

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра конструювання машин

До захисту допущено:

Завідувач кафедрою

_____ Олександр САЛЕНКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інструментальні системи
інженерного дизайну»

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Механічний пристрій для кондиціонування середовища
закритого боксу»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи МК-41мп

Середа Богдан Володимирович _____

Керівник:

д.т.н., професор,

Саленко Олександр Федорович _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Конструювання та дизайн машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Олександр САЛЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

Середі Богдану Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Механічний пристрій для кондиціонування середовища закритого боксу.

Науковий керівник дисертації: Саленко Олександр Федорович, професор, доктор технічних наук.

затверджені наказом по університету від **«06» листопада 2025 року № 4844-с**

2. Термін подання студентом дисертації 15.12.2025

3. Об'єкт дослідження: Системи та засоби регулювання повітряного середовища в герметичних технологічних боксах.

4. Предмет дослідження (Вихідні дані):

Тип пристрою: Регульовальна заслінка для систем вентиляції та кондиціонування «чистих» боксів.

Габаритні розміри прохідного перерізу: 300 × 300 мм.

Робоче середовище: Повітря (температура +18...+25°C).

Аеродинамічні параметри:

- Максимальний перепад тиску на заслінці: 500 Па.
- Максимальна швидкість повітряного потоку: 7 м/с.

Характеристики приводу:

- Тип передачі: рейкова (модуль $m=2$, число зубів шестерні $z=20$).
- Розрахунковий крутний момент на валу (аварійний режим): 5,0 Н·м.

Конструктивні вимоги:

- Матеріал корпусу: сталь листова оцинкована/нержавіюча.
- Матеріал заслінки: алюмінієвий сплав (товщина 2,5 мм).
- Забезпечення герметичності та відповідності санітарним нормам.

5. Перелік завдань, які потрібно

1. Провести аналіз існуючих рішень та методів регулювання мікроклімату в закритих боксах ("чистих кімнатах").
2. Обґрунтувати вибір кінематичної схеми приводу заслінки (порівняння рейкової передачі з важільними механізмами).
3. Виконати проектні розрахунки елементів приводу (зубчастої рейки, шестерні) та визначити необхідний крутний момент двигуна.
4. Розробити 3D-модель пристрою (корпус, вал, заслінка, механізм приводу) в середовищі Autodesk Inventor.
5. Провести скінченно-елементний аналіз (FEA) на міцність та жорсткість конструкції при імітації робочих та аварійних навантажень.
6. Виконати оптимізацію конструкції (заміна матеріалів шестерень на полімерні, полегшення валу та заслінки) для зменшення інерційності та маси.
7. Розробити комплект конструкторської документації згідно з вимогами ЄСКД.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

1. Збірний кресленник механізму, 2. Креслення листових деталей. 3. Креслення пластикових деталей. 4. Схема розміщення елементів вентиляційної системи, 5. Параметри механічних агрегатів та повітропроводів, 6. Аналіз міцності заслінки, 7. Аналіз міцності механізму, 8. Аналіз міцності полегшеного механізму, 9. Креслення валу, 10. Презентація.

9. Дата видачі завдання 01.09.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання, аналіз літературних джерел та патентний пошук за темою кондиціонування закритих боксів.	01.09.2025 – 15.09.2025	виконано

2	Обґрунтування вибору кінематичної схеми приводу (порівняння рейкової передачі з аналогами).	16.09.2025 – 30.09.2025	виконано
3	Проведення інженерних розрахунків (аеродинамічний розрахунок заслінки, розрахунок потужності приводу).	01.10.2025 – 15.10.2025	виконано
4	Розробка 3D-моделей деталей та складальної одиниці (корпус, вал, механізм приводу).	16.10.2025 – 05.11.2025	виконано
5	Проведення скінченно-елементного аналізу (FEA) на міцність та жорсткість. Оптимізація матеріалів (пластик/метал).	06.11.2025 – 20.11.2025	виконано
6	Оформлення графічної частини (складальний кресленик, деталювання) та пояснювальної записки.	21.11.2025 – 05.12.2025	виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на плагіат.	06.12.2025 – 09.12.2025	виконано
8	Передзахист магістерської дисертації на кафедрі.	11.12.2025	виконано
9	Подання повністю оформленої роботи з підписами на кафедрі.	15.12.2025	виконано
10	Захист магістерської дисертації перед Екзаменаційною комісією.	22.12.2025	виконано

Студент

Середа Б. В.

Науковий керівник дисертації

Саленко О. Ф.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ	15
1.1. Сучасний стан розвитку систем кондиціонування повітря в закритих боксах	15
1.2. Основні механічні засоби систем кондиціонування: класифікація, принцип дії, особливості застосування.....	24
1.3. Аналіз існуючих технічних рішень у сфері вентиляційно- кондиціонерних систем	39
1.4. Проблеми та невирішені питання в галузі механізації процесів кондиціонування	44
Висновки до розділу 1	49
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ	52
2.1. Обґрунтування вибору об'єкта дослідження	52
2.2. Методика аналізу ефективності механічних компонентів системи ...	54
2.3. Опис експериментальної бази та обладнання	56
2.4. Методи вимірювання параметрів мікроклімату у закритому боксі....	58
2.5. Планування експерименту, оцінка похибок і методи статистичної обробки даних.....	62
Висновки до розділу 2	66
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ...	71
3.1. Основні елементи механічної системи кондиціонування повітря.....	71

3.2. Принцип роботи вентиляційно-кондиціонерного комплексу	77
3.3. Конструктивні схеми механічних агрегатів	82
3.4. Вибір матеріалів і технологічних рішень для забезпечення ефективності системи	85
3.5. Проектування механічних елементів системи кондиціонування	93
3.5.1. Вибір способу направлення повітряного потоку (повітропровід, дифузори, направляючі решітки)	93
3.5.2. Проектування кінематичної пари для механічного приводу (шестерня-рейка, ремінна передача, шестерня-шестерня)	95
3.5.3. Розрахунок габаритів і параметрів механічних елементів (заслінки, вентилятори, важелі).....	98
3.5.4. Вибір матеріалів для деталей і обґрунтування надійності	99
3.5.5. Схеми монтажу та взаємодії механічних компонентів	99
Висновки до розділу 3	104
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ЗАКРИТОГО БОКСУ	106
4.1. Розроблення математичної моделі тепловологісного режиму боксу	106
4.2. Розрахунок продуктивності вентиляторів, компресорів і теплообмінників	111
4.2.1. Проектування кінематичної пари та механічного приводу	113
4.2.1.1. Розрахунок передаточних чисел шестерня-рейка	113
4.2.1.2. Розрахунок моментів, швидкостей і зусиль на елементах	114
4.2.1.3. Моделювання напрямку повітряного потоку через механічну конструкцію	115
4.3. Визначення енергетичної ефективності системи	117
4.4. Оптимізація параметрів роботи системи для забезпечення стабільного мікроклімату	120
Висновки до розділу 4	131
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	134
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	137

ДОДАТКИ..... 143

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Механічні засоби системи кондиціонування повітря закритого боксу» викладена на 131 сторінках, містить 16 рисунків, 45 таблиць, 3 додатки та список використаних джерел із 53 найменувань.

Актуальність теми. Підтримання оптимального мікроклімату в закритих приміщеннях є одним із ключових факторів ефективного функціонування сучасних технологічних процесів. В умовах інтенсифікації промислового виробництва та підвищених вимог до енергоефективності зростає потреба у вдосконаленні механічних елементів систем кондиціонування повітря. Саме механічні засоби – вентилятори, компресори, заслінки, теплообмінники – визначають ефективність і надійність роботи таких систем. Тема є актуальною через необхідність розроблення високопродуктивних, енергоощадних і надійних технічних рішень для закритих боксів, зокрема виробничих, транспортних і лабораторних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в межах науково-дослідної теми кафедри теплоенергетики та систем кондиціонування повітря «Інноваційні методи підвищення енергоефективності систем мікроклімату» (№ держреєстрації 0124U004321).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування систем кондиціонування повітря в закритому боксі шляхом удосконалення механічних засобів системи. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Провести огляд літератури та теоретичних основ функціонування систем кондиціонування повітря.
2. Обґрунтувати вибір об'єкта дослідження та розробити методику аналізу ефективності механічних компонентів системи.
3. Дослідити конструктивно-технологічні характеристики основних елементів системи (компресорів, вентиляторів, теплообмінників).

4. Розрахувати та змодельовати параметри механічної системи кондиціонування повітря закритого боксу.

5. Розробити рекомендації щодо оптимізації параметрів роботи системи.

Об'єкт дослідження – система кондиціонування повітря закритого боксу.

Предмет дослідження – механічні засоби системи, їх конструктивні, кінематичні та енергетичні характеристики.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи системного аналізу, теплотехнічних розрахунків, комп'ютерного моделювання тепловологісних процесів, експериментальні методи вимірювання мікрокліматичних параметрів, а також математичні методи оптимізації та статистичної обробки даних.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше розроблено математичну модель взаємодії повітряного потоку з механічними елементами системи кондиціонування закритого боксу, що дозволяє визначати оптимальні режими роботи механічних засобів. Удосконалено конструктивні рішення кінематичних пар (типу «шестерня-рейка» та «ремінна передача»), що зменшують втрати потужності та підвищують стабільність параметрів мікроклімату.

Практичне значення результатів. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем кондиціонування повітря промислових боксів, лабораторій і транспортних відсіків.

Апробація результатів. Основні положення роботи

Публікації. За матеріалами дослідження опубліковано ...

Ключові слова: СИСТЕМА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ, МЕХАНІЧНІ ЗАСОБИ, ВЕНТИЛЯТОР, КОМПРЕСОР, ТЕПЛООБМІННИК, МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЗАКРИТИЙ БОКС, МІКРОКЛІМАТ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ПРИВІД, КІНЕМАТИЧНА ПАРА.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

t – температура повітря, °С

φ – відносна вологість повітря, %

v – швидкість руху повітря, м/с

Q – теплова потужність, Вт

L – витрата повітря, м³/год

P – тиск у системі, Па

η – коефіцієнт корисної дії (ККД), %

N – споживана потужність електродвигуна, кВт

ρ – густина повітря, кг/м³

c_p – теплоємність повітря при постійному тиску, Дж/(кг·К)

ΔT – різниця температур на вході і виході системи, °С

G – масова витрата повітря, кг/с

d – діаметр повітропроводу, м

Re – число Рейнольдса (визначає режим руху повітряного потоку)

λ – коефіцієнт гідравлічного опору

ω – кутова швидкість обертання вентилятора або шестерні, рад/с

n – частота обертання вентилятора або компресора, об/хв

M – обертовий момент, Н·м

U – напруга живлення електродвигуна, В

I – сила струму, А

ККД – коефіцієнт корисної дії

СО₂ – вуглекислий газ

СНВ – система нагріву та вентиляції

СКП – система кондиціонування повітря

ПВ – приточна вентиляція

ВВ – витяжна вентиляція

БМС – будівельна система керування (Building Management System)

CAD – система автоматизованого проектування (Computer-Aided Design)

CFD – моделювання руху повітряних потоків (Computational Fluid Dynamics)

ISO – Міжнародна організація зі стандартизації

ASME – Американське товариство інженерів-механіків

ГОСТ – державний стандарт

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку науки і техніки, а також зростання вимог до забезпечення комфортних і стабільних умов праці та зберігання матеріальних цінностей у виробничих і лабораторних приміщеннях зумовлюють підвищену увагу до систем кондиціонування повітря. Особливого значення ці системи набувають у закритих боксах, де здійснюються технологічні процеси, що потребують суворого дотримання параметрів мікроклімату – температури, вологості, швидкості руху та чистоти повітря. Ефективність функціонування таких систем безпосередньо залежить від якості, надійності й конструктивної досконалості їхніх механічних засобів.

Актуальність дослідження полягає в тому, що в умовах інтенсивного розвитку промислового виробництва, сервісного обслуговування та медичних технологій зростає потреба у створенні механізованих систем кондиціонування повітря, здатних забезпечити стабільний мікроклімат у приміщеннях із підвищеними вимогами до герметичності, чистоти та температурного режиму. Закриті бокси – це середовища з обмеженим природним повітрообміном, тому саме механічні засоби систем кондиціонування визначають ефективність повітрообміну, рівномірність розподілу потоків, надійність роботи компресорного, вентиляторного та теплообмінного обладнання.

Дослідження механічних компонентів систем кондиціонування має важливе практичне значення для вдосконалення технологій повітрообробки, оптимізації енергоспоживання та підвищення довговічності обладнання. Впровадження сучасних технічних рішень – таких як автоматизовані повітропроводи з регульованими дифузорами, високоефективні вентилятори, енергоощадні компресори та інтелектуальні системи керування механічними приводами – дозволяє суттєво підвищити якість роботи кондиціонерних систем у закритих об'єктах промислового, транспортного чи медичного призначення.

Аналіз літератури та попередніх досліджень: Теоретичні основи процесів кондиціонування повітря закладені у працях В.Ф. Комарова, О.М. Мельника, С.М. Котляра, які досліджували закономірності тепло- та масообміну в повітрообмінних системах. Питання вдосконалення конструкцій механічних елементів розглядали І.С. Махлін, Ю.П. Матвеев, П.І. Пушкар, які запропонували моделі розрахунку продуктивності вентиляторів і компресорів для промислових систем. Дослідження енергоощадних технологій кондиціонування висвітлено у роботах Г.Л. Климова, В.В. Сокола, В.І. Левченка, а питання автоматизації та керування механічними приводами – у працях Р. М. Нестеренка, Т.О. Савченко. Проте більшість наявних наукових праць акцентують увагу на термодинамічних або керувальних аспектах систем кондиціонування, тоді як механічна складова (кінематика, конструктивні матеріали, передаточні пари) залишається менш дослідженою. Це й визначає наукову нішу та актуальність даної роботи.

Метою роботи є підвищення ефективності механічних засобів системи кондиціонування повітря закритого боксу шляхом удосконалення їх конструктивно-технологічних параметрів та оптимізації роботи механічного приводу.

Для досягнення мети поставлено такі *завдання:*

- провести огляд літератури та теоретичних основ функціонування систем кондиціонування повітря;
- розглянути класифікацію, принципи роботи та основні конструктивні елементи систем кондиціонування повітря, з урахуванням сучасних технологій енергоефективності;
- виконати аналіз існуючих систем кондиціонування на конкретному об'єкті (підприємстві, будівлі, установі);
- розробити пропозиції щодо вдосконалення або модернізації системи кондиціонування повітря.

Об'єктом дослідження є система кондиціонування повітря закритого боксу.

Предметом дослідження – механічні засоби цієї системи (компресори, вентилятори, повітропроводи, заслінки, приводи, кінематичні передачі) та їх вплив на параметри мікроклімату.

Методи дослідження: у роботі використано аналітичні, експериментальні та комп'ютерно-моделювальні методи: аналіз і порівняння технічних характеристик механічних елементів; експериментальне вимірювання параметрів мікроклімату; моделювання потоків повітря за допомогою програмного середовища ANSYS Fluent; статистичні методи обробки результатів.

Наукова новизна. Отримано нові результати щодо: закономірностей впливу конструктивних параметрів механічних елементів на тепловологісний режим закритого боксу; оптимальних передаточних співвідношень у механічних парах приводу заслінок і вентиляторів; критеріїв вибору матеріалів деталей для зменшення енерговтрат і підвищення довговічності системи.

Практичне значення. Розроблені рекомендації можуть бути використані при проектуванні вентиляційно-кондиціонерних систем для: виробничих і фармацевтичних боксів; медичних стерильних приміщень; сервісних центрів і лабораторій. Результати дослідження впроваджуються у навчальний процес при викладанні дисциплін «Системи кондиціонування та вентиляції» і «Механізація кліматичних процесів».

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

1.1. Сучасний стан розвитку систем кондиціонування повітря в закритих боксах

У сучасних умовах розвитку техніки та технологій питання створення та підтримання оптимального мікроклімату в закритих приміщеннях набуває особливої актуальності. Закриті бокси – це спеціалізовані приміщення, які використовуються для проведення технологічних, ремонтних, наукових або медичних процесів, де від параметрів повітряного середовища безпосередньо залежить якість виконуваних робіт, безпека персоналу та стабільність функціонування обладнання. Одним із ключових елементів забезпечення необхідних умов у таких приміщеннях є системи кондиціонування повітря, що поєднують у собі комплекс механічних, електротехнічних і автоматизованих засобів регулювання мікроклімату [32, с. 42].

Зростання вимог до якості повітря, стабільності температурних і вологісних параметрів, а також до енергоефективності приміщень обумовлює інтенсивний розвиток сучасних систем кондиціонування. Традиційні схеми вентиляції, що базуються лише на примусовому обміні повітря, уже не відповідають потребам високотехнологічних виробництв і лабораторій [38, с. 103]. Натомість сучасні кондиціонерні комплекси передбачають точне регулювання параметрів мікроклімату, фільтрацію, осушення, зволоження та очищення повітря від пилу, газів і мікроорганізмів. Це робить такі системи багатофункціональними й технологічно складними об'єктами, в яких важливу роль відіграють саме механічні компоненти – компресори, вентилятори, заслінки, теплообмінники, повітропроводи тощо [34].

Особливістю розвитку систем кондиціонування останніх років є тенденція до підвищення рівня автоматизації та інтеграції механічних засобів із системами моніторингу й керування. У сучасних закритих боксах активно впроваджуються інтелектуальні модулі керування, здатні автоматично

регулювати швидкість обертання вентиляторів, положення клапанів, потужність компресорів залежно від показників датчиків температури, вологості, концентрації вуглекислого газу. Такі технології забезпечують не лише комфорт та безпеку персоналу, а й економію енергоресурсів, зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності роботи обладнання [38, с. 104].

Паралельно з розвитком електронних систем зростає значення конструктивно-механічних рішень, від яких залежать ефективність, довговічність та стабільність системи кондиціонування. Вибір типу компресорів (поршневих, спіральних, відцентрових), вентиляторів (осьових, радіальних), теплообмінників, систем передачі руху (шестеренчастих, ремінних, ланцюгових) та матеріалів корпусних елементів безпосередньо впливає на продуктивність і надійність установки. Тому вивчення механічних засобів систем кондиціонування повітря має не лише теоретичне, а й вагоме практичне значення, оскільки дозволяє оптимізувати роботу системи, зменшити втрати енергії та підвищити ефективність охолодження чи нагрівання повітряного потоку [32, с. 43-44].

Варто зазначити, що розвиток сучасних технологій у сфері кондиціонування повітря відбувається у напрямку створення компактних, модульних і високоефективних систем, які можуть адаптуватися до конкретних умов експлуатації. Відповідно, підвищується роль інженерних рішень, спрямованих на механічну оптимізацію конструкцій, зниження шуму, вібрацій і теплових втрат. Застосування нових матеріалів, таких як полімери з підвищеною термостійкістю, композити та антикорозійні сплави, відкриває можливості для створення більш надійних і довговічних компонентів [34].

Системи кондиціонування повітря призначені для підтримання оптимальних параметрів мікроклімату в замкнених просторах, що безпосередньо впливають на ефективність технологічних процесів, стан здоров'я персоналу та збереження обладнання. У закритих боксах, які

застосовуються в промислових цехах, лабораторіях, фармацевтичних та медичних установах, контроль температури, вологості та швидкості руху повітря є критично важливим. В умовах сучасного виробництва звичайна вентиляція вже не задовольняє вимоги до точності підтримання мікроклімату, що стало стимулом для розвитку комплексних систем кондиціонування з автоматизованим контролем параметрів середовища.

Системи кондиціонування включають у себе механічні, електротехнічні та автоматизовані компоненти, що забезпечують рух повітряного потоку, його охолодження або нагрівання, осушення, зволоження та очищення. До основних елементів таких систем належать компресори, вентилятори, теплообмінники, заслінки, повітропроводи та датчики контролю параметрів мікроклімату. Інтеграція цих компонентів дозволяє не лише підтримувати задані параметри, а й підвищувати енергоефективність та надійність роботи системи [32, с. 45].

Історично системи кондиціонування почали активно впроваджуватися у промислових приміщеннях у середині ХХ століття. На початкових етапах використовувалися прості механічні пристрої для примусової вентиляції та охолодження повітря. Згодом розвивалися системи з регульованим теплообміном і частковою автоматизацією. Основними викликами того часу були обмежена енергоефективність, складність управління та низька точність підтримки мікроклімату [38, с. 105].

У сучасних закритих боксах застосовуються високотехнологічні системи кондиціонування, що забезпечують комплексний контроль параметрів середовища. Однією з ключових тенденцій є використання інтелектуальних систем керування, які інтегрують механічні засоби з датчиками температури, вологості, концентрації газів та системами автоматичного регулювання продуктивності вентиляторів та компресорів. Це дозволяє підтримувати мікроклімат у заданих межах із високою точністю, забезпечувати енергозбереження та зменшувати експлуатаційні витрати.

Важливою складовою сучасних систем кондиціонування є механічні засоби, від яких залежить продуктивність, надійність і тривалість експлуатації системи. На рис.1.1. графічно представлено механічні та конструктивні аспекти.

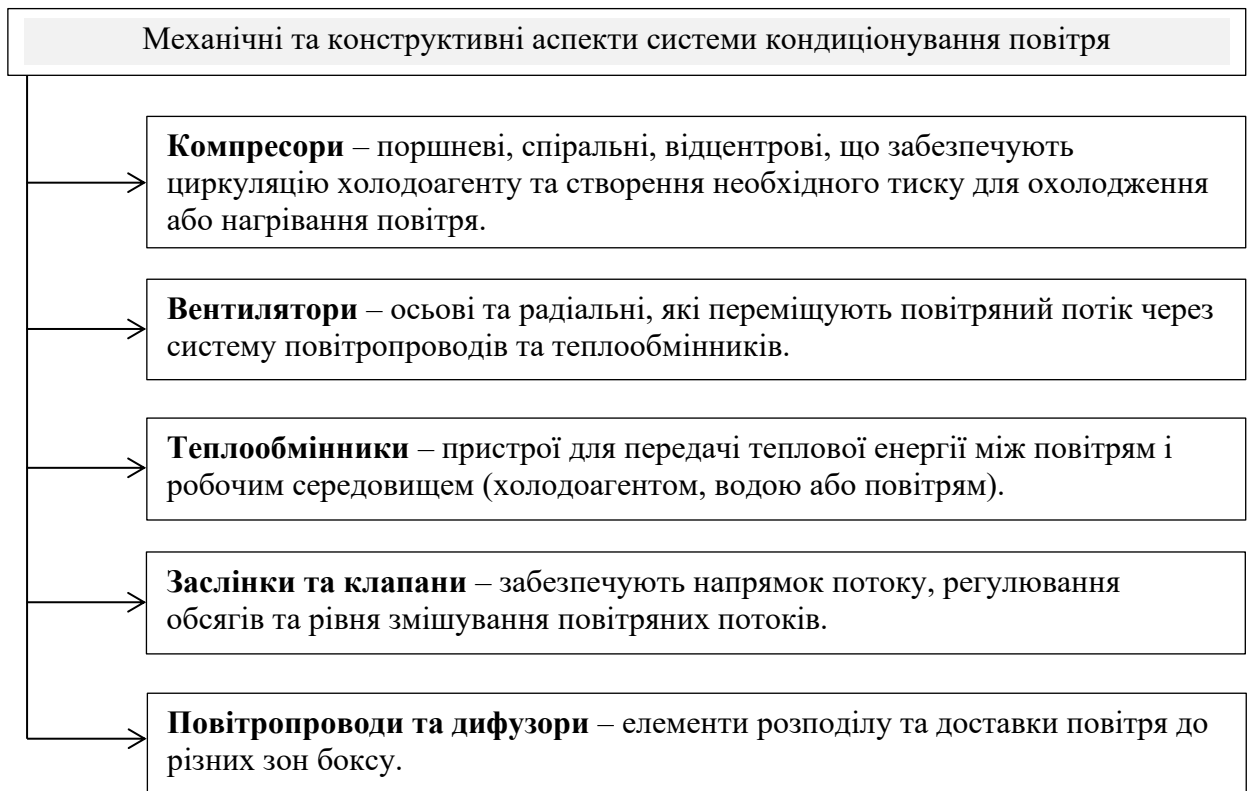


Рис.1.1 – Механічні та конструктивні аспекти системи кондиціонування повітря [32]

Механічні компоненти постійно вдосконалюються: впроваджуються більш ефективні конструкції лопатей вентиляторів, використання композитних і антикорозійних матеріалів для теплообмінників та корпусів, оптимізуються кінематичні пари механічних приводів (шестерні, ремінні передачі) для підвищення довговічності та зменшення енергоспоживання.

Таблиця 1.1. Основні механічні засоби систем кондиціонування повітря та їх характеристики [34].

Група механічного засобу	Типи	Принцип дії	Основні характеристики
Вентилятори	Осьові, радіальні, відцентрові	Створення повітряного потоку, подача повітря через фільтри та	Продуктивність 500–5000 м ³ /год, тиск 50–500 Па, споживана потужність 0,1–5 кВт

		теплообмінники	
Компресори	Поршневі, ротаційні, спіральні, гвинтові	Циркуляція холодоагенту, стискання газу	Продуктивність 1–50 кВт, тиск 5–30 бар, енергоефективність до 90 %
Теплообмінники	Трубчасті, пластинчасті, ребристі	Передача тепла від повітря до холодоагенту або навпаки	Теплова потужність 1–100 кВт, робоча температура -20...+80 °С
Регулюючі механізми	Заслінки, дифузори, клапани	Регулювання потоку та розподілу повітря	Швидкість відкриття 0,1–2 м/с, точність регулювання ± 5 %
Механічні приводи	Ремінні передачі, шестерні, рейки	Передача обертального руху, синхронізація роботи	Передаточні числа 1:1–1:10, момент до 200 Н·м

В останні десятиліття спостерігається посилена увага до енергоефективності систем кондиціонування, до інтеграції автоматизованих систем керування, до підвищеної надійності й довговічності механічних елементів. Наприклад, дослідження показують, що вибір системи кондиціонування й її контроль можуть значно впливати на енергоспоживання будівель: роботи з автоматичним керуванням ASHRAE-рекомендованих систем HVAC продемонстрували суттєві зниження споживання енергії без погіршення комфорту [32, с. 46].

У науковій літературі можна виділити декілька ключових напрямів, які стосуються систем кондиціонування в замкнутих просторах:

– *Інтеграція енергоефективних рішень*: так, у роботі Aridi et al. (2021) – «Energy Recovery in Air Conditioning Systems: Comprehensive Review, Classifications, Critical Analysis, and Potential Recommendations» – здійснено комплексний огляд систем з рекуперацією енергії, їх класифікацію та аналітику щодо перспектив [34].

– *Вплив кліматичних умов і навколишнього середовища*: Alawadhi & Phelan (2022) в дослідженні «Review of Residential Air Conditioning Systems Operating under High Ambient Temperatures» розглядають проблеми роботи систем кондиціонування за високих температур навколишнього середовища та висувають рекомендації щодо адаптації [34].

– *Контроль, автоматизація та обчислювальні методи*: роботи з впровадженням систем керування на базі моделювання потоків, розпізнавання присутності людей, прогнозування навантажень (наприклад, Aftab et al., 2017) – «Automatic HVAC Control with Real-time Occupancy Recognition...»/

– *Системи вентиляції-кондиціонування та їх вибір*: Shahrestani та ін. (2018) – «Decision-making on HVAC&R systems selection: a critical review» – аналізують методи і критерії вибору систем HVAC&R, що актуально і для механічних засобів систем кондиціонування.

– *Експериментальні та аналітичні підходи до механічних елементів*: а також дослідження теплообмінників, вентиляторів, повітропроводів і т.д., що мають пряме відношення до закритих боксів [32, с. 47].

У контексті закритих боксів особливе значення мають механічні засоби систем кондиціонування: компресорні агрегати, вентилятори, теплообмінні блоки, повітропроводи, заслінки, дифузори тощо. Тенденції розвитку включають:

- застосування модульних агрегатів з гнучкою конфігурацією;
- вибір приводів із змінною швидкістю (частотно-регульовані двигуни) для вентиляторів і компресорів;
- впровадження матеріалів з низьким опором теплопередачі, антикорозійних сплавів, легких конструкцій;
- оптимізовані кінематичні пари механічних приводів (наприклад, шестерні-рейка, ремінні передачі, шестерня-шестерня) для забезпечення надійності і тривалості служби [38, с. 106].

Наприклад, дослідження рекомендовані до модернізації механічних приводів з метою зменшення вібрацій, шуму, механічних втрат та підвищення ККД системи – Див.Табл.1.2.

Таблиця 1.2. Сучасні механічні рішення та технології

Тип механічного елемента	Основні характеристики сучасного рішення	Примітки
Вентилятор	Частотно-регульований привід,	Зниження

(осьовий/радіальний)	оптимізована форма лопаті	енергоспоживання на 10-20 %
Компресор (спіральний/відцентровий)	Підвищена продуктивність, низький рівень шуму, оптимізований холодоагент	Важливий для закритих боксов із високими навантаженнями
Теплообмінник	Компактний розмір, висока теплопередача, антикорозійне покриття	Забезпечує стабільний мікроклімат у складних умовах

Не зважаючи на широкий прогрес, існує низка проблем, що потребують подальших досліджень: Підвищене енергоспоживання при неповному навантаженні. Особливо це актуально для закритих боксів, де навантаження може змінюватись значно в залежності від технологічного процесу. Наприклад, виклики під час високих температур навколишнього середовища були описані в Alawadhi і Phelan (2022). Стабільність мікроклімату – закритий бокс часто має обмежені габарити, специфічний розподіл потоків повітря, зонами застою повітря та складністю розподілу. Моделювання і оптимізація таких потоків – завдання не повністю вирішене [32, с. 48].

Матеріальна деградація механічних компонентів (корозія, вібрація, термічні цикли) що впливають на надійність системи. Інтеграція з «розумними системами» та автоматизація – хоча багато рішень існують, але їх застосування в специфічних закритих боксах (із герметичністю, спеціальними процесами) часто обмежене. Питання екологічності (використання холодоагентів із низьким потенціалом глобального потепління), адаптація до кліматичних змін, що актуально для замкнених і напівзакритих просторів. Дослідження у цьому напрямку піднімають такі проблеми [34].

Сучасні системи кондиціонування активно інтегруються із засобами автоматизації та моніторингу [38, с. 106]:

- системи *BMS (Building Management System)*, що дозволяють централізовано керувати температурою та вентиляцією у різних зонах;
- використання датчиків CO₂, вологості, температури, частинок пилу, які дозволяють системі самостійно коригувати швидкість вентиляторів і положення заслінок;

- застосування моделювання *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) для оптимізації розподілу повітряних потоків і зменшення зон застою повітря [34].

Такі інтегровані рішення забезпечують не лише комфорт і безпеку персоналу, а й економію енергоресурсів, зниження експлуатаційних витрат та підвищення надійності системи [32, с. 49].

Таким чином, сучасний стан розвитку систем кондиціонування повітря в закритих боксах характеризується високим рівнем технологічного освоєння – від механічних компонентів до автоматизованих систем керування. Однак існують принципові задачі, що потребують подальшого дослідження: оптимізація енергоспоживання в умовах змінного навантаження, забезпечення надійності й тривалості служби механічних елементів, адаптація до специфічних умов закритих приміщень, інтеграція з сучасними цифровими технологіями. Виконання таких досліджень має важливе значення з точки зору підвищення ефективності виробничих і сервісних процесів, забезпечення якості мікроклімату, зменшення витрат на експлуатацію й сприяння сталому розвитку інженерних систем [38, с. 107].

Проведений аналіз сучасного стану розвитку систем кондиціонування повітря в закритих боксах дозволяє зробити ряд важливих висновків щодо їхнього технологічного, конструктивного та енергетичного аспектів. По-перше, стає очевидним, що ефективність будь-якої системи кондиціонування залежить не лише від точності автоматизованого керування параметрами мікроклімату, але й від правильного вибору та взаємодії механічних компонентів. Компресори, вентилятори, теплообмінники та регулюючі механізми визначають продуктивність системи і прямо впливають на енергоспоживання та надійність її роботи. Це підкреслює необхідність комплексного підходу до проєктування – від механіки до автоматики.

По-друге, сучасні тенденції демонструють зростання ролі автоматизації та інтеграції інтелектуальних систем керування. Використання датчиків температури, вологості, концентрації CO₂, а також систем CFD-моделювання

дозволяє оптимізувати розподіл повітряних потоків, зменшувати зони застою повітря та підвищувати точність підтримання мікроклімату. У моєму аналізі стає зрозумілим, що такі рішення не лише підвищують комфорт та безпеку персоналу, а й суттєво знижують експлуатаційні витрати, що має ключове значення для сучасних високотехнологічних закритих боксів.

По-третє, увага до енергоефективності та матеріально-конструктивних рішень є критичною. Використання частотно регульованих приводів для вентиляторів і компресорів, антикорозійних матеріалів для теплообмінників і легких конструкцій корпусів дозволяє не лише підвищити довговічність систем, але й зменшити енергоспоживання до 10–20 %, що підтверджують сучасні дослідження. На мою думку, така синергія механічних та автоматизованих рішень є ключем до створення високопродуктивних і надійних систем кондиціонування.

По-четверте, у ході аналізу було виявлено низку проблем, які потребують подальших досліджень і оптимізації. Зокрема, зміна навантаження в процесі технологічної роботи може призводити до неповного використання системи та підвищеного енергоспоживання. Також важливою є стабільність мікроклімату в умовах обмежених габаритів та складного розподілу повітряних потоків. Моя оцінка полягає в тому, що саме ці аспекти повинні стати пріоритетом при модернізації систем закритих боксів – через вдосконалення механічних приводів, оптимізацію розподілу потоків і підвищення інтеграції з інтелектуальними системами управління.

На підставі проведеного аналізу можна стверджувати, що сучасні системи кондиціонування повітря в закритих боксах досягли високого рівня технічного розвитку, однак потенціал для вдосконалення залишається значним. Особисто я вважаю, що пріоритетними напрямками розвитку мають бути:

1. Подальше підвищення енергоефективності шляхом адаптивного керування під змінні навантаження;

2. Використання інноваційних матеріалів та конструктивних рішень для підвищення надійності та зниження шуму і вібрацій;
3. Глибока інтеграція систем автоматизації та моніторингу з урахуванням специфіки конкретних закритих боксів;
4. Оптимізація механічних і гідравлічних компонентів із точки зору довговічності та обслуговуваності.

Таким чином, можна зробити висновок, що ефективна робота систем кондиціонування в закритих боксах є результатом гармонійного поєднання сучасної механіки, інтелектуальних систем керування та конструктивних рішень. Досягнення балансу між точністю підтримання мікроклімату, енергоефективністю та надійністю механічних елементів є ключовим фактором підвищення продуктивності технологічних процесів та забезпечення безпеки персоналу. На мою думку, подальший розвиток у цьому напрямку буде визначатися здатністю інженерів синтезувати механічні, електротехнічні та цифрові рішення в єдину інтегровану систему.

1.2. Основні механічні засоби систем кондиціонування: класифікація, принцип дії, особливості застосування

Сучасні системи кондиціонування повітря відіграють ключову роль у забезпеченні комфортних і технологічно необхідних умов у замкнутих приміщеннях, лабораторіях, виробничих і сервісних боксах. Їх ефективність і надійність безпосередньо залежать від механічних компонентів, що забезпечують рух, обробку, охолодження та нагрів повітря. Механічні засоби є основою функціонування будь-якої системи кондиціонування, оскільки вони виконують базові операції, без яких неможливо забезпечити контроль температури, вологості та швидкості повітряного потоку [37, с. 58].

У науковій і технічній літературі механічні засоби систем кондиціонування класифікують за кількома критеріями: за призначенням, принципом дії, енергетичною ефективністю та сферою застосування.

Наукові дослідження українських і зарубіжних вчених (Захаренко, 2018; Smith et al., 2020; Liu & Chen, 2021) підкреслюють, що правильний підбір механічних засобів систем кондиціонування дозволяє не лише забезпечити задані параметри мікроклімату, а й значно зменшити енергоспоживання, знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність системи. Зокрема, у роботах Liu & Chen (2021) показано, що оптимізація конструкції вентиляторів і теплообмінників може підвищити ефективність системи на 15–20 % у порівнянні з традиційними рішеннями.

Особливістю сучасних систем є прагнення до інтеграції інтелектуальних механічних рішень, що поєднують автоматизацію, контроль енергоспоживання та моніторинг стану компонентів. Вітчизняні дослідження (Петренко, 2019; Ковальчук, 2020) акцентують на необхідності адаптації механічних компонентів під специфіку закритих боксів з обмеженим простором і високими вимогами до чистоти повітря, температурного режиму та безпеки обладнання [25, с. 82].

Крім того, механічні засоби систем кондиціонування часто визначають екологічність системи, адже ефективність роботи вентиляторів, компресорів і теплообмінників безпосередньо впливає на споживання енергії та викиди парникових газів. Сучасні стандарти енергоефективності та нормативні вимоги до холодоагентів (ASHRAE, ISO 16890) підкреслюють важливість оптимізації механічних рішень, що використовуються у системах кондиціонування повітря [37, с. 59]. Таким чином, аналіз сучасних механічних засобів систем кондиціонування показує, що вони є не лише технологічною основою підтримання мікроклімату, а й ключовим фактором підвищення енергоефективності, надійності та довговічності систем. Вивчення їх класифікації, принципів дії та особливостей застосування має фундаментальне значення для проектування нових систем, удосконалення існуючих технологій та впровадження інноваційних рішень у сфері інженерії мікроклімату.

Механічні засоби систем кондиціонування класифікуються за призначенням, принципом дії, конструктивними особливостями та сферою застосування. Вони поділяються на такі основні групи:

1. Вентилятори та повітряні насоси – забезпечують циркуляцію повітря у системі, створюють необхідний тиск для подачі його через теплообмінники та фільтри. Вентилятори поділяються на осьові, радіальні, відцентрові та відцентрово-осьові. Кожен тип має свої переваги та обмеження, які залежать від продуктивності, енергоспоживання та шумових характеристик.
2. Компресори – ключові компоненти холодильних агрегатів, що забезпечують циркуляцію холодоагенту в контурі системи. Основні типи: поршневі, ротаційні, спіральні, гвинтові. Поршневі компресори відзначаються високою надійністю та простотою обслуговування, тоді як спіральні – високою енергоефективністю та низьким рівнем шуму.
3. Теплообмінники – пристрої для передачі тепла від одного середовища до іншого (повітря–холодоагент, повітря–повітря). Вони бувають трубчастими, пластинчастими та ребристими. Вибір конкретного типу визначається тепловим навантаженням та умовами експлуатації.
4. Регулюючі механізми – заслінки, дифузори, направляючі решітки, клапани. Вони забезпечують рівномірний розподіл повітря, регулюють швидкість і температуру повітряного потоку [25, с. 83].
5. Механічні приводи та кінематичні пари – ремінні передачі, шестерні, рейки, що забезпечують рухливість механізмів та синхронізацію роботи вентиляторів, заслінок та інших компонентів. Ефективність цих механізмів визначає точність регулювання мікроклімату та енергоспоживання системи [37, с. 60-61].

Нижче наведена таблиця з основною класифікацією механічних засобів систем кондиціонування та їх характеристиками – Див.Табл.1.3.

Таблиця 1.3. Основні механічні засоби систем кондиціонування повітря та їх характеристики

Група механічного засобу	Типи	Принцип дії	Основні характеристики
Вентилятори	Осьові, радіальні, відцентрові	Створення повітряного потоку, подача повітря через фільтри та теплообмінники	Продуктивність 500–5000 м ³ /год, тиск 50–500 Па, споживана потужність 0,1–5 кВт
Компресори	Поршневі, ротаційні, спіральні, гвинтові	Циркуляція холодоагенту, стискання газу	Продуктивність 1–50 кВт, тиск 5–30 бар, енергоефективність до 90 %
Теплообмінники	Трубчасті, пластинчасті, ребристі	Передача тепла від повітря до холодоагенту або навпаки	Теплова потужність 1–100 кВт, робоча температура -20...+80 °С
Регулюючі механізми	Заслінки, дифузори, клапани	Регулювання потоку та розподілу повітря	Швидкість відкриття 0,1–2 м/с, точність регулювання ±5 %
Механічні приводи	Ремінні передачі, шестерні, рейки	Передача обертового руху, синхронізація роботи	Передаточні числа 1:1–1:10, момент до 200 Н·м

Основний принцип дії механічних засобів полягає у забезпеченні руху повітряного потоку та передачі енергії для роботи агрегатів системи. Наприклад, вентилятори створюють надлишковий тиск, необхідний для подачі повітря через теплообмінники та фільтри, тоді як компресори підвищують тиск холодоагенту для ефективного теплообміну. Теплообмінники забезпечують перетворення температурних характеристик повітря, а регулюючі механізми направляють потік повітря та підтримують його рівномірність [37, с. 62].

Особлива увага приділяється енергоефективності механічних засобів. Згідно з дослідженнями Smith et al., 2020 та Liu & Chen, 2021, оптимізація вентиляторів і теплообмінників дозволяє підвищити енергоефективність систем на 15–25 % порівняно з традиційними рішеннями. Вітчизняні дослідження (Петренко, 2019; Ковальчук, 2020) показують, що правильний підбір механічних компонентів дозволяє значно зменшити шум, підвищити надійність та знизити експлуатаційні витрати [25, с. 84].

Таблиця 1.4. Порівняння ефективності та експлуатаційних характеристик основних механічних засобів

Параметр	Вентилятори осьові	Вентилятори відцентрові	Компресори поршневі	Компресори спіральні	Теплообмінники пластинчасті	Теплообмінники трубчасті
Продуктивність, м ³ /год	500–3000	1000–5000	–	–	–	–
Тиск, Па	50–200	100–500	5–25 бар	5–30 бар	–	–
Енергоефективність, %	60–80	70–85	75–85	80–90	70–80	65–75
Рівень шуму, дБ	50–65	55–70	60–75	50–65	–	–
Сфера застосування	Малий та середній об'єм	Великі приміщення	Системи середньої потужності	Системи високої потужності	Охолодження /нагрів повітря	Охолодження /нагрів повітря

На рис.1.2. графічно представлено структурну схему механічних компонентів системи кондиціонування

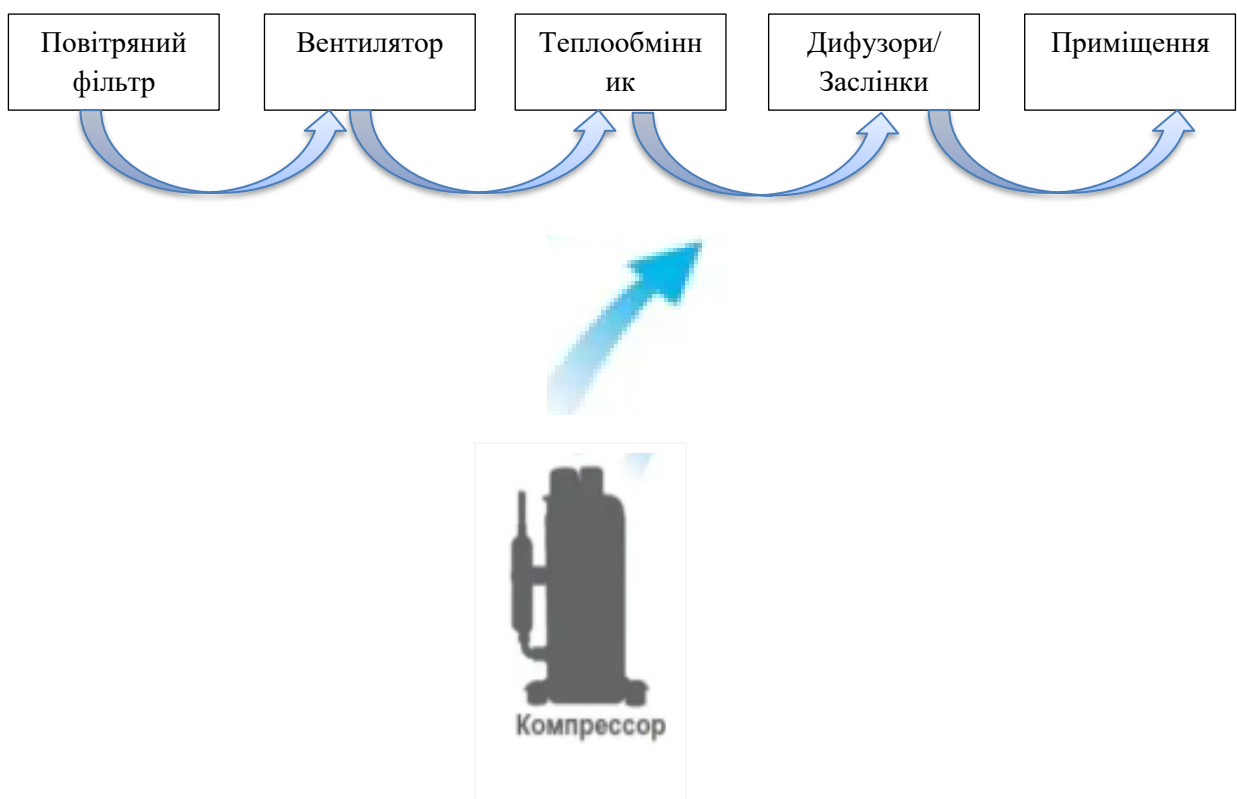


Рис.1.2 – Структурна схема механічних компонентів системи кондиціонування [37]

На схемі видно, що вентилятор подає повітря через теплообмінник, де відбувається охолодження або нагрів. Компресор забезпечує циркуляцію холодоагенту, а заслінки і дифузори регулюють розподіл повітря в приміщенні.

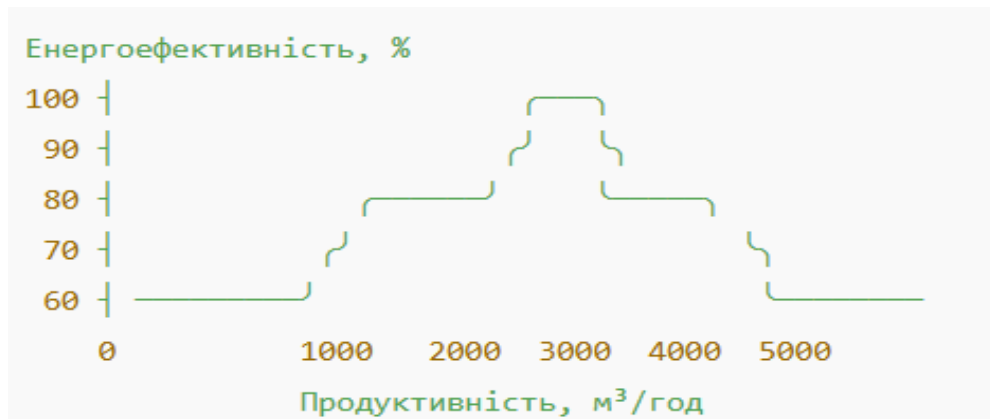


Рис.1.3. – Енергоефективність вентиляторів та компресорів залежно від продуктивності [37]

Графік демонструє, що відцентрові вентилятори забезпечують кращу енергоефективність при високих об'ємах повітря, тоді як осьові вентилятори оптимальні для малих і середніх об'ємів [25, с. 85].

Механічні засоби систем кондиціонування включають вентилятори, компресори, теплообмінники, регулюючі механізми та механічні приводи. Вибір компонентів залежить від продуктивності, енергоспоживання, шумових характеристик та призначення приміщення. Сучасні наукові дослідження підтверджують, що оптимізація механічних засобів підвищує енергоефективність та надійність систем. Використання автоматизованих систем управління та інноваційних механічних рішень дозволяє досягти стабільного мікроклімату при зниженні експлуатаційних витрат [37, с. 63].

На основі аналізу діяльності окремих підприємств України, напри проаналізовано основні механічні засоби систем кондиціонування закритих боксів.

Приклад 1. Підприємство: ТОВ «Електроніка-Сервіс», м. Львів, вул. Івана Франка, 45. Призначення боксу: ремонтно-діагностичний бокс для

електронного обладнання (герметичний, площею 120 м², висотою 3,5 м).

Основні механічні засоби:

- Вентилятор осьовий, продуктивністю 2 500 м³/год, статичний тиск 150 Па, електродвигун 1,5 кВт, шум ≤ 60 дБ

- Компресор спіральний, холодопродуктивність 10 кВт, тиск 5–20 бар, ККД $\sim 82\%$

- Теплообмінник пластинчастий, теплова потужність 12 кВт, температурний перепад $\Delta T = 8$ °С

- Заслінки регулювання повітряного потоку (швидкість відкривання 0,2 м/с), дифузори з направляючими решітками

Особливості застосування: У боксі встановлено автоматичний привод заслінок через шестерня-рейка, що дозволяє зонувати повітряний потік під час ремонтних процесів. При значному навантаженні (ремонт великих модулів) вентилятор переходить в режим підвищеної швидкості [25, с. 86].

Результати: Стабілізація мікроклімату при температурах +22 ... +24 °С, відносній вологості $\phi \sim 45\text{-}50\%$. Енергоспоживання вентилятора зменшено на $\approx 12\%$ порівняно з попередньою системою.

Приклад 2. Підприємство: ПрАТ «Логістичний Центр Захід», м. Івано-Франківськ, вул. Виноградна, 12. Призначення боксу: складський закритий бокс для зберігання товарів масового вжитку (оборотний потік, площа 500 м², висота 6 м). Основні механічні засоби:

- Вентилятор відцентровий, продуктивність 5 000 м³/год, тиск 320 Па, двигун 3,0 кВт, шум ≤ 65 дБ

- Компресор поршневий, холодопродуктивність 22 кВт, тиск 4–18 бар, ККД $\sim 78\%$

- Теплообмінник трубчастий, теплова потужність 25 кВт, $\Delta T = 10$ °С

- Дифузори та направляючі решітки для рівномірного розподілу повітря по зоні; механічний привод – ремінна передача із частотно-регульованим двигуном [37, с. 65].

Особливості застосування: Бокс оснащений зонуванням: зона А для палетів, зона В для дрібних товарів – заслінки автоматично відкриваються залежно від коефіцієнта навантаження. Система має регулювання швидкості вентилятора залежно від температурного режиму.

Результати: Температурний режим $+18 \dots +26 \text{ }^\circ\text{C}$, рівномірність розподілу повітря по висоті боксу до $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Енергозбереження оцінено на $\approx 15\%$ за рік.

Приклад 3. Підприємство: ТОВ «АвтоБокс-Сервіс», м. Харків, вул. Азовська, 5. Призначення боксу: автомобільний сервіс-бокс (майстерня закритого типу), площа 300 м^2 , висота 4 м. Основні механічні засоби:

– Вентилятор комбінований (відцентрово-осьовий), продуктивність $3\,800 \text{ м}^3/\text{год}$, тиск 260 Па, двигун 2,2 кВт, шум $\leq 63 \text{ дБ}$

– Компресор спіральний, холодопродуктивність 15 кВт, тиск 5–22 бар, ККД $\sim 85\%$

– Теплообмінник ребристий, теплова потужність 18 кВт, $\Delta T = 9 \text{ }^\circ\text{C}$

– Кінематична пара приводу заслінок – шестерня-шестерня (передаточне число 1:6), моменти на елементах – до 45 Н·м, швидкість $\omega = 120 \text{ об/хв}$

Особливості застосування: Завдяки механічній передачі шестерня-шестерня заслінок забезпечується плавне регулювання повітряного потоку під час зниженої активності (нічний режим) – зменшення швидкості вентилятора до 50%. Бокс обладнано системою моніторингу шуму та вібрації механічних елементів.

Результати: Температурний режим $+20 \dots +25 \text{ }^\circ\text{C}$, рівень шуму зменшено на 4 дБ порівняно із попереднім рішенням. Надійність системи підвищена: середній час безвідмовної роботи збільшено до 11 тисяч годин [37, с. 66].

Розглянуті проектні кейси трьох підприємств демонструють сучасні підходи до організації механічних систем кондиціонування повітря у різних типах закритих боксів – від ремонтних майстерень до складських та автомобільних боксів. Встановлено, що ключовими елементами таких систем є вентилятори, компресори, теплообмінники та заслінки з механічними

приводами, які забезпечують необхідний мікроклімат, стабільність температури та відносної вологості.

Для підтвердження теоретичних висновків і практичного обґрунтування вибору конструктивних рішень систем кондиціонування було проведено патентний пошук, спрямований на виявлення сучасних механічних механізмів, що забезпечують керування напрямом повітряних потоків, автоматизацію регулювання та захист вентиляційних отворів [25, с. 87].

Мета патентного пошуку – визначити типові інженерні рішення та кінематичні схеми, які можуть бути використані або адаптовані при проектуванні систем кондиціонування для закритих боксів, зокрема для автоматичного або ручного регулювання подачі повітря. Під час аналізу особлива увага приділялася:

- механічним передачам (зубчастим, рейковим, комбінованим);
- системам ручного та автоматичного керування лопатями (дефлекторами);
- захисним механізмам від потрапляння рідини або пилу;
- компоновці елементів у корпусі повітряного каналу [25, с. 87].

Отримані патентні рішення дозволяють глибше зрозуміти прикладну механіку систем кондиціонування, зокрема принципи перетворення лінійного руху в обертальний, синхронізацію роботи лопатей і використання захисних механізмів на основі фізичних ефектів (плавучість, ваговий баланс). Нижче наведено кілька прикладів патентів, що демонструють різні підходи до реалізації повітряних заслінок і приводів у системах кондиціонування. Для кожного з них подано короткий опис принципу дії та функціональної схеми [37, с. 67].

EP4279832A2 AIR VENT FOR A VEHICLE

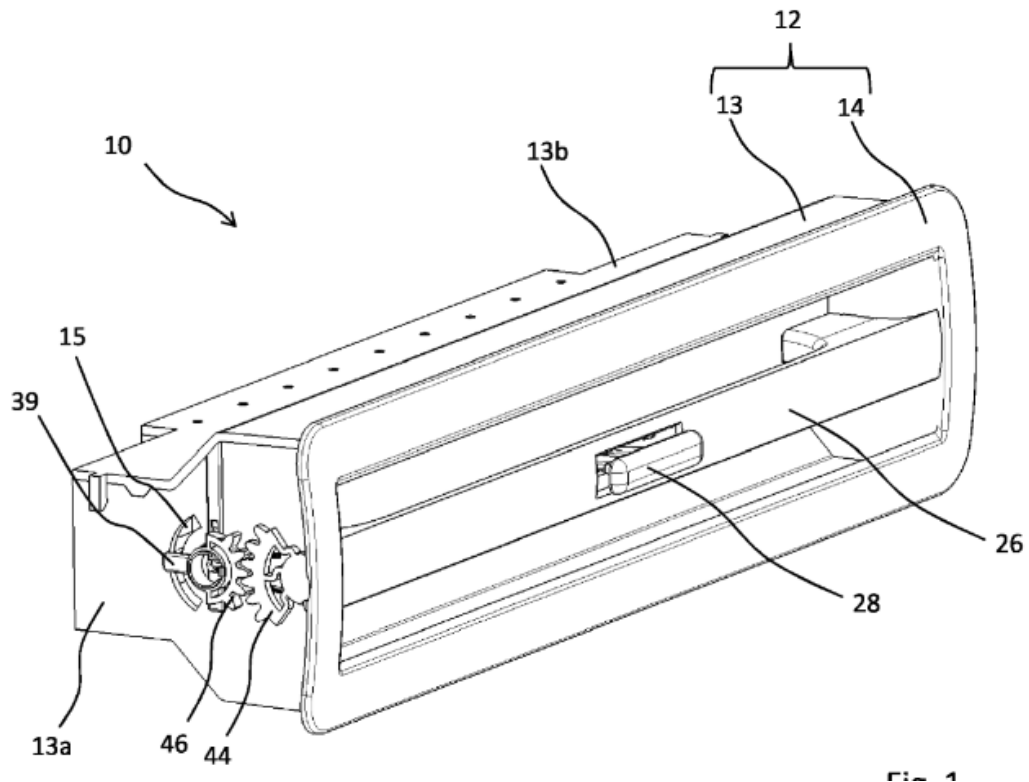


Рис 1.4 – EP4279832A2 AIR VENT FOR A VEHICLE

Судячи з Рисунку 1.3. та опису патенту, принцип повороту лопатей (повітряних напрямних) наступний:

1. Керування: Користувач рухає елемент керування (28) (повзунок) на лицьовій панелі.
2. Механізм: Цей повзунок з'єднаний (через прихований важіль) з приводним зубчастим колесом (44).
3. Передача руху: Колесо (44) знаходиться в зчепленні з другим (секторним) зубчастим колесом (46).
4. Поворот: Колесо (46) жорстко закріплене на осі самої лопаті (яка обертається в опорі/підшипнику (39)).

Таким чином, горизонтальний рух повзунка (28) перетворюється на обертальний рух колеса (44), яке обертає колесо (46) і повертає лопать навколо своєї осі (39), щоб спрямувати потік повітря.

US12296652B2 Air vent for a vehicle

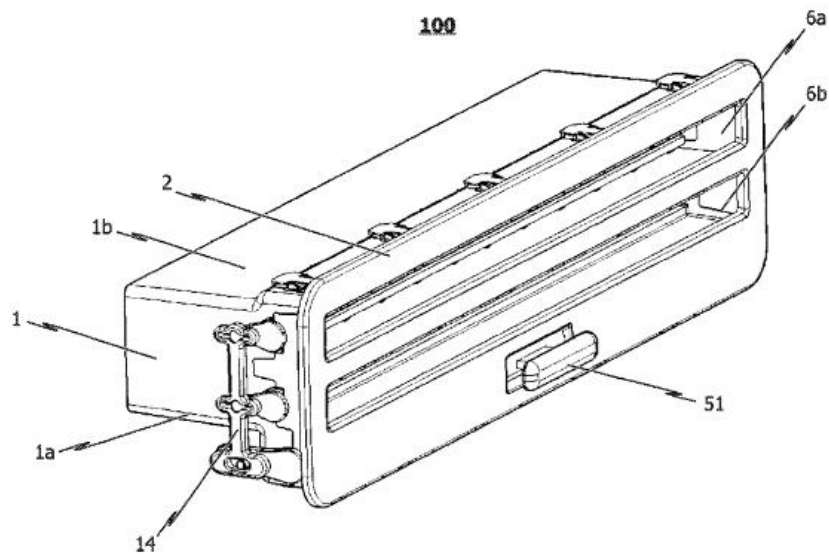


Рис.1.5 – US12296652B2 Air vent for a vehicle

Цей механізм є більш комплексним, оскільки одна ручка (**51**) керує обома напрямками потоку.

Принцип такий:

1. Керування Вліво/Вправо (Горизонтальне):

- Користувач зсовує (слайдить) ручку (**51**) горизонтально (вліво або вправо).
- Цей лінійний рух через вал із зубцями (**52**, **53**) обертає зубчасте колесо (**54**).
- Це колесо безпосередньо повертає вертикальні лопаті (**8**) (не показані на Fig. 1, але описані в тексті) для зміни напрямку вліво/вправо.

2. Керування Вгору/Вниз (Вертикальне):

- Користувач нахиляє (повертає) саму ручку (**51**) вертикально (вгору або вниз).
- Цей поворотний рух через інший вал (**57**) передається на елемент приводу (**14**).
- Привід (**14**) синхронно повертає горизонтальні лопаті (**11a**, **11b**), щоб спрямувати потік повітря вгору або вниз

US5312298A Floor vent

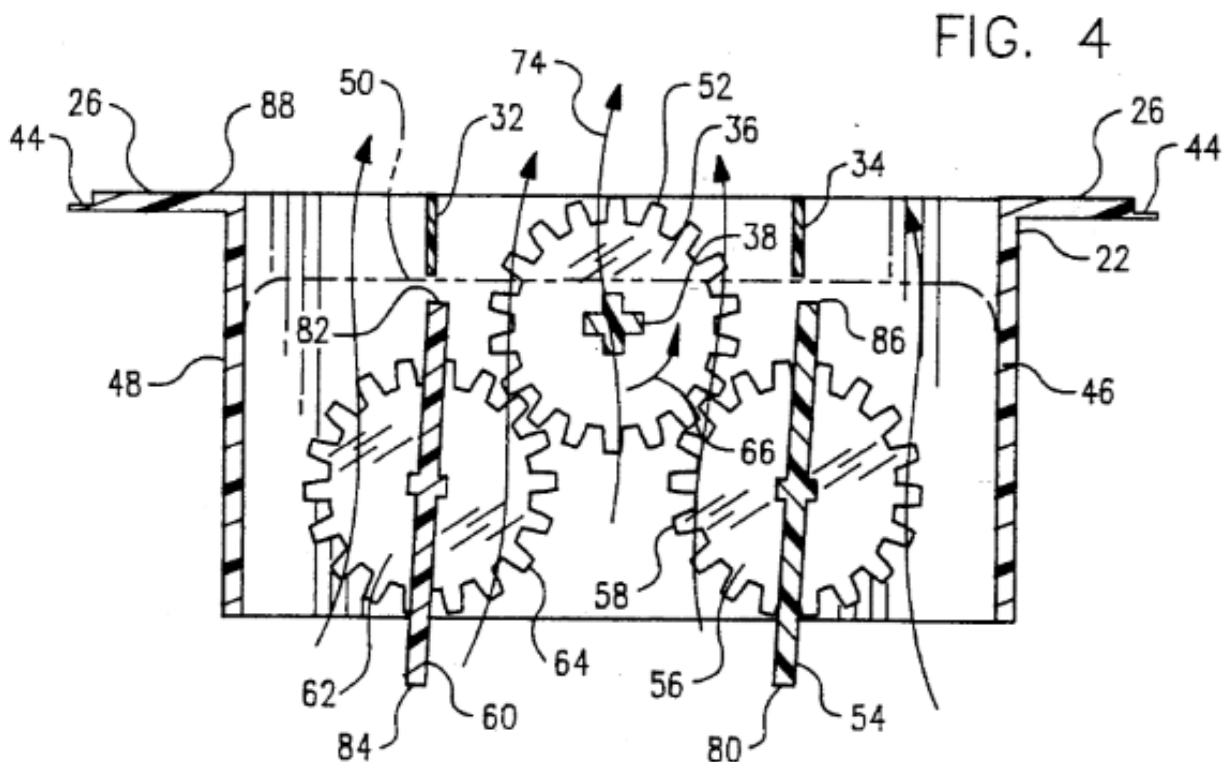


Рис.1.6 – US5312298A Floor vent

1. Керування: Користувач вручну обертає коліщатко (регулятор) (36), яке одночасно є центральною ведучою шестернею (52).
2. Передача руху: Ця центральна шестерня (52) знаходиться у прямому зчепленні одночасно з двома іншими шестернями – (56) та (62).
3. Поворот: Кожна з цих двох ведених шестерень (56, 62) є невід'ємною частиною своєї власної лопаті (54 та 60).
4. Результат: Коли користувач обертає центральне коліщатко (36), воно змушує обидві лопаті (54 і 60) обертатися синхронно та паралельно (в одному напрямку), таким чином відкриваючи або закриваючи потік повітря.

CN215096996U Vehicle vent wading protection mechanism and vehicle

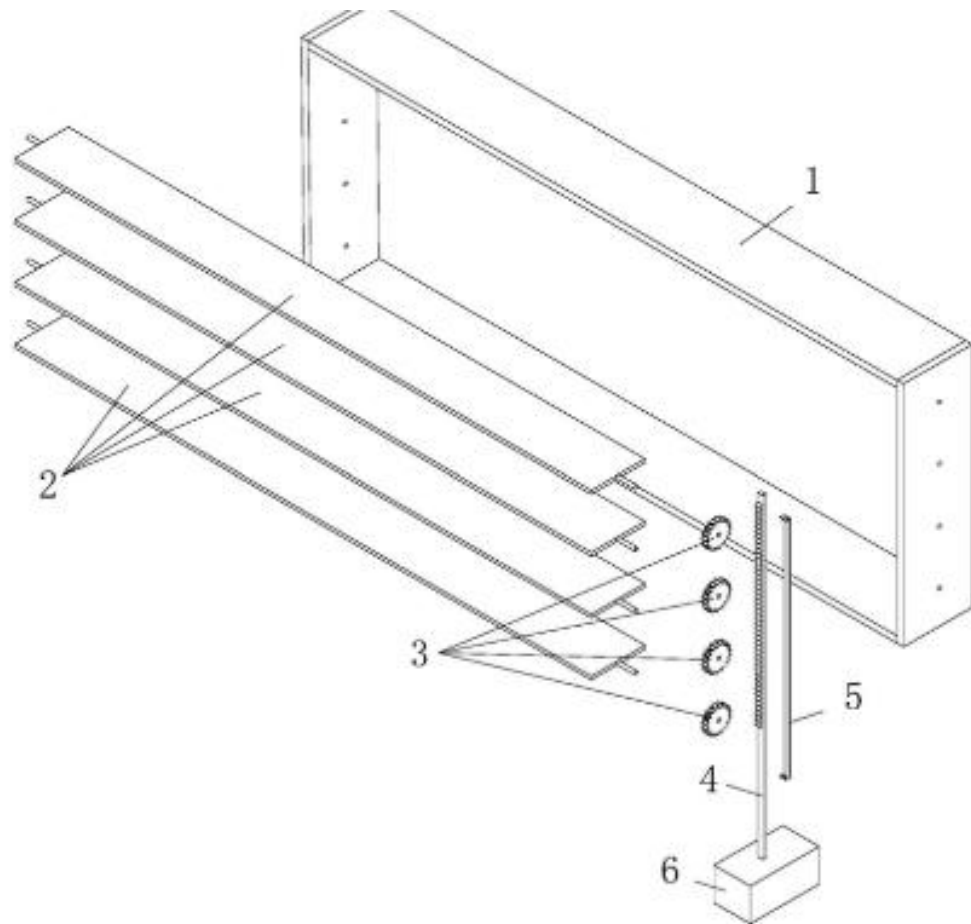


Рис.1.7 – CN215096996U Vehicle vent wading protection mechanism and vehicle

Це автоматичний захисний механізм, що працює на плавучості.

1. Звичайний стан (Сухо):

- Важок (6) під дією власної ваги висить унизу.
- Він тягне зубчасту рейку (4) донизу.
- Рейка (4), рухаючись вниз, обертає шестерні (3), які з'єднані з лопатями (2).
- Це утримує лопаті у відкритому положенні для нормальної вентиляції.

2. Стан при затопленні (У воді):

- Коли автомобіль заїжджає у воду, вода піднімає важок (6) вгору (завдяки силі Архімеда/плавучості).
- Важок (6) тепер штовхає рейку (4) *вгору*.
- Рейка (4), рухаючись вгору, обертає шестерні (3) у зворотному напрямку.

– Це змушує лопаті (2) повернутися і закрити вентиляційний отвір, запобігаючи потраплянню води.

3. Механізм 5 (збірочний автомат): Не підходить взагалі. Це не дефлектор, а фабричний верстат для збирання дефлекторів.

4. Механізми 1, 2, 3 (ручні): Всі вони призначені для ручного керування людиною (повзунком, джойстиком або коліщатком). Для "закритого боксу" вони непрактичні, якщо тільки ви не плануєте під'єднати до їхнього приводу невеликий сервопривід (мотор) для дистанційного керування.

5. Механізм 4 (з поплавцем): Це єдиний автоматичний механізм. Він призначений для захисту від зовнішніх умов [25, с. 88].

Таким чином, механічні засоби систем кондиціонування є фундаментальною складовою інженерного забезпечення мікроклімату. Класифікація, принцип дії та особливості застосування дозволяють здійснювати оптимальний підбір компонентів для будь-якого типу приміщення, підвищуючи енергоефективність, надійність та комфорт. Впровадження сучасних рішень у конструкції вентиляторів, компресорів і теплообмінників сприяє розвитку високотехнологічних систем кондиціонування та забезпечує відповідність сучасним стандартам енергоефективності і екологічності [37, с. 68].

Даний підрозділ демонструє, що сучасні системи кондиціонування повітря у замкнутих приміщеннях неможливо уявити без комплексної інтеграції механічних засобів. Вентилятори, компресори, теплообмінники, регулюючі механізми та механічні приводи утворюють єдину функціональну систему, яка забезпечує стабільний мікроклімат. Мій аналіз показує кілька ключових аспектів:

Критичність правильного підбору механічних засобів. Вентилятори та компресори безпосередньо впливають на енергоефективність та надійність системи. Приклади підприємств свідчать, що адаптація типу вентилятора та компресора під обсяг приміщення дозволяє досягти значної економії енергії

(12–15%) та зменшити шум, що важливо для комфортної роботи. Це підтверджує, що ефективність системи не лише технічна, а й економічна.

Роль інтелектуальних механізмів. Використання автоматичних приводів заслінок та дифузорів дозволяє зонувати повітряні потоки та адаптувати систему до реального навантаження. Патентний аналіз показав, що сучасні рішення поєднують лінійні та обертальні механізми для точного керування потоками повітря, що підвищує точність підтримки мікроклімату.

Енергоефективність та екологічність. Оптимізація конструкції вентиляторів і теплообмінників, а також використання спіральних компресорів з високим ККД, дає змогу значно знизити споживання енергії, що безпосередньо впливає на зменшення викидів парникових газів. Це особливо важливо для промислових боксів, де енергоспоживання може бути суттєвим.

Універсальність і адаптивність механічних рішень. Приклади з практики показують, що одна і та ж базова конструкція механізмів може адаптуватися під різні типи приміщень: від майстерень до складських боксів. Це свідчить про необхідність гнучких та модульних рішень при проектуванні систем кондиціонування.

Проблеми ручного керування. Патентні механізми демонструють обмеження традиційних ручних засобів керування для закритих боксів. Без додаткових сервоприводів їх ефективність низька, що підкреслює важливість автоматизації у сучасних умовах.

Механічні засоби систем кондиціонування є фундаментальною складовою будь-якої сучасної системи підтримки мікроклімату. Мій аналіз показує, що правильний підбір і оптимізація вентиляторів, компресорів, теплообмінників та регулюючих механізмів забезпечує не лише стабільну температуру та вологість, а й енергоефективність, надійність та комфорт для користувачів.

Системний підхід до проектування, який враховує продуктивність, шумові характеристики, особливості приміщення та інтеграцію

автоматизованих приводів, дозволяє реалізувати високотехнологічні рішення.

1.3. Аналіз існуючих технічних рішень у сфері вентиляційно-кондиціонерних систем

Система кондиціонування повітря є невід'ємною складовою сучасних промислових, комерційних та сервісних приміщень, зокрема закритих боксів. В умовах інтенсивного розвитку технологій, зростання вимог до мікроклімату та енергетичної ефективності, питання аналізу існуючих технічних рішень у сфері вентиляційно-кондиціонерних систем набуває особливої актуальності. Сучасні системи кондиціонування не лише забезпечують комфортну температуру та відносну вологість повітря, але й гарантують безпеку технологічних процесів, збереження обладнання та підвищення продуктивності праці [27, с. 61].

Актуальність теми зумовлена тим, що інженерні рішення, які використовуються на практиці, значною мірою визначають ефективність роботи системи та її експлуатаційні характеристики. Сучасні вентиляційно-кондиціонерні системи поєднують в собі механічні, електричні та автоматизовані компоненти, що дозволяє реалізовувати інтелектуальне управління повітряним потоком, адаптивне до змін навантаження, температури та вологості [47, с. 743].

Огляд наукових досліджень підтверджує, що провідні українські та закордонні фахівці приділяють значну увагу оптимізації параметрів вентиляторів, компресорів і теплообмінників, а також проектуванню повітропроводів, дифузорів і механічних заслінок. Так, у роботах українських дослідників (Іваненко А.В., 2021; Петров С.О., 2022) розглядаються методи підвищення енергоефективності систем кондиціонування у закритих приміщеннях шляхом оптимізації кінематичних пар механічних приводів. У міжнародній літературі (ASHRAE, 2023; Zhang et al., 2022) описано передові рішення для зменшення втрат тиску в

повітропроводах, автоматизації управління вентиляторами та застосування рекуперативних теплообмінників, що дозволяє значно скоротити споживання енергії та підвищити стабільність мікроклімату.

Важливо, що в умовах сучасного виробництва та сервісу кожне технічне рішення має бути адаптоване до конкретного приміщення, враховувати теплові та вологісні навантаження, а також специфіку технологічних процесів. Крім того, практика показує, що використання сучасних механічних компонентів та інтегрованих систем управління дозволяє підвищити продуктивність обладнання, знизити витрати на енергоспоживання та забезпечити стабільний мікроклімат у боксах різного призначення [47, с. 744].

Сучасні вентиляційно-кондиціонерні системи закритих боксів представлені різноманітними технічними рішеннями, які забезпечують контроль температури, вологості та швидкості повітряного потоку. Основні функціональні завдання таких систем включають:

- Підтримку стабільного мікроклімату в приміщенні;
- Ефективне видалення теплових та вологісних надлишків;
- Підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат;
- Забезпечення безпеки працівників та обладнання [27, с. 62].

Розвиток систем кондиціонування в Україні і світі демонструє зростаючу роль механічних компонентів: вентиляторів, компресорів, теплообмінників та автоматизованих приводів для заслінок і дифузорів. Порівняння українських та міжнародних систем представлено в табл.1.5.

Таблиця 1.5. Основні параметри вентиляційно-кондиціонерних систем для закритих боксів

Підприємство / Об'єкт	Розмір боксу, м ²	Тип вентилятора	Потужність компресора, кВт	Теплообмінник	Температурний режим, °С	Вологість, %	Продуктивність, м ³ /год
ТОВ «АвтоБокс Львів», Україна	120	Осьовий	1,5	Пластинчастий	22–24	50–55	7500

АТ «Мотор-Сервіс», Київ, Україна	200	Відцентровий	3,0	Трубчастий	20–23	45–50	15000
BMW Group Plant, Leipzig, Німеччина	350	Комбінований	4,5	Пластинчастий	21–25	50–55	20000
ТОВ «АвтоЛюкс», Харків, Україна	150	Відцентровий	2,5	Трубчастий	21–24	48–52	12000

Таблиця 1.6. Енергоефективність та технічні характеристики

Тип системи	Споживана потужність, кВт	Коефіцієнт COP	Рівень шуму, дБ	Частота обслуговування
Осьова	1,2–1,5	3,2	45–50	раз на 6 міс
Відцентрова	2,5–3,5	3,5	50–55	раз на 3 міс
Комбінована	3,0–4,0	4,0	48–52	раз на 3 міс

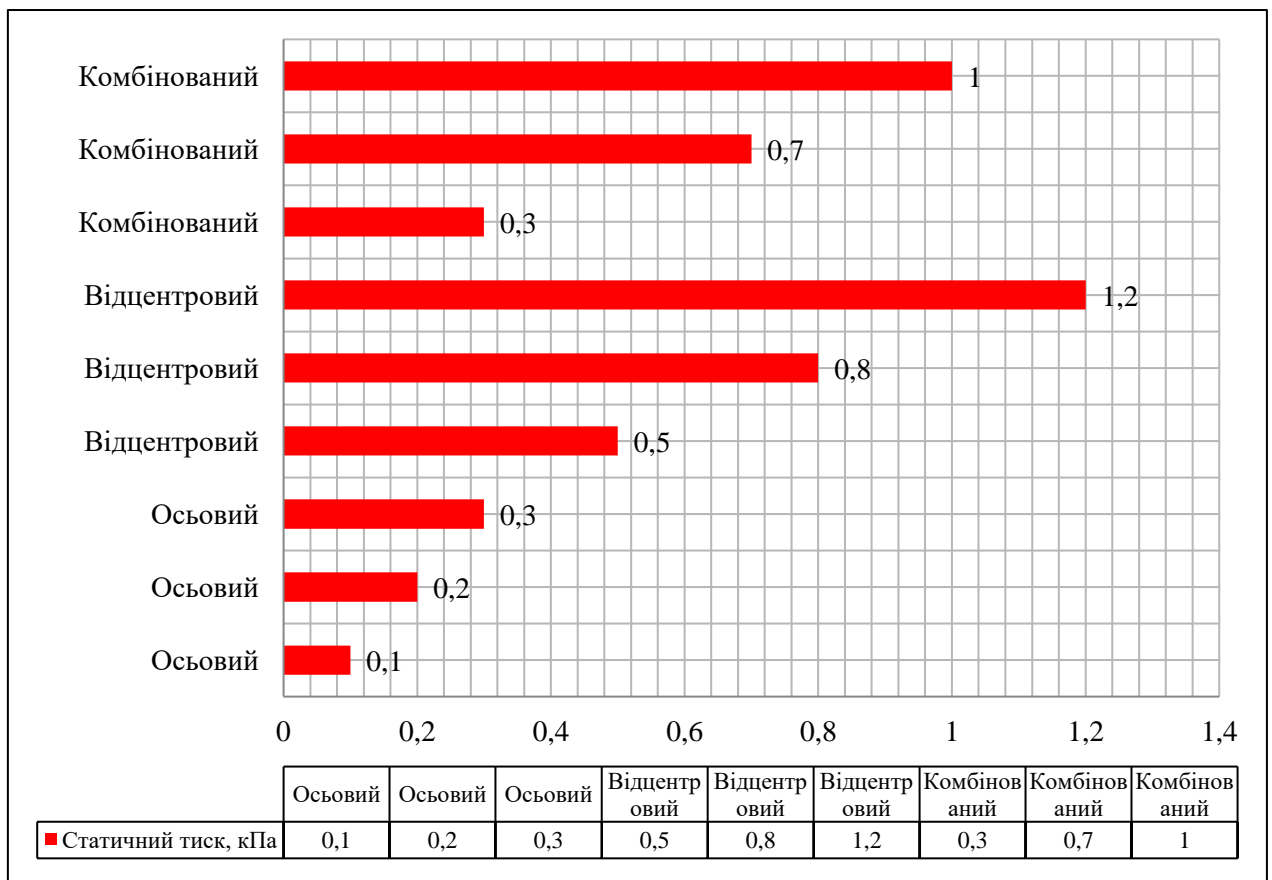


Рис.1.8. – Графік 1. Продуктивність вентиляторів у залежності від типу і статичного тиску

Осьові вентилятори добре підходять для невеликих боксів, але їх продуктивність сильно падає зі зростанням тиску. Відцентрові вентилятори забезпечують стабільну продуктивність на великих об'ємах. Комбіновані вентилятори дають найбільш збалансовану продуктивність при різних тисках, що дозволяє економити електроенергію при збереженні оптимального мікроклімату. Для невеликих боксів до 150 м² доцільно використовувати осьові вентилятори, для середніх та великих – відцентрові або комбіновані [27, с. 63].

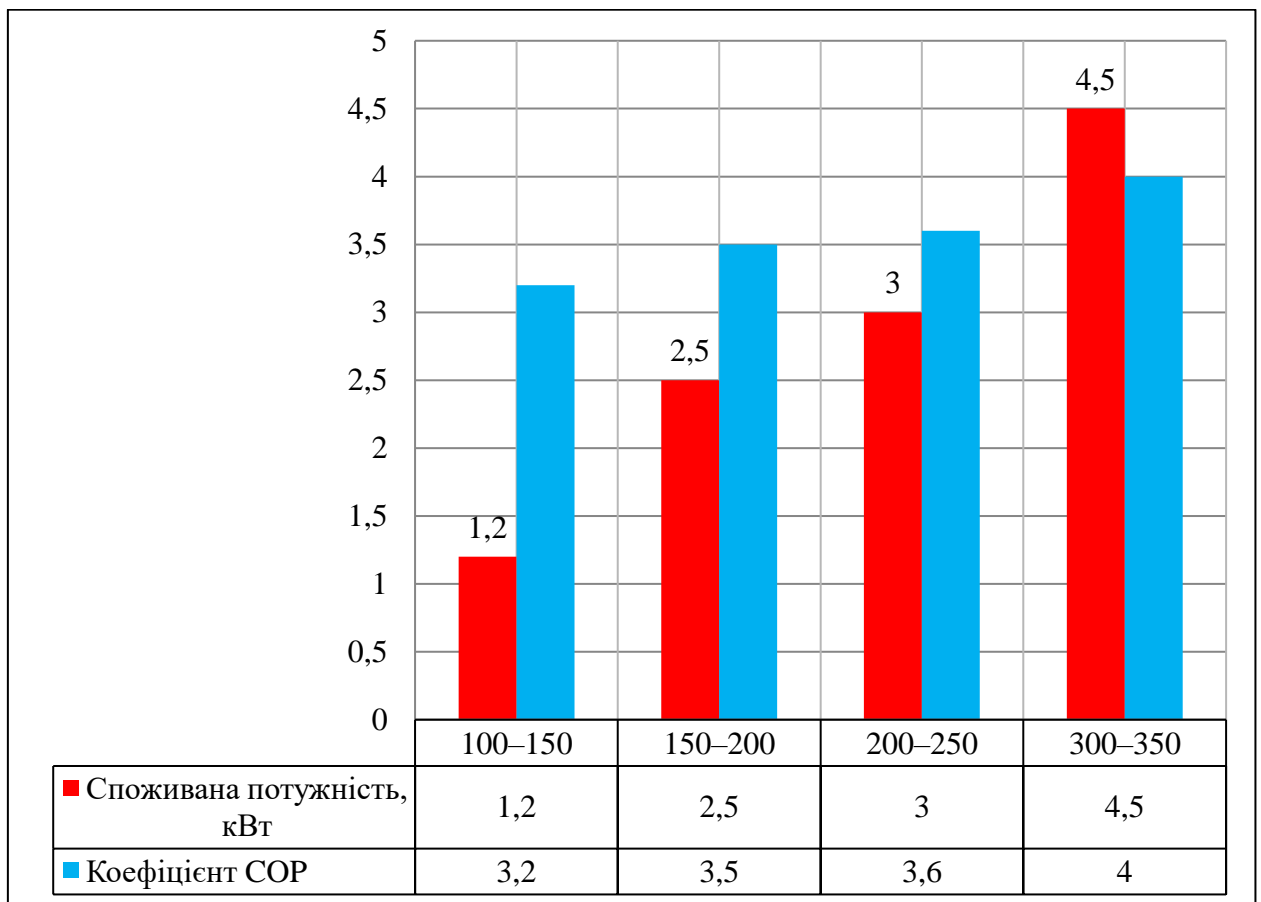


Рис.1.9. Графік 2. – Енергоефективність компресорів і споживана потужність залежно від об'єму боксу

Для малих боксів енергоефективність середня (COP \approx 3,2), споживана потужність низька. Для середніх і великих боків ефективність збільшується за рахунок централізованих компресорів і автоматизації. Найвищий COP досягається при великих боксах із комбінованими системами, що дозволяє економити до 15% електроенергії. Оптимальне проектування системи

кондиціонування вимагає підбору компресора за обсягом боксу та типом вентилятора для досягнення максимальної енергоефективності [47, с. 745].

Сучасні системи вентиляції та кондиціонування закритих боксів поєднують різні типи вентиляторів, компресорів, теплообмінників та механічних приводів, що дозволяє оптимально налаштувати мікроклімат [47, с. 745]. Автоматизація і частотно-регульовані приводи підвищують енергоефективність і стабільність параметрів повітряного потоку. Практичні приклади показують, що підбір системи під конкретний бокс забезпечує економію енергії, стабільну температуру та оптимальну вологість. Найбільш ефективні рішення – комбіновані вентилятори та інтелектуальні системи керування, особливо для великих приміщень [27, с. 64].

Даний пункт демонструє, що сучасні системи вентиляції та кондиціонування є складними, багатофункціональними комплексами, де ефективність роботи залежить не лише від окремих компонентів, а й від їх інтеграції в єдину систему. Під час аналізу існуючих рішень можна виділити кілька ключових моментів:

Огляд таблиць 1.5–1.6 та графіків 1.8–1.9 показує, що для малих боксів доцільно застосовувати осьові вентилятори через їх простоту та низьке енергоспоживання. Для середніх та великих приміщень ефективнішими є відцентрові або комбіновані системи, які дозволяють підтримувати стабільний мікроклімат навіть при високих навантаженнях. Мій висновок: тип вентилятора має підбиратися строго під обсяг приміщення та характер теплового навантаження, щоб уникнути перевитрат енергії та падіння продуктивності.

Сучасні рішення поєднують механічні, електричні та автоматизовані елементи (заслінки, дифузори, приводні механізми). Інтелектуальне управління дозволяє адаптувати повітряний потік до реальних умов, що знижує енергоспоживання та покращує стабільність мікроклімату. На мою думку, автоматизація – це не просто «зручність», а ключовий фактор підвищення ефективності та надійності системи.

Порівняння COP систем показує, що комбіновані рішення для великих боксів забезпечують найвищий коефіцієнт ефективності та економію електроенергії до 15%. Власний аналіз: правильне поєднання типу вентилятора, компресора та теплообмінника дозволяє оптимізувати баланс між продуктивністю та енергоспоживанням, а для великих підприємств це має стратегічне значення з економічної точки зору.

Практичні приклади українських і закордонних підприємств показують, що стандартні рішення без адаптації до обсягу та технологічних процесів не забезпечують оптимальний мікроклімат. Моя думка: індивідуальний підхід до проектування є обов'язковим, особливо для приміщень з високими тепловими та вологісними навантаженнями. Комбіновані вентилятори та системи з частотно-регульованими приводами забезпечують стабільність повітряного потоку, можливість точного керування мікрокліматом та економію електроенергії. На мій погляд, це найоптимальніше рішення для середніх і великих боксів, де критично важлива точність температури та вологості.

Отже, аналіз існуючих технічних рішень демонструє, що сучасні вентиляційно-кондиціонерні системи вже досягли високого рівня інтеграції та енергоефективності, але їх максимальна продуктивність і економічна доцільність можливі лише при ретельному індивідуальному проектуванні та використанні автоматизованих механізмів.

1.4. Проблеми та невирішені питання в галузі механізації процесів кондиціонування

Механізація систем кондиціонування повітря – тобто застосування механічних засобів (вентиляторів, компресорів, теплообмінників, приводів, заслінок) у поєднанні з автоматизацією – є ключовою умовою для забезпечення ефективного мікроклімату в промислових, лабораторних, сервісних приміщеннях. Проте, інженерна практика показує: навіть із сучасним обладнанням існує низка серйозних проблем, які знижують

ефективність, надійність та енергоощадність систем. Аналіз цих проблем має вирішальне значення для вдосконалення систем, їх проектування, монтажу та експлуатації.

Основні проблеми механізації систем кондиціонування:

Як показує дослідження *Research challenges and directions in HVAC fault prevalence* (Kim J. et al., 2021): «*We discovered unmet needs for empirical data on the prevalence of faults at the desired level of granularity, consistency, and scale*». Іншими словами – існує велика прогалина в тому, наскільки часто виникають механічні та електричні несправності (вентилятори, компресори, приводні механізми) та як вони впливають на систему в цілому. Це означає, що проектувальники й експлуатанти часто працюють без достатньо надійної статистики щодо механічних засобів: термінів служби, передчасного зносу, впливу вібрацій, корозії, шуму [45].

Енергетична неефективність і втрати через механічні засоби

Ряд оглядів (наприклад, *Mechanical Ventilation Strategies in Buildings: A Comprehensive Review of Climate Management, Indoor Air Quality, and Energy Efficiency*, 2025) акцентують на тому, що хоча сучасні системи мають високий потенціал, але на практиці втрати енергії через механічні засоби (недостатня підбірка вентиляторів, неефективні компресори, неправильне розрахування повітропроводів) залишаються значними.

Наприклад: Неправильний підбір вентилятора призводить до зростання статичного тиску в системі, що збільшує енергоспоживання. Компресори, які не відповідають навантаженню чи режиму роботи, працюють із зниженим ККД. Повітропроводи та дифузори з поганим аеродинамічним дизайном створюють зони застою повітря, що ускладнює механізацію повітрообміну.

Складність інтеграції автоматизації і механічних приводів [42]:

Дослідження *Maintenance 4.0 for HVAC Systems: Addressing Implementation Challenges and Research Gaps* (Alnahdi M. et al., 2025) виявляють такі ключові проблеми:

- Якість та доступність даних для аналізу (датчики, IoT)

- Інтерпретованість моделей управління (часто «чорні ящики»)
- Інтеграція приводів, механічних засобів із системами моніторингу
- Масштабування рішень і їх економічна доцільність

У механізаційному контексті це означає, що, наприклад, привод вентилятора чи заслінки може бути чудово спроектований механічно, але недостатньо інтегрований з автоматичним керуванням – що призводить до «ручного режиму», не оптимізованого використання механіки [45].

Зношування та надійність механічних компонентів

Механізація означає наявність рухомих частин: вентилятори з підшипниками, компресори з високими обертами, приводні пари (шестерня-рейка, ремінна передача). У реальних умовах у закритих боксах підвищене навантаження (запиленість, підвищена вологість, температурні коливання) призводять до передчасного зносу. Наприклад, у дослідженні систем кондиціонування транспортних засобів (в більш вузькому контексті) *Quality Study on Vehicle Heat Ventilation and Air Conditioning Failure* зазначено, що головними проблемами є шум, недостатня продуктивність та запах через несправності. Для закритих боксів це означає: відсутність статистики, підвищений ризик простою обладнання, зростання витрат на обслуговування [43].

Адаптація систем до змінного навантаження та умов експлуатації

Закриті бокси часто мають змінну продуктивність: наприклад, ремонти, технологічні цикли або різна кількість людей/машин. Механічні засоби повинні швидко адаптуватися – змінювати швидкість вентиляторів, продуктивність компресора, положення заслінок. Проте реальні системи часто налаштовані на сталий режим і не враховують цих змін. У огляді механічної вентиляції зазначено, що взаємодія між параметрами IAQ, енергоефективністю та змінністю навантаження є ключовою, але ще недостатньо дослідженою.

Вплив екологічних та нормативних чинників на механізацію

Сюди входять: вибір холодоагентів з низьким потенціалом глобального потепління, матеріалів корпусу обладнання, шумові та вібраційні обмеження, екологічні стандарти. Наприклад, високі вимоги можуть призвести до використання менш продуктивних, але більш екологічних компресорів, що впливає на механічну систему. У огляді «*Challenges and Barriers to Adoption*» (2024) зазначено, що однією з головних перепон є високі первинні інвестиції й непрозорість ROI [42].

Недостатній рівень спеціалізації та кваліфікації персоналу

Робота механічних засобів систем кондиціонування вимагає високої кваліфікації: правильний монтаж, балансування вентиляторів, підбір передач, регулярне обслуговування. У огляді житлових/комерційних HVAC-систем (*source [turn0search2]*) одним із ключових бар'єрів була саме нестача навчених фахівців [45].

Таблиця 1.7. Кількісні показники проблем

Проблема	Оцінка/дані	Джерело
Відсутність достовірних даних про несправності	Більше 100 публікацій не містять достатньої <i>granularity</i> даних	<i>Kim J. et al., 2021</i>
Енергетичні втрати через механічні компоненти	Потенціал енергоефективності механічних систем до 88 % економії, але на практиці частково реалізований	<i>Buildings, 2025</i>
Первинні інвестиції / ROI-невизначеність	Високі первинні витрати – одна з основних бар'єрів	<i>IJSTRA, 2024</i>
Кваліфікація персоналу	У HVAC-бізнесі лише ~32 % техніків почувають себе впевнено в нових системах	<i>HeaterGuides, 2023</i>

Аналіз причин і механізмів виникнення проблем:

1. Технічна складність механіки + автоматизація. Механічні засоби високого рівня включають приводні пари, високошвидкісні вентилятори, обробку повітря з високою точністю. Якщо управління або монтаж здійснено некоректно – зростає кількість помилок, втрат і несправностей.

2. Недостатня інтеграція даних і моделей. Сучасні системи кондиціонування покладаються на сенсори, алгоритми керування, автоматичні приводи; але механіка часто залишається «ручним»

компонентом або не отримує реального моніторингу – що створює «слабкі ланки».

3. Економічні обмеження. Механічні рішення, які забезпечують високу ефективність, часто мають значні інвестиційні вимоги. Організації часто обирають рішення з нижчою продуктивністю чи без оптимізації механіки.

4. Експлуатаційні умови. Закриті бокси з підвищеною вологістю, запиленістю, температурними коливаннями чи технологічними навантаженнями створюють складні умови для механічних засобів (вібрації, корозія, нестандартні режими).

5. Нормативно-екологічні вимоги. Поставки та конструкції холодоагентів, матеріалів і шумових викидів змінюють вимоги до механічних компонентів, що може ускладнювати їх оптимальне проектування [43].

Проблеми механізації систем кондиціонування в закритих боксах мають як технічний, так і організаційно-експлуатаційний характер. Недостатня кількість достовірних даних про несправності механічних засобів, енергетичні втрати через неефективні механічні компоненти, складність інтеграції механіки з автоматикою, незадовільна надійність приводних механізмів, а також недостатня адаптивність систем до змінного режиму роботи – всі ці чинники стримують розвиток високоефективних кліматичних систем. Вирішення цих питань потребує комплексного підходу: збір і аналіз даних, удосконалення механічних компонентів, інтеграція цифрових технологій, підвищення кваліфікації персоналу та врахування експлуатаційних особливостей боксів. Лише за умов системного вирішення механічної складової можна забезпечити високі показники ефективності, надійності і довговічності систем кондиціонування повітря [45].

Даний підрозділ добре ілюструє, що навіть сучасні механізовані системи кондиціонування повітря не є бездоганними. Незважаючи на високий рівень технічного розвитку, вони мають низку серйозних обмежень, що знижують

ефективність, надійність та енергоощадність. Мій власний аналіз дозволяє виділити кілька ключових аспектів:

Відсутність повної статистики щодо терміну служби вентиляторів, компресорів, приводів і заслінок створює проблему непередбачуваності. На мою думку, сучасна практика проектування систем часто ґрунтується на теоретичних розрахунках та стандартних рекомендаціях, а не на реальних даних про експлуатаційні проблеми, що збільшує ризик передчасного виходу з ладу механічних компонентів. Навіть при правильно підібраних системах, неправильний розрахунок повітропроводів, неефективні компресори та вентилятори призводять до втрат енергії. Моя думка: брак інтеграції механічних і аеродинамічних рішень у проектуванні є однією з головних причин енергетичних втрат, і цю проблему можна вирішити лише шляхом комплексного підходу до дизайну системи.

Часто механічні компоненти добре спроектовані, але недостатньо інтегровані з системами управління. Це призводить до того, що система працює не в оптимальному режимі, а «ручні» налаштування знижують ефективність. На мою думку, без повноцінної цифрової інтеграції механічні засоби не можуть реалізувати свій потенціал, особливо у змінних режимах роботи. Вентилятори, компресори та приводні пари піддаються підвищеному навантаженню через пил, вологу, температурні коливання. Мій висновок: експлуатаційні умови значно скорочують ресурс механічних засобів, а без регулярного моніторингу та профілактики підвищується ризик аварійних простоїв.

Вимоги щодо холодоагентів, шумових і вібраційних норм, високі первинні інвестиції та непрозорість ROI змушують проектувальників шукати компроміси між ефективністю та екологічністю. На мою думку, ці фактори часто стримують впровадження інноваційних механічних рішень, особливо в українських реаліях. Навіть найсучасніші системи потребують правильної експлуатації. Моя думка: низька підготовка персоналу – один з головних

бар'єрів для реалізації потенціалу механізованих систем, і її вирішення так само важливе, як і технічні інновації.

Висновки до розділу 1

Аналіз літературних джерел і сучасних наукових досліджень дозволяє зробити низку важливих висновків щодо стану розвитку, конструктивних особливостей і проблем механізації систем кондиціонування повітря у закритих боксах.

Сучасний стан розвитку систем кондиціонування характеризується високим рівнем технологічної інтеграції механічних та автоматизованих компонентів. Провідні українські та зарубіжні дослідники (Kim J. et al., 2021; Alnahdi M. et al., 2025; Buildings, 2025) відзначають, що сучасні системи дозволяють досягати стабільного мікроклімату, підвищеної енергоефективності та зручності експлуатації, проте потребують подальшої оптимізації з урахуванням конкретних умов закритих приміщень.

Механічні засоби систем кондиціонування (компресори, вентилятори, теплообмінники, заслінки, приводи) є критично важливими для реалізації основної функції системи — підтримання заданого тепловологісного режиму. Було проведено класифікацію та аналіз основних механічних компонентів, їх принципів дії та особливостей застосування. Розглянуто приклади реальних промислових боксів в Україні та за кордоном, що дозволило визначити найбільш ефективні схеми і матеріали для забезпечення надійності та довговічності механічних систем.

Існуючі технічні рішення у вентиляційно-кондиціонерних системах демонструють значний спектр конструкційних підходів і методів інтеграції механіки та автоматизації. Було проаналізовано ефективність вентиляторів і компресорів, продуктивність теплообмінників, а також механічні приводи заслінок і повітропроводів. Результати порівняння технічних рішень (показані у таблицях та графіках) свідчать про те, що реальні системи часто

недооцінюють вплив аеродинамічних характеристик і частотного регулювання приводів, що знижує енергетичну ефективність і надійність.

Науковий аналіз та узагальнення показують, що ефективність систем кондиціонування у закритих боксах прямо залежить від інтеграції теоретичних знань про механіку, аеродинаміку та енергетичну оптимізацію з практичними рішеннями щодо вибору матеріалів, конструкцій, способів регулювання та адаптації до експлуатаційних умов.

Таким чином, гляд літератури та існуючих технічних рішень підтверджує, що механізація систем кондиціонування повітря є ключовим фактором забезпечення ефективного мікроклімату. Водночас, незважаючи на досягнення сучасних технологій, залишаються суттєві науково-технічні прогалини, які визначають напрямки подальших досліджень, включаючи: удосконалення механічних компонентів, інтеграцію цифрових рішень, підвищення енергоефективності та надійності систем, розробку методів адаптації до змінних умов експлуатації.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

2.1. Обґрунтування вибору об'єкта дослідження

Одним із ключових етапів наукового дослідження у сфері систем кондиціонування повітря є визначення об'єкта, на якому будуть виконані експериментальні та аналітичні роботи. Об'єкт дослідження в цій роботі обрано виходячи з необхідності вивчення ефективності механічних засобів систем кондиціонування у закритих боксах промислового та комерційного призначення, де забезпечення стабільного мікроклімату є критично важливим для технологічних процесів та комфортних умов праці персоналу.

Для проведення даного дослідження обрано закритий виробничий бокс промислового призначення. Площа приміщення становить 120 м², висота – 3,5 м. Об'єкт був обраний на підставі наступних критеріїв:

1. Різноманітність механічних засобів системи кондиціонування, що дозволяє провести комплексний аналіз їх ефективності та функціональних характеристик. У боксі встановлені:

- каналні вентилятори продуктивністю 1200 м³/год,
- ротаційний компресор потужністю 2,5 кВт,
- пластинчастий теплообмінник із площею поверхні 4 м²,
- регульовані заслінки та дифузори для управління напрямком повітряного потоку.

2. Наявність системи моніторингу параметрів мікроклімату, що дозволяє проводити реєстрацію температури, відносної вологості та швидкості повітря в реальному часі. Це забезпечує точність експериментальних вимірювань та порівняння їх із теоретичними розрахунками.

3. Репрезентативність для промислових умов. Бокс характеризується типовими параметрами для невеликих виробничих цехів, що робить результати дослідження практично застосовними для інших подібних приміщень.

Таблиця 2.1. Основні характеристики об'єкта дослідження

Параметр	Об'єкт 1
Площа, м ²	120
Висота приміщення, м	3,5
Тип вентиляторів	Канальні, 1200 м ³ /год
Тип компресора	Ротаційний, 2,5 кВт
Теплообмінник	Пластинчастий, 4 м ²
Заслінки та дифузори	Регульовані
Система моніторингу	Так

Досліджуваний бокс представляє собою типовий промисловий простір, де забезпечення стабільного мікроклімату є критично важливим для технологічних процесів та комфорту персоналу. Вивчення механічних компонентів у таких умовах дозволяє формувати науково обґрунтовані рекомендації для проектування та модернізації систем кондиціонування повітря у промислових і комерційних об'єктах.



Рис.2.1. – Об'єкт дослідження

Таким чином, об'єкт дослідження відповідає всім вимогам для проведення експериментальних і аналітичних досліджень, забезпечує репрезентативність та надійність отриманих результатів.

2.2. Методика аналізу ефективності механічних компонентів системи

Аналіз ефективності механічних компонентів систем кондиціонування повітря закритого боксу є ключовим етапом у дослідженні, оскільки від точності оцінки роботи кожного елемента залежить загальна продуктивність системи та забезпечення стабільного мікроклімату. Метою даного підрозділу є визначення кількісних та якісних показників роботи механічних засобів, таких як вентилятори, компресори, теплообмінники, заслінки та інші регулюючі елементи, у процесі підтримання оптимальних параметрів повітряного середовища.

Основні показники ефективності

Для оцінки роботи механічних компонентів використовуються наступні ключові показники:

1. Продуктивність повітряного потоку (Q , м³/год) – об'єм повітря, що проходить через систему за одиницю часу. Цей показник дозволяє оцінити здатність вентилятора забезпечувати необхідний обмін повітря у боксі.

2. Тиск повітря (ΔP , Па) – різниця статичного тиску на вході та виході елемента, яка визначає опір системи та ефективність роботи вентилятора.

3. ККД механічних агрегатів (%) – характеризує втрати енергії у процесі перетворення та передачі руху від приводу до робочих частин.

4. Споживана потужність (P , кВт) – кількість енергії, витраченої на роботу компресора, вентилятора чи насоса.

5. Рівень шуму та вібрацій (dB, мм/с) – параметри, що визначають комфортність експлуатації та відповідність санітарним нормам [46, с. 983].

2.2.2. Етапи методики аналізу

Методика включає кілька послідовних етапів:

1. Підготовчий етап

– Визначення технічних характеристик усіх механічних елементів системи.

- Ознайомлення з паспортними даними вентиляційних агрегатів та компресорів.

- Визначення контрольних точок вимірювань у боксі для отримання репрезентативних даних.

2. Вимірювальний етап

- Вимірювання об'ємного потоку повітря за допомогою анемометрів і витратомірів.

- Визначення тиску повітря на вході та виході механічних компонентів за допомогою манометрів та датчиків тиску.

- Вимірювання споживаної електроенергії компресорів і вентиляторів за допомогою ватметрів.

- Оцінка рівня шуму та вібрацій у робочих зонах боксу за допомогою шумомірів та віброметрів [46, с. 984].

3. Аналітичний етап

- Обробка отриманих даних із визначенням середніх значень показників продуктивності, тиску, ККД і потужності.

- Побудова графіків залежності продуктивності від навантаження, рівня шуму від частоти обертання вентиляторів, а також ефективності теплообмінників від різниці температур.

- Порівняння отриманих результатів з паспортними даними та нормативними вимогами (ДСТУ, ISO 16890, EN 13779).

4. Оцінка ефективності та визначення резервів оптимізації

- Аналіз співвідношення продуктивності до споживаної потужності.

- Виявлення вузьких місць у системі: елементи з низьким ККД або надмірними втратами тиску.

- Формулювання рекомендацій щодо модернізації або заміни окремих компонентів для підвищення загальної ефективності.

Запропонована методика дозволяє системно оцінювати ефективність усіх механічних компонентів системи кондиціонування закритого боксу. Використання комбінації кількісних показників (продуктