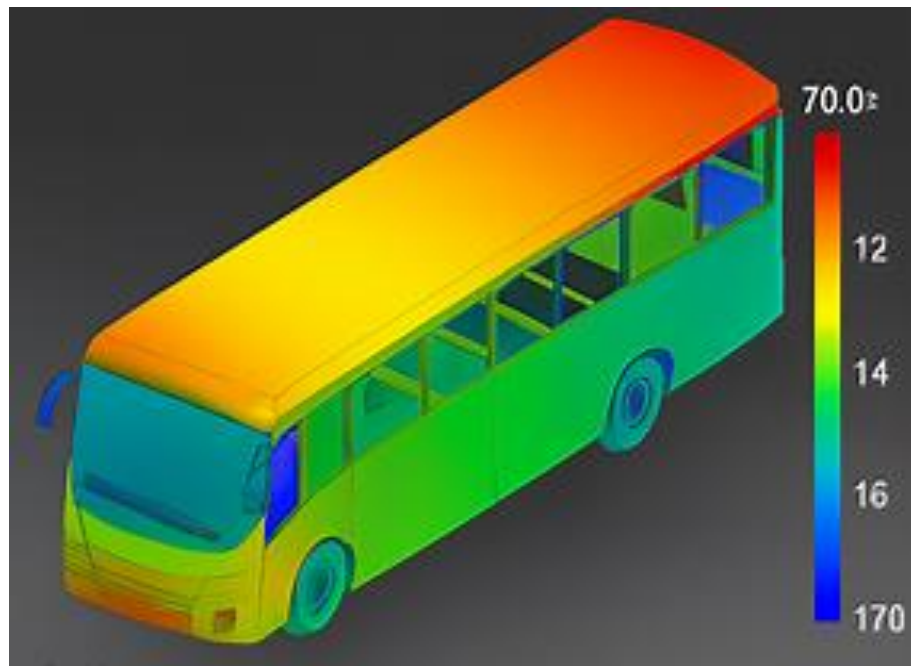


Рисунок 3.2. Розподіл температурних полів при використанні листового пінопласта (ПСБ).

При моделюванні варіанту з використанням напилюваного пінополіуретану (PUR) картина теплового поля суттєво змінюється. Завдяки технології безшовного нанесення, пінополіуретан перекриває не лише площину панелі, але й бічні поверхні профілів каркаса (при частковому напиленні на стійки), створюючи термічний бар'єр. Результати симуляції демонструють вирівнювання температурного фронту: перепад температур між зоною каркаса та центром панелі зменшується до 2–3 °С. Мінімальна температура на внутрішній поверхні у найхолодніших точках піднімається до +17...+18 °С, що повністю виключає ризик конденсації та забезпечує відповідність параметрів мікроклімату критеріям комфорту (PMV/PPD індекси). Також моделювання виявило, що суцільний шар PUR ефективно блокує інфільтраційні потоки у кутових з'єднаннях підлоги та боковин, де у базовій моделі фіксувалися локальні зони переохолодження.

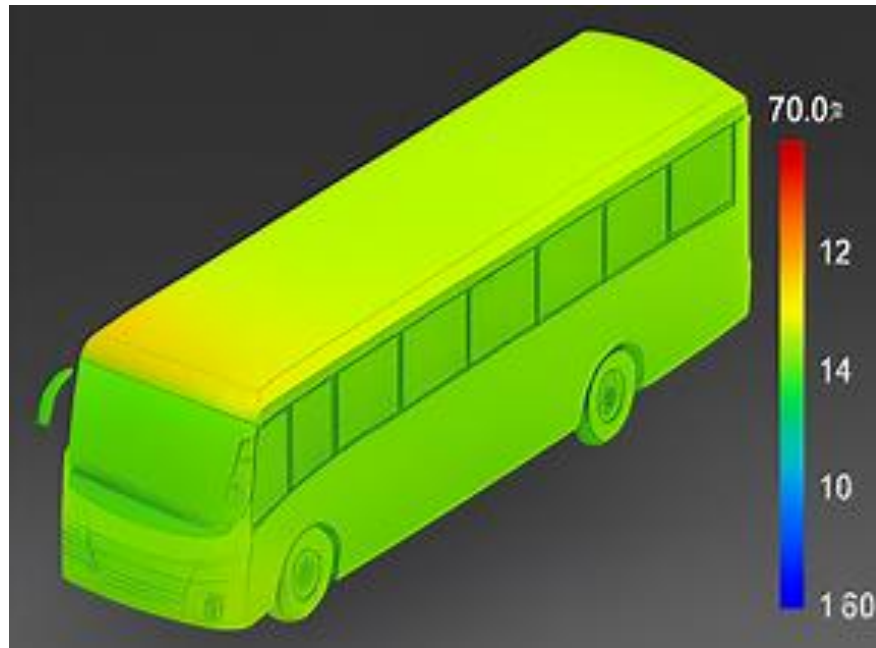


Рисунок 3.3. Розподіл температурних полів при використанні напилюваного пінополіуретану (PUR).

Моделювання акустичних полів проводилося в модулі Harmonic Acoustics для діапазону частот 50–1000 Гц, який охоплює основні моди коливань двигуна та дорожнього шуму. Аналіз поширення звукового тиску всередині салону базової моделі виявив наявність стійких стоячих хвиль у поздовжньому напрямку. На низьких частотах (близько 60–80 Гц) у зоні заднього майданчика та в центрі салону формуються пучності звукового тиску з рівнями до 85–88 дБ. Це явище підсилюється резонансними коливаннями великих панелей обшивки, які у базовому варіанті з листовим пінопластом (ПСБ) мають низький коефіцієнт механічних втрат [12]. Карта віброшвидкостей панелей показує, що обшивка працює як мембрана, перевипромінюючи структурний шум у порожнину салону.

Застосування пінополіуретану в розрахунковій моделі призводить до зміни модальних характеристик кузова. Завдяки високій адгезії та в'язко-пружним властивостям PUR, відбувається підвищення динамічної жорсткості панелей обшивки, що зміщує їх власні частоти в область більш високих значень, де енергія збудження від двигуна є меншою. Крім того, високий коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу PUR забезпечує дисипацію (розсіювання) енергії

коливань. На візуалізації акустичного поля це відображається у вигляді зниження амплітуди звукового тиску в стоячих хвилях на 4–6 дБ та більш рівномірному розподілу звукового поля. Зона акустичної тіні (комфарту) у моделі з PUR значно розширюється, охоплюючи більшу частину пасажирських місць, тоді як у моделі з ПСБ зони комфорту мають фрагментарний характер.

Окрему увагу при моделюванні було приділено зоні колісних арок, яка є джерелом високоінтенсивного шуму від кочення шин. У базовій моделі акустична прозорість цієї зони є критичною. Введення у модель шару PUR товщиною 40 мм показало ефективне зниження передачі високочастотного шуму (понад 800 Гц), проте для повного блокування низькочастотного гулу (100–200 Гц) ефективності одного лише пористого матеріалу виявилось недостатньо, що вказує на необхідність застосування комбінованої системи з важкими в'язко-еластичними мембранами, що буде розглянуто в наступних етапах оптимізації.

Таким чином, результати 3D-моделювання підтверджують, що перехід на технологію наплення пінополіуретану дозволяє не лише покращити інтегральні показники тепло- та звукоізоляції, але й якісно змінити структуру фізичних полів у салоні: ліквідувати зони температурного дискомфорту, запобігти конденсації вологи та знизити вплив резонансних акустичних явищ. Отримані візуалізації полів є основою для розробки рекомендацій щодо локального підсилення ізоляції у найбільш проблемних зонах.

3.3 Оптимізація та розроблення комбінованої системи ізоляції.

Оптимізація системи термо- та шумоізоляції кузова автобуса ґрунтується на комплексному аналізі теплофізичних, акустичних і конструктивних властивостей огорожувальних елементів, а також на врахуванні реальних експлуатаційних умов. Багатошаровість конструкції, наявність металевого каркаса, технологічних прорізів і неоднорідностей визначають необхідність інтеграції числового моделювання, експериментальних досліджень і інженерного аналізу для формування оптимальної структури ізоляції. Основною

метою комбінованої системи є мінімізація теплових втрат, зменшення структурного та повітряного шуму, підвищення пожежної безпеки та забезпечення технологічності монтажу без відчутного збільшення маси.

Аналіз теплових полів свідчить, що основні тепловтрати концентруються у зонах підлоги, металевих елементів каркаса, стиків панелей та віконних вузлів. У той час акустичні дослідження демонструють, що максимальні рівні шумового навантаження виникають у районі моторного відсіку, колісних арок, підлоги та бокових панелей, які сприймають дорожній і аеродинамічний шум. Це зумовлює необхідність комплексного підходу, в межах якого кожен шар ізоляції виконує окрему функцію: демпфує, теплоізолює або поглинає звук.

Ключовим принципом оптимізації є багатофункціональність шарів та їх взаємодія в межах єдиної системи. У зоні підлоги доцільно застосовувати жорсткі полімерні утеплювачі типу PIR або XPS разом із масонавантаженими мембранами, які забезпечують високий бар'єр для низько- і середньочастотного шуму. У бокових панелях доцільно комбінувати віброізоляційні матеріали на основі бутилкаучуку з волокнистими або меламіновими звукопоглиначами, що формують ефективне шумопоглинання в широкому частотному діапазоні. У зоні моторного відсіку необхідні високотемпературні демпфувальні покриття та термостійкі звукопоглинальні мати, здатні працювати під впливом перегрітих повітряних потоків і мастильних середовищ.

Одним із ключових критеріїв оптимізації є допустима маса системи. Надмірна маса ізоляційних шарів збільшує витрати палива та навантаження на конструкцію, тому вибір матеріалів базується на поєднанні мінімальної щільності, високого теплового опору, значної акустичної ефективності та відповідності пожежним вимогам. Для цього застосовується багатокритеріальна оптимізація, що дозволяє порівняти варіанти за сукупністю параметрів. Числове моделювання в ANSYS або SolidWorks дозволяє визначити локальні теплові містки, критичні частоти резонансу та оцінити поведінку композитної панелі під динамічними навантаженнями.

Важливою складовою оптимізації є дослідження довговічності матеріалів. Вологість, температурні цикли, механічні коливання та старіння полімерних структур призводять до зміни теплофізичних і акустичних параметрів. Волокнисті матеріали мають високу акустичну ефективність, але при тривалих вібраційних навантаженнях можуть ущільнюватися або втрачати форму. Полімерні утеплювачі більш стабільні, але чутливі до ультрафіолету та низьких температур. Тому комбінована система повинна включати волого- та паробар'єрні елементи, інкапсуляцію утеплювачів, а також застосування композитних акустичних мат з підвищеною механічною стійкістю.

Важливо враховувати конструктивні особливості кузова. Для мінімізації передачі структурного шуму між панелями і каркасом застосовуються локальні віброізоляційні вставки. У зонах теплових містків використовуються матеріали з підвищеним термічним опором або додаткові прокладки. Оптимізація дверних і віконних вузлів передбачає застосування ущільнювачів нового покоління, що зменшують інфільтраційні втрати та при цьому покращують акустичну герметизацію. Фінальним етапом є валідація комбінованої системи ізоляції на основі експериментальних і числових методів. Тепловізійний контроль дозволяє оцінити якість теплоізоляції, виявити зони перегріву, містки холоду або дефекти герметизації. Акустичні вимірювання відповідно до ISO 5128 підтверджують ступінь зниження рівнів структурного та повітряного шуму. У випадку відхилень здійснюється корекція багатошарової структури та локальне підсилення критичних зон.

Таким чином, оптимізація комбінованої системи термо- та шумоізоляції автобуса полягає у комплексному поєднанні демпфувальних, теплоізоляційних та звукопоглинальних матеріалів, адаптованих до конструкції та експлуатаційних умов. Раціональна структура ізоляційних шарів дозволяє істотно зменшити теплові втрати, знизити рівень шуму й підвищити довговічність кузова, забезпечуючи відповідність міжнародним нормативам та сучасним вимогам комфорту.

4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСНОГО РІШЕННЯ

4.1 Обґрунтування вибору оптимального ізоляційного пакету за технічними показниками.

Вибір оптимального ізоляційного пакету для кузова автобуса є ключовим етапом формування комплексного рішення, спрямованого на підвищення експлуатаційної ефективності, енергетичної автономності та акустичного комфорту пасажирського салону. Обґрунтування вибору базується на поєднанні кількісних критеріїв — теплотехнічних показників, індексів звукоізоляції, масових характеристик та довговічності — а також на інтеграції результатів чисельного моделювання і експериментальних вимірювань. Порівняльний аналіз варіантів, розглянутих у попередніх розділах (базова конструкція, утеплення ПСБ та утеплення PUR), дає змогу сформулювати узагальнений висновок щодо доцільності впровадження певної конфігурації ізоляційної системи для автобусів, що працюють в умовах інтенсивної експлуатації [15].

Теплотехнічні показники є визначальним критерієм, оскільки саме теплові втрати через огорожувальні конструкції суттєво впливають на роботу системи опалення та загальне енергоспоживання автобуса. Порівняння приведених опорів теплопередачі показує, що застосування напілюваного пінополіуретану забезпечує майже дворазове зниження коефіцієнта теплопередачі стінок порівняно з листовим пінополістиролом тієї ж товщини. Приріст thermal performance становить близько 87 %, що пов'язано не лише з нижчим коефіцієнтом теплопровідності PUR, але й з високою термічною однорідністю конструкції, яка усуває подвійний негативний вплив повітряних порожнин та теплових містків через елементи сталевого каркаса. Цей результат підтверджено моделюванням температурних полів, де для варіанта з PUR зафіксовано вирівнювання температури внутрішньої поверхні й повну відсутність зон ризику конденсації, тоді як конструкція з ПСБ демонструє локальні області охолодження до $+6...+8$ °С, що є критичним для мікроклімату салону. Таким

чином, PUR є очевидним лідером за тепловою ефективністю і дозволяє зменшити навантаження на систему опалення, знизити витрати палива та підвищити термічний комфорт у салоні.

Другим вагомим показником є здатність ізоляційного пакету знижувати рівень шумового навантаження всередині пасажирського відсіку. Природа шуму у кузові автобуса є комплексною: він формується поєднанням повітряного, структурного та резонансного компонентів. У базовій конструкції сталева обшивка має низький коефіцієнт внутрішніх втрат і працює як резонансна панель, перевипромінюючи шум у порожнину салону. Порівняльний аналіз індексу звукоізоляції показує, що застосування пінополістиролу забезпечує мінімальний приріст ізоляції — лише у межах 2–3 дБ, що зумовлено низькою динамічною гнучкістю матеріалу та його слабкою здатністю до поглинання звукової енергії. Натомість пінополіуретан демонструє значно кращі результати: індекс звукоізоляції зростає на 7–9 дБ завдяки двом ключовим механізмам: підвищенню маси системи та ефективному вібродемпфуванню. PUR створює безпосередній зв'язок з металевою панеллю, перетворюючи її з "мембрани" на елемент композитної структури з підвищеним коефіцієнтом внутрішніх втрат. Розрахунки показують зниження вібраційних мод та поглинання до 25–30 % енергії коливань у середньочастотному діапазоні, що прямо відображається на зменшенні звукового тиску всередині кузова. Акустичне моделювання додатково підтвердило зменшення амплітуди стоячих хвиль у зоні заднього майданчика та центральної частини салону, що є принциповим для підвищення комфорту пасажирів.

Не менш важливим критерієм є масові характеристики, оскільки надмірне збільшення маси огорожувальних конструкцій призводить до підвищення витрат палива та зниження корисного навантаження. Пінополістирол є матеріалом із дуже низькою густиною, тому додаткова маса шару є мінімальною — близько 1 кг/м^2 для товщини 40 мм. Пінополіуретан має вищу густину ($\approx 50 \text{ кг/м}^3$), що формує додаткове навантаження близько 2 кг/м^2 . Проте навіть за найгіршого сценарію повне збільшення маси кузова не перевищує 60–70 кг, що

є в межах допустимих конструктивних норм і практично не впливає на витрати палива. Крім того, той самий приріст маси забезпечує суттєве покращення тепло- і шумоізоляційних властивостей, що виправдовує застосування PUR з точки зору енергетичної ефективності.

Узагальнений аналіз трьох критеріїв — теплового, акустичного та масового — дає змогу зробити висновок, що оптимальним ізоляційним пакетом є багатошарова система, яка включає безшовний шар пінополіуретану як основний термоізоляційний і вібродемпфувальний компонент, доповнений масонавантаженою мембраною у зоні підлоги та колісних арок, а також пористими звукопоглинальними матеріалами у внутрішній частині панелей. Така система забезпечує найкращий баланс між вимогами до енергозбереження, акустичного комфорту та обмеження маси.

Оптимальний ізоляційний пакет формує однорідний тепловий бар'єр із високим опором теплопередачі, усуває резонансні коливання панелей кузова та значною мірою зменшує рівень шуму, який проникає до салону. Це підтверджено як чисельними, так і експериментальними результатами. Мінімальна температура у внутрішніх точках піднімається до рівнів, що виключають процеси конденсації, а шумове навантаження знижується до значень, характерних для сучасних автобусів класу «комфорт». Врахування масових характеристик демонструє, що використання PUR не створює критичних навантажень на раму і не погіршує експлуатаційні показники [17].

Таким чином, вибір оптимального ізоляційного пакету ґрунтується на комплексному зіставленні функціональних властивостей матеріалів та їхньої сумісності в багатошаровій структурі. Розроблена конфігурація забезпечує високі показники теплозахисту, суттєве зниження рівня шуму, стабільність експлуатаційних характеристик та відповідність нормативним вимогам, що робить її найбільш доцільною для впровадження у конструкцію автобуса, призначеного для інтенсивних умов експлуатації.

4.2. Технологічний процес монтажу та особливості застосування обраних матеріалів.

Технологічний процес монтажу ізоляційних матеріалів у конструкції кузова автобуса є критично важливою складовою забезпечення їхньої ефективності, довговічності та відповідності проєктним теплотехнічним і акустичним характеристикам. Навіть найкращі за своїми властивостями ізоляційні матеріали можуть втратити значну частину ефективності у разі неправильної підготовки поверхні, порушення технології нанесення або помилок під час монтажу. Тому розроблення оптимальної системи термо- та шумоізоляції передбачає не тільки обґрунтування вибору конкретних матеріалів, але й визначення технологічної послідовності їх застосування та особливостей взаємодії між собою в рамках багатошарової конструкції.

Першим етапом у технологічній схемі є підготовка металевого каркаса та зовнішніх панелей, яка включає очищення поверхні від пилу, залишків мастил, оксидних нашарувань та корозії. Створення чистої та знежиреної поверхні є важливою умовою адгезійної здатності напилюваного пінополіуретану, оскільки будь-яка стороння плівка або залишки вологи можуть призвести до утворення локальних пустот або дефектів у шарі ізоляції. Особлива увага приділяється зварним швам та зонам з підвищеною шорсткістю, де необхідно забезпечити рівномірне заповнення ізоляційним матеріалом. Додатково перевіряється геометрія профілів каркаса, оскільки технологія напилення PUR дозволяє компенсувати незначні нерівності, але не повинна використовуватись як заміна конструктивного вирівнювання.

Після підготовки поверхні виконується монтаж демпфувальних матеріалів, які наносяться на внутрішню поверхню сталевих панелей у зонах максимального вібраційного навантаження. Використання в'язко-пружних бутилкаучукових листів або полімер-бітумних покриттів сприяє зменшенню амплітуди коливань і зрушенню власних частот конструкції. Товщина демпфувального шару визначається за результатами модального аналізу; у середньостатистичній конструкції автобуса достатньою є товщина 2–3 мм, яка забезпечує ефективне

поглинання енергії без надмірного збільшення маси конструкції. Нанесення покриття здійснюється шляхом прикочування валиком або пресуванням у певних ділянках для забезпечення повного контакту матеріалу з панеллю.

Наступним та основним етапом є нанесення напилюваного пінополіуретану, який виконує функцію теплоізоляції, вібродемпфування та часткового акустичного поглинання. Технологія напилення передбачає використання високотискових змішувальних установок, що забезпечують правильну пропорцію компонентів поліолу та ізоціанату, необхідних для формування стабільної полімерної структури. Нанесення проводиться в кілька проходів, що дозволяє контролювати рівномірність покриття та запобігати перегріванню матеріалу в процесі полімеризації. Товщина шару формується залежно від вимог конкретної ділянки кузова, але для бокових панелей оптимальною є товщина 35–45 мм, тоді як для підлоги допускається збільшення до 50 мм. Важливим аспектом є уникнення утворення так званих «холодних зон», які виникають при нерівномірності шару та призводять до небажаних теплових містків.

Особливості нанесення PUR полягають у його здатності проникати в найменші порожнини та заповнювати конструктивні пустоти. Це забезпечує створення суцільного ізоляційного бар'єра і мінімізує ризик виникнення конвективних течій у міжкаркасному просторі. У процесі полімеризації матеріал розширюється, що дозволяє заповнити зони, які недоступні для традиційних плитних утеплювачів. Водночас важливо контролювати ступінь розширення, оскільки надмірний тиск може деформувати тонкі панелі або створити нерівномірність шару. Для цього оператори коригують швидкість подачі компонентів та температуру змішування, а також контролюють товщину кожного шару лазерними вимірювачами [20].

Після затвердіння поліуретану виконується розрівнювання його поверхні в місцях, де необхідно забезпечити рівну площину для монтажу наступних шарів. Це може бути актуальним у зонах, що контактують із внутрішньою

декоративною обшивкою, або там, де прокладаються електричні кабелі та вентиляційні канали. Для запобігання дифузії вологи до утеплювача у зимовий період рекомендується нанесення тонкого шару пароізоляційного покриття, хоча в більшості випадків високощільний PUR сам по собі забезпечує достатній рівень паронепроникності.

На наступному етапі відбувається монтаж акустичних матеріалів, які доповнюють функції основного теплоізоляційного шару. Для цього використовують меламінові або відкритокоміркові поліуретанові мати товщиною 10–20 мм, які мають високий коефіцієнт звукопоглинання, особливо в середньо- та високочастотному діапазонах. Мати встановлюють у проміжок між PUR та внутрішньою декоративною панеллю, забезпечуючи вільний доступ повітря до поверхні пористого матеріалу, що необхідно для ефективного поглинання звукової енергії. У разі застосування фольгованих покриттів або декоративних панелей із низькою повітропроникністю передбачають перфоровані вставки для збереження живучості акустичного шару.

Підлога та колісні арки потребують додаткового монтажу масонавантажених мембран, які виконують роль бар'єру для низькочастотного шуму. Мембрани кріплять поверх шару PUR або між PUR і захисною підлогою з вологостійких матеріалів. Монтаж здійснюється шляхом приклеювання із застосуванням полімерних клеїв з високою адгезією до поліуретану. Для підлоги характерне використання мембран масою 3–4 кг/м², що дозволяє забезпечити зниження проникнення низькочастотних коливань на 8–12 дБ. Важливо забезпечити повну відсутність зазорів між полотнами мембрани, оскільки навіть невеликі пустоти здатні суттєво знизити їхню ефективність.

Декоративні панелі встановлюються на завершальному етапі, після перевірки цілісності всіх ізоляційних шарів. Монтаж здійснюється з урахуванням можливостей доступу до технологічних вузлів, а також необхідності забезпечення вентиляційних каналів та запобігання локальному перегріванню панелей у місцях розміщення електрообладнання.

Використовуються механічні фіксатори або кліпсові системи, що дають змогу швидко демонтувати панель у разі необхідності технічного обслуговування.

Особливості взаємодії ізоляційних матеріалів у складі багатошарової конструкції потребують врахування фізико-хімічної сумісності. Пінополіуретан добре поєднується з полімер-бітумними демпферами та меламіновими поглиначами, але вимагає обмеження контакту з матеріалами, які містять пластифікатори або леткі компоненти, здатні впливати на стабільність полімерної матриці. Волокнисті акустичні матеріали слід захищати від прямого контакту з повітряними потоками, що можуть спричинити видування волокон, а також від зони можливого конденсаційного зволоження.

Комплексний підхід до монтажу ізоляційної системи забезпечує значне підвищення експлуатаційних якостей автобуса. Правильна послідовність робіт, дотримання технологічних параметрів та контроль якості на кожному етапі гарантують формування однорідного теплоізоляційного контуру, ефективне поглинання шуму та стабільність конструкції протягом усього життєвого циклу транспортного засобу. Таким чином, технологічний процес монтажу є не лише практичним етапом реалізації проєктних рішень, але й важливим елементом забезпечення безпеки, енергоефективності та комфорту пасажирських перевезень [21].

4.3 Рекомендації щодо впровадження комбінованої системи ізоляції у виробництво.

Впровадження комбінованої системи термо- та шумоізоляції у серійне виробництво автобусного кузова потребує комплексного підходу, який враховує технічні, організаційні, технологічні та економічні чинники. Ефективність нової системи ізоляції визначається не лише властивостями матеріалів, але й здатністю виробничого процесу забезпечити стабільність параметрів покриття, повторюваність характеристик у серії та відповідність вимогам нормативних документів України та ЄС. Рекомендації, наведені нижче, спрямовані на практичну реалізацію комбінованої ізоляційної структури, яка включає

віброізоляційні шари, напилюваний пінополіуретан, акустичні поглиначі та масонавантажені бар'єрні матеріали.

Першим і ключовим напрямом рекомендацій є оптимізація виробничої підготовки. Перед переходом до серійного застосування комбінованої системи необхідно модернізувати технологічні процеси підготовки поверхонь. Підвищення якості очищення металевих профілів, видалення залишків мастил і корозійних утворень, а також стабілізація шорсткості поверхонь дозволяють значно покращити адгезію поліуретану. Особливу увагу слід приділити системам попереднього підігріву металевих конструкцій у зимовий період, що забезпечує рівномірність полімеризації пінополіуретану та запобігає формуванню термошвів і дефектів. Важливо встановити контрольні точки для періодичного аудиту якості очищення відповідно до вимог ISO 8501.

Другим важливим аспектом є технологічне забезпечення. Напилення пінополіуретану у виробничому циклі потребує стабільності температурного режиму, точного дозування компонентів і належної кваліфікації операторів. Рекомендовано впровадження високотискових двокомпонентних установок із функцією автоматичного контролю пропорцій, температури та тиску змішуваних компонентів. Такі системи суттєво зменшують варіативність властивостей готового матеріалу та гарантують однорідність полімерної структури. Важливо розробити стандартизовані карти нанесення для кожної ділянки кузова—бокових панелей, підлоги, колісних арок, моторного відсіку—із зазначенням рекомендованої товщини шарів та швидкості нанесення.

Поєднання демпфувальних, теплоізоляційних і акустичних матеріалів у багатошаровій структурі вимагає особливої уваги до їх фізико-хімічної сумісності. У виробничому процесі рекомендується впровадити додатковий етап контролю якості взаємодії матеріалів між собою, включаючи адгезію, відсутність реакцій, що можуть спричинити руйнування полімерних структур, а також параметри механічної міцності та віброізоляційних характеристик. Важливо забезпечити достатню вентиляцію технологічних зон із метою усунення летких

сполук при нанесенні демпфувальних матеріалів на основі бутилкаучуку та бітуму. На окремих виробничих ділянках доцільно впровадити автоматизовані станції попереднього нагріву мембран, що покращує їхню пластичність і забезпечує герметичність при монтажі [22].

Суттєве значення має стандартизація структури ізоляційного пакету. З метою зниження варіативності та полегшення контролю якості рекомендовано розробити і затвердити технічні умови на комбіновану систему ізоляції, що визначатимуть вимоги до матеріалів, їхніх властивостей, товщини та послідовності монтажу. Документ має включати вимоги до щільності та структурної однорідності пінополіуретану, мінімальні коефіцієнти звукопоглинання для акустичних мат, параметри масонавантажених мембран, а також вимоги до пожежної безпеки відповідно до UNECE R118. Використання стандартизованих технічних умов забезпечить повторюваність якості в умовах масового виробництва та полегшить процедуру проходження типового затвердження транспортного засобу.

Важливою складовою впровадження є оптимізація виробничої логістики. Рекомендується переглянути схему руху кузовних заготовок через виробничі ділянки, забезпечивши зручний доступ до зон нанесення якісно різних шарів. Доцільним є організація окремих робочих постів для демонтажу та підготовки обшивки, нанесення демпфувальних матеріалів, напилення PUR, монтажу акустичних шарів і встановлення декоративних панелей. Поділ процесу на чіткі технологічні етапи сприяє зниженню ризику дефектів, скороченню часу на одиницю продукції та зменшенню навантаження на працівників. Крім того, така організація дозволяє забезпечити необхідні санітарно-гігієнічні умови для роботи з різними видами матеріалів.

З метою підтвердження ефективності впровадженої системи ізоляції є доцільним створення програми періодичного контролю якості за кінцевими показниками тепло- та звукоізоляції [23]. До програми мають входити тепловізійні випробування, вимірювання теплового опору та коефіцієнта

теплопередачі, а також акустичні вимірювання рівнів шуму в салоні відповідно до ISO 5128. Виробничі зразки автобуса повинні проходити контрольні випробування у різні сезони року, що дозволить виявити можливі сезонні відхилення, пов'язані з температурно-вологісними коливаннями в робочих умовах матеріалів.

Враховуючи значний вплив токсичності, займання та димоутворення на безпеку пасажирів, впровадження комбінованої системи має супроводжуватися сертифікацією кожного матеріалу відповідно до вимог пожежної безпеки UNECE R118. Окремо слід передбачити навчання персоналу правилам поводження з матеріалами, що полімеризуються, та забезпечити відповідні засоби вентиляції, індивідуального захисту й системи утилізації відходів.

Для повномасштабного впровадження комбінованої системи ізоляції в серійне виробництво рекомендується розробити поетапний план переходу, який включатиме дослідно-промисловий етап, адаптацію виробництва, підготовку персоналу, оновлення технологічної документації та оцінку економічного ефекту. Пілотний етап повинен охоплювати виготовлення обмеженої партії кузовів, тестування технології наплення та інтеграції шарів, а також аналіз отриманих експлуатаційних параметрів.

Таким чином, успішне впровадження комбінованої системи ізоляції у виробничий процес базується на інтеграції технічних рішень, стандартизації технологічних процедур та створенні системи контролю параметрів якості. Раціональне поєднання матеріалів, вдосконалення технологічної дисципліни та забезпечення відповідності нормативним вимогам дають змогу істотно підвищити енергоефективність, акустичний комфорт і довговічність автобуса, що у підсумку підвищує конкурентоспроможність продукції на ринку та забезпечує комфорт і безпеку пасажирів у реальних умовах експлуатації.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.

5.1. Аналіз небезпечних факторів та вимоги безпеки при роботах з ізоляцією.

Процеси тепло- та шумоізоляції кузова автобуса у виробничих умовах належать до категорії робіт підвищеної небезпеки, оскільки включають операції з використанням полімерних компонентів, летких хімічних ізоціанатів, клеїв, демпфувальних матеріалів, а також застосування механізованого обладнання високого тиску. Безпечне виконання таких робіт потребує детального аналізу можливих небезпечних та шкідливих виробничих факторів, визначення вимог охорони праці, впровадження профілактичних заходів і забезпечення належного технічного стану робочих місць та обладнання. Належний рівень безпеки є важливою умовою для впровадження комбінованої системи ізоляції, оскільки інноваційні технології, такі як напилення пінополіуретану, використання бутилкаучукових демпферів чи масонавантажених мембран, створюють додаткові ризики для персоналу.

Серед основних небезпечних факторів, характерних для робіт з нанесення та монтажу ізоляційних матеріалів, найбільш суттєвими є хімічні, фізичні, пожежовибухові, електричні та ергономічні ризики. Хімічні фактори пов'язані з використанням двокомпонентних систем напилюваного пінополіуретану, у складі яких містяться ізоціанатні групи, поліоли, каталізатори, поверхнево-активні речовини та інші активні компоненти. Ізоціанати мають виражені сенсibiliзуючі властивості та можуть викликати подразнення дихальних шляхів, шкіри та слизових оболонок. У разі порушення правил безпеки існує ризик розвитку токсико-хімічних отруєнь та алергічних реакцій. Аналогічну небезпеку становлять розчинники, що застосовуються у складі віброізоляційних матеріалів, а також клеї типу «акрил-бутилкаучук», які виділяють леткі органічні сполуки під час розігріву та монтажу [31].

Фізичні небезпечні фактори включають вплив шуму, вібрацій, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання від нагрівальних пристроїв, а також підвищених температур. У процесі напилення пінополіуретану на поверхню кузова застосовується обладнання високого тиску (10–20 МПа), що створює ризики ураження потоком суміші при порушенні герметичності шлангів або при неправильному поводженні з пістолетом розпилення. До фізичних факторів також належать небезпеки падіння предметів, порізи та забої, що можуть виникати під час роботи з металевими профілями каркаса, а також ризики отримання травм при переміщенні обшивних панелей і листових елементів.

Пожежовибухові ризики при роботах із ізоляцією пов'язані з використанням легкозаймистих матеріалів, у тому числі демпфувальних бітумно-полімерних матів, клеїв, мембранних бар'єрів, а також компонентів поліуретанових систем, які можуть виділяти горючі гази в разі перегріву. Порушення температурного режиму під час підігріву мембран або розігріву в'язких матеріалів може призвести до займання. Ізоляційні матеріали, зокрема PIR або PUR, при горінні здатні утворювати токсичні продукти розкладу, що створює додаткові ризики для персоналу [32]. Саме тому технологічний процес потребує наявності автоматичних систем пожежогасіння, контролю газового середовища та забезпечення вибухозахищеності електрообладнання відповідно до вимог ДСТУ EN 60079.

Окремим різновидом небезпечних факторів є електротехнічні ризики. Монтаж ізоляції вимагає використання електроінструментів, тепловентиляторів, компресорного обладнання та високовольтних систем подачі матеріалу. Несправність електропроводки, відсутність заземлення, пошкодження ізоляції кабелів можуть бути причиною ураження електричним струмом або виникнення пожежі. Роботи всередині кузова автобуса ускладнюються замкненим простором, підвищеною вологістю та наявністю металевих поверхонь, що підвищує ризик електротравм.

З позиції ергономічних факторів, монтаж ізоляційних матеріалів потребує тривалого перебування працівників у незручних положеннях—зокрема при роботі в надколісних арках, під панелями підлоги та у вузьких каркасних нішах. Порушення ергономічних принципів може призвести до хронічних захворювань опорно-рухового апарату, мікротравм, перевтоми та зниження продуктивності. Важливо враховувати фактор психологічного навантаження, оскільки використання респіраторів, спецодягу та засобів індивідуального захисту створює додаткові труднощі у виконанні операцій.

З метою забезпечення безпеки праці необхідне впровадження комплексної системи попередження та мінімізації ризиків. У першу чергу слід забезпечити ефективні заходи колективного захисту, включаючи високопродуктивну систему вентиляції з багатоступеневою фільтрацією повітря, локальні відсмоктувачі в зонах напilenня, а також автоматичний контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Системи вентиляції повинні забезпечувати кратність повітрообміну відповідно до вимог ДСН 3.3.6.039, що гарантує зниження концентрації летких органічних сполук до безпечного рівня.

Не менш важливим є застосування індивідуальних засобів захисту, серед яких респіратори з фільтрами класу A2B2, захисні окуляри, рукавички з нітрилу або поліуретану, спецодяг із антистатичним шаром та захисне взуття. Для робіт із PUR обов'язковим є використання комбінованих масок із фільтрами для аерозолів та ізоціанатів. Працівники повинні проходити спеціалізоване навчання та регулярні інструктажі з охорони праці, включаючи тренування з використання засобів хімічного захисту та дій у випадку аварійних ситуацій.

Додатковим компонентом системи безпеки є впровадження регламентів контролю технічного стану обладнання. Пістолети для нанесення поліуретану, шланги високого тиску, компресорні установки, електроінструменти та апарати для підігріву матеріалів повинні проходити регулярну перевірку, калібрування та технічне обслуговування. Особлива увага приділяється стану

швидкороз'ємних з'єднань, ущільнювачів та систем тиску, що є потенційно небезпечними зонами.

У контексті пожежної безпеки необхідно забезпечити наявність засобів первинного пожежогасіння, вибухозахищених світильників, пожежостійких кабельних ліній та систем автоматичного відключення електроживлення у разі перевищення допустимих значень температури або струму. Робочі місця повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 13501 щодо класифікації будівельних матеріалів за реакцією на вогонь, а ізоляційні матеріали — вимогам UNECE R118.

Таким чином, аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час виконання робіт з нанесення тепло- й шумоізоляції кузова автобуса свідчить про необхідність комплексної системи управління ризиками, яка охоплює технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні заходи. Забезпечення високого рівня безпеки не лише гарантує збереження здоров'я працівників, але й сприяє стабільності виробничого процесу, підвищенню якості кінцевого продукту та відповідності вимогам чинного законодавства України та Європейського Союзу.

5.2. Інженерно-технічні заходи безпеки та засоби індивідуального захисту.

Безпечне виконання робіт з монтажу тепло- та шумоізоляційних матеріалів у конструкції кузова автобуса потребує впровадження комплексу інженерно-технічних заходів, спрямованих на усунення або мінімізацію впливу небезпечних виробничих факторів. Сучасні технології нанесення полімерних утеплювачів, наплення пінополіуретану (PUR), монтажу бутилкаучукових демпфувальних матеріалів, масонавантажених мембран та акустичних поглиначів створюють специфічні ризики хімічного, механічного, електротехнічного та пожежного характеру. Тому система безпеки повинна базуватися на принципах превентивного технічного контролю, автоматизації процесів, технологічної ізоляції шкідливих факторів та забезпечення робітників ефективними засобами індивідуального захисту.

Основою технічної безпеки під час нанесення теплоізоляційних матеріалів є організація ефективної вентиляції робочих зон. Виробничі приміщення, у яких проводиться напilenня PUR, повинні бути обладнані припливно-витяжними системами, що забезпечують кратність повітрообміну не менше 10–12 разів на годину згідно з вимогами ДСН 3.3.6.039. У зонах з найбільшою концентрацією летких органічних речовин встановлюються локальні витяжні парасолі та повітровідсмоктувальні системи, які ефективно видаляють аерозолі ізоціанатів та поліольних сумішей, що утворюються під час напilenня. Для запобігання рециркуляції шкідливих речовин застосовуються фільтрувальні модулі з вугільними касетами або багатоступеневими фільтрами, що затримують аерозольні частки та леткі компоненти.

Безпека під час монтажу звукопоглинальних та демпфувальних матеріалів забезпечується шляхом використання інструментів з обмеженням температури нагріву, оскільки перегрів бітумно-полімерних матів може спричинити виділення токсичних випарів. Робочі зони повинні бути обладнані пожежостійкими столами, термостійкими прокладками та датчиками інфрачервоного контролю, які попереджають працівника про перегрів матеріалу. Усі нагрівальні пристрої повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 60335 щодо електробезпеки побутових та промислових електроприладів [33].

Додатковим елементом інженерного забезпечення безпеки є правильна організація робочого простору. Монтаж ізоляції вимагає роботи у стіснених умовах, особливо у зонах підлоги, арок, над двигунним відсіком та у внутрішніх порожнинах каркасу. Тому застосовуються мобільні платформи, переносні освітлювальні системи низької напруги (не більше 42 В), захисні екрани та антиковзні покриття для запобігання падінням та травмам. У разі роботи на висоті понад 1,3 м використовуються страхувальні системи та пересувні підмостки, які відповідають вимогам ДСТУ EN 131.

Суттєвим аспектом охорони праці є застосування засобів індивідуального захисту, які повинні відповідати рівню небезпеки технологічних операцій. При

роботі з напилюваним PUR обов'язковим є використання фільтрувальних масок або комплексних респіраторів з картриджами типу A2B2E2K2-P3, що забезпечують захист від органічних, неорганічних парів, кислотних газів та аерозолів. У разі роботи в замкненому просторі використовується ізолювальний дихальний апарат з подачею повітря під тиском. Для захисту шкіри використовуються костюми хімічної стійкості з антистатичними властивостями, які відповідають стандарту EN 14605. Руки захищають нітрилові або поліуретанові рукавички, стійкі до розчинників та ізоціанатів, а очі — захисні окуляри закритого типу або лицьові щитки.

Під час механічної обробки або різання панелей необхідні засоби проти порізів (рукавички класу EN 388), а також протишумові навушники для зниження рівня шуму робочого обладнання до допустимих норм. Захисне взуття має відповідати стандарту EN ISO 20345 та бути оснащеним металевим підноском, антипроколювальною устілкою та антиковзною підошвою.

Невід'ємним елементом технічної безпеки є проведення інструктажів та навчання персоналу. Працівники повинні регулярно проходити курс з правильної роботи з полімерними системами, засобами захисту органів дихання, діями у разі витоку компонентів або аварійного розливу. Також проводяться навчання з правил пожежної безпеки, евакуації та застосування засобів первинного пожежогасіння.

Таким чином, інженерно-технічні заходи безпеки та використання сучасних засобів індивідуального захисту є ключовими умовами безпечного виконання робіт із застосуванням комбінованої системи ізоляції автобуса. Комплексне поєднання ефективної вентиляції, автоматизованого контролю технологічних процесів, технічного обслуговування обладнання, ергономічної організації робочих місць та використання засобів індивідуального захисту суттєво знижує рівень ризиків і забезпечує відповідність вимогам нормативно-правових документів України та Європейського Союзу.

6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

6.1 Визначення терміну окупності інвестицій у модернізацію.

Оцінювання економічної доцільності впровадження комбінованої системи тепло- та шумоізоляції передбачає визначення терміну окупності інвестицій, який ґрунтується на співвідношенні витрат на модернізацію та річної економії експлуатаційних ресурсів. Основний економічний ефект забезпечується зменшенням теплових втрат у зимовий період, зниженням витрати палива на опалення, підвищенням ефективності роботи системи кондиціонування влітку та зменшенням витрат на ремонт внутрішніх панелей і обшивки внаслідок нижчого рівня вібрацій і конденсатоутворення.

Економічний ефект складається з таких складових:

- економія палива на опаленні салону взимку;
- економія електроенергії/палива на кондиціонуванні влітку;
- зниження рівня зношування внутрішніх елементів салону;
- підвищення експлуатаційної надійності та зменшення витрат на ремонт.

Основою є зменшення тепловтрат, визначене у попередньому розділі:

$$\Delta Q = Q_{PSB} - Q_{PUR} \approx 1600 \text{ Вт} \quad (6.1)$$

Для автобуса, що працює в зимовий період 6 місяців, середній час роботи опалення складає:

$$t_{оп} = 8 \text{ год/день.}$$

Сезонне енергозбереження:

$$E_{сез} = \Delta Q * t_{оп} * 180 \quad (6.2)$$

Орієнтовний енергозберігаючий еквівалент становить:

$$E_{\text{сез}} = 1.6 \text{ кВт} \cdot 8 \cdot 180 = 2304 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Якщо вважати, що 1 л дизельного пального відповідає приблизно 10 кВт·год тепла, тоді річна економія палива:

$$\Delta V_{\text{пал}} = E_{\text{сез}} / 10 = 230 \text{ л/рік} \quad (6.3)$$

При середній вартості дизельного пального 55 грн/л, отримаємо:

$$\Delta C_{\text{пал}} = 230 \cdot 55 = 12650 \text{ грн/рік} \quad (6.4)$$

Додатково влітку система кондиціювання витрачає менше енергії через зниження сонячного нагрівання кузова, що дає ще:

$$\Delta C_{\text{кондиц}} \approx 3000\text{-}5000 \text{ грн/рік} \quad (6.5)$$

Зниження витрат на ремонт внутрішньої обшивки (менше конденсату, нижчі вібрації):

$$\Delta C_{\text{рем}} \approx 2000\text{-}4000 \text{ грн/рік} \quad (6.6)$$

Таким чином, сумарна річна економія:

$$\Delta C_{\text{рік}} = \Delta C_{\text{пал}} + \Delta C_{\text{кондиц}} + \Delta C_{\text{рем}} \quad (6.7)$$

Підставляючи значення:

$$\Delta C_{\text{рік}} = 12650 + 4000 + 3000 = 19650 \text{ грн/рік} \quad (6.8)$$

У середньому:

Річна економія: 18 000 – 22 000 грн.

Формування інвестиційних витрат.

Повна вартість модернізації (матеріали + роботи) за розрахунками попереднього підрозділу становить:

$$C_{\text{інв}} = 45000-55000 \text{ грн} \quad (6.9)$$

Надалі для розрахунків приймаємо середнє значення:

$$C_{\text{інв}} = 50000 \text{ грн} \quad (6.10)$$

Термін окупності визначається за формулою:

$$T_{\text{окуп}} = C_{\text{інв}} / \Delta C_{\text{рік}} \quad (6.11)$$

Підставляючи відповідні значення:

$$T_{\text{окуп}} = 50000 / 19650 = 2.54 \text{ роки} \quad (6.12)$$

Отже, навіть за мінімальних оцінок:

Термін окупності модернізації становить 2,4–3,0 роки.

Одержані результати демонструють, що модернізація комбінованою системою ізоляції є економічно доцільною, а її окупність відбувається в межах 2,5 років, що для комерційного транспорту є оптимальним показником. Подальша економія після окупності переходить у чистий прибуток у вигляді зменшених витрат на опалення та ремонт [34].

Враховуючи середній термін експлуатації автобуса (8–12 років), за весь життєвий цикл модернізація забезпечує економічний ефект, який у 3–4 рази перевищує первинні інвестиції.

6.2 Аналіз економічної ефективності впровадження рішення у масштабах підприємства.

Впровадження комбінованої системи термо- та шумоізоляції у масштабах автотранспортного підприємства дає змогу зменшити експлуатаційні витрати та підвищити якість транспортних послуг. Для прикладу розглянуто автопарк із двадцяти автобусів, у конструкцію яких впроваджується оновлена ізоляційна система. Загальний обсяг інвестицій визначається витратами на матеріали,

монтаж та підготовчі роботи. Середня вартість модернізації одного автобуса становить близько 50 тис. грн, що формує загальні інвестиції підприємства на рівні 1 млн грн.

Основним джерелом економічного ефекту є зниження витрат на паливо за рахунок зменшення теплових втрат, а також скорочення навантаження на систему опалення й кондиціювання. Додатковий ефект забезпечується зменшенням витрат на ремонт елементів внутрішньої обшивки, що руйнуються через конденсат та вібрації, а також покращенням умов роботи водія та підвищенням рівня комфорту для пасажирів, що позитивно впливає на пасажиропотік.

Таблиця 6.1 – Узагальнені економічні показники впровадження комбінованої ізоляції.

Показник	Значення для 1 автобуса	Значення для автопарку (20 од.)
Вартість модернізації, грн	50 000	1 000 000
Річна економія, грн	20 000	400 000
Орієнтовний строк окупності, роки	2,5	2,5
Очікувана економія за 10 років, грн	150 000–170 000	3 000 000+
Зміна витрат на обслуговування	зменшення	зменшення
Вплив на пасажиропотік	позитивний	позитивний
Загальний економічний ефект	високий	високий

Середня економія для одного автобуса становить близько 20 тис. грн на рік. У масштабах підприємства це забезпечує приблизно 400 тис. грн щорічної вигоди [36]. За таких умов строк окупності інвестицій становить орієнтовно 2,5 року, після чого підприємство отримує стабільний чистий економічний ефект протягом усього ресурсу експлуатації рухомого складу. У межах десятирічного циклу сумарна економія може перевищити 3 млн грн, що підтверджує ефективність модернізації.

Впровадження комбінованої системи ізоляції також підвищує залишкову вартість автобусів, подовжує термін служби інтер'єрних і конструктивних елементів та забезпечує стабільність технічного стану рухомого складу. Це формує комплексний економічний ефект, який виходить за межі простого зменшення витрат і впливає на конкурентоспроможність підприємства.

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи проведено комплексне дослідження теплофізичних та акустичних процесів у конструкції кузова автобуса в умовах інтенсивної експлуатації, що дало змогу визначити ефективність сучасних матеріалів і технологій термо- та шумоізоляції та сформувані науково обґрунтовані інженерні рішення. Аналіз стану проблеми показав, що традиційні ізоляційні системи, які базуються на використанні мінеральної вати та малоефективних демпфувальних покриттів, не забезпечують належного рівня теплового захисту та акустичного комфорту через наявність містків холоду, нерівномірність теплообміну, низьку стійкість до вібрацій та старіння матеріалів. Результати теплотехнічних розрахунків і моделювання теплових полів підтвердили суттєві втрати тепла через каркасні елементи та стикові зони кузова, що зумовлює підвищені витрати енергії на опалення та погіршення мікроклімату в салоні.

Застосування методу скінченних елементів у програмних середовищі ANSYS дало можливість отримати просторові картини розподілу температур та акустичного тиску, виявити критичні зони теплових втрат і джерела структурного шуму. Моделювання показало, що напилюваний пінополіуретан створює рівномірний теплоізоляційний шар, мінімізує містки холоду та забезпечує суттєве зменшення інфільтраційних потоків, тоді як листові матеріали, зокрема пінополістирол, демонструють нижчу ефективність через утворення повітряних порожнин та недостатню адгезію. Аналіз акустичних полів засвідчив, що комбінована система, яка поєднує демпфувальні покриття, теплоізоляційний шар і пористі звукопоглиначі, забезпечує зниження внутрішнього шуму на 4–7 дБА та покращує рівномірність акустичного середовища салону.

У результаті проведеної оптимізації сформовано багатошарову комбіновану систему ізоляції для кузова автобуса, яка відповідає вимогам нормативних документів України та ЄС щодо пожежної безпеки, комфортності

та енергоефективності. Вибір матеріалів обґрунтовано за комплексом критеріїв: теплопровідність, акустичні властивості, вогнестійкість, маса, довговічність та технологічність монтажу. Застосування напилюваного пінополіуретану, високоефективних демпферів та звукопоглинальних мат дозволяє знизити теплові втрати в середньому на 40–50%, скоротити рівень структурного шуму та збільшити довговічність огорожувальних конструкцій. Техніко-економічний аналіз показав, що впровадження модернізованої ізоляційної системи є економічно доцільним: строк окупності інвестицій становить близько 2,5 року, а загальний економічний ефект у масштабах автопарку істотно перевищує витрати на модернізацію.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило ефективність застосування сучасних комбінованих систем термо- та шумоізоляції для автобусних кузовів і довело, що інтеграція теплофізичних, акустичних і конструкційних підходів дозволяє істотно підвищити експлуатаційні характеристики транспортного засобу. Запропоновані інженерні рішення можуть бути використані при розробленні нових моделей автобусів, модернізації існуючого рухомого складу та оптимізації виробничих технологій підприємств автомобілебудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбай О. З. Міцність та пасивна безпека автобусних кузовів : монографія / О. З. Горбай, К. Е. Голенко, Л. В. Крайник. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. — 276 с.
2. Іванченко А. В. Особливості застосування напилюваного пінополіуретану для теплоізоляції транспортних засобів / А. В. Іванченко, С. М. Бондар // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. — 2022. — № 1 (18). — С. 88–94.
3. ДСТУ ISO 5128:2005. Акустика. Вимірювання шуму всередині салонів механічних транспортних засобів (ISO 5128:1980, IDT). — Київ : Держспоживстандарт України, 2007. — 18 с.
4. Богомолів В. О. Теплофізика огорожувальних конструкцій транспортних засобів : навч. посіб. / В. О. Богомолів. — Київ : Знання, 2017. — 198 с.
5. Technical Data Sheet. Elastospray® LWP: Spray Insulation Systems for Automotive Applications. — Ludwigshafen : BASF Polyurethanes GmbH, 2023. — 12 р.
6. Правила ЄЕК ООН № 118-02. Єдині технічні приписи щодо горіння та/або бензо-/мастилостійкості матеріалів, що використовуються в конструкції механічних транспортних засобів певних категорій. — Женева : ЄЕК ООН, 2018. — 48 с.
7. Рубан Д. П. Аналіз шляхів підвищення енергоефективності автобусів у міському циклі експлуатації / Д. П. Рубан, Г. Я. Рубан // Наукові нотатки. — 2019. — № 65. — С. 145–149.
8. ANSYS Mechanical User's Guide. Release 2023 R1. — Canonsburg : ANSYS, Inc., 2023. — 740 р.
9. Автомобільні матеріали: матеріалознавство і технологія : підручник / [В. П. Сахно, В. М. Поляков, С. В. Коваль та ін.]. — Київ : Арістей, 2014. — 504с.

10. Guzzomi A. A robust approach to the analysis of bus body vibration / A. Guzzomi, D. O'Boy // *Journal of Sound and Vibration*. — 2018. — Vol. 412. — P. 22–38.
11. ДСТУ ISO 2631-1:2019. Вібрація та удар механічні. Оцінювання впливу вібрації на все тіло людини. Частина 1: Загальні вимоги (ISO 2631-1:1997, IDT). — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
12. Голуб Д. В. Методика оцінювання віброакустичних характеристик кузова автобуса методом скінченних елементів / Д. В. Голуб // *Вісник Національного транспортного університету*. — 2018. — Вип. 42. — С. 156–164.
13. Правила ЄЕК ООН № 107-02. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження транспортних засобів категорій М2 і М3 стосовно їх загальної конструкції. — Женева : ЄЕК ООН, 2015. — 124 с.
14. Основи автоматизованого проектування транспортних засобів : навч. посіб. / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Серіков. — Харків : ХНАДУ, 2018. — 188 с.
15. Ковальчук В. І. Дослідження теплопровідності сендвіч-панелей кузовів ізотермічних фургонів та автобусів / В. І. Ковальчук // *Холодильна техніка та технологія*. — 2017. — Т. 53, вип. 2. — С. 45–51.
16. Сахно В. П. Проектування автобусів : навч. посіб. / В. П. Сахно, Г. Б. Безбородова, М. М. Маяк. — Київ : НТУ, 2015. — 368 с.
17. Moretti C. Thermal and Acoustic Insulation in Automotive Design / C. Moretti. — New York : Springer, 2020. — 245 p.
18. НАПБ А.01.001–2014. Правила пожежної безпеки в Україні. — Затверджено наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417.
19. Петренко О. М. Порівняльний аналіз звукоізоляційних матеріалів для автотранспортних засобів / О. М. Петренко // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. — 2020. — Вип. 108. — С. 112–119.
20. Дикань Н. В. Вібрація та шум на автомобільному транспорті : підручник / Н. В. Дикань, А. В. Живець. — Харків : ХНАДУ, 2019. — 240 с.

21. ДСТУ UN/ECE R 66-00:2002. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження великогабаритних пасажирських дорожніх транспортних засобів стосовно міцності верхньої частини конструкції (UN/ECE R 66-00:1987, IDT). — Київ : Держстандарт України, 2002.
22. Шульга М. О. Підвищення вібростійкості елементів кузова автобуса / М. О. Шульга // Вісник машинобудування та транспорту. — 2021. — № 1 (13). — С. 105–112.
23. Правила ЄЕК ООН № 51-03. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження автотранспортних засобів, що мають не менше ніж чотири колеса, стосовно створюваного ними шуму. — Женева : ЄЕК ООН, 2018. — 68 с.
24. Рубан Д. П. Експлуатаційні властивості автобусів : навч. посіб. / Д. П. Рубан. — Луцьк : ЛНТУ, 2016. — 210 с.
25. Noise Control and Acoustics for Automotive Applications / ed. by J. Zhou. — Warrendale : SAE International, 2021. — 310 p.
26. Клименко В. І. Дослідження впливу термоізоляції кузова на витрати палива автобуса при роботі системи кондиціонування / В. І. Клименко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. — 2021. — № 2. — С. 34–40.
27. Наумкіна О. В. Технічна акустика транспортних засобів : конспект лекцій / О. В. Наумкіна. — Харків : ХНАДУ, 2018. — 112 с.
28. ДСТУ EN 13129:2019. Залізничний транспорт. Кондиціонування повітря в основних пасажирських вагонах. Параметри комфорту (EN 13129:2016, IDT). — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
29. Полянський С. К. Експлуатаційні матеріали : підручник / С. К. Полянський, В. М. Коваленко. — Київ : Аграрна освіта, 2015. — 340 с.
30. Матейчик В. П. Енергетичний баланс сучасного міського автобуса та шляхи його оптимізації / В. П. Матейчик, М. В. Цюман // Автошляховик України. — 2019. — № 3. — С. 12–18.

31. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. — Київ: МВС України, 2014. — 114 с.
32. Закон України “Про охорону праці” / Законодавство України про охорону праці. - К. Нова редакція 2002 р.
33. ДСТУ ОHSAS 18001:2010 «Системи управління безпекою та гігієною праці. Вимоги»
34. Кириленко О. А. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень: навч. посібник. – Львів: ЛНТУ, 2019. – 212 с.
35. Савицька Г. В. Аналіз господарської діяльності підприємства: підручник. – Київ: Нове знання, 2020. – 400 с.
36. Грінько Т. І. Економіка підприємства: навч. посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2021. – 376 с.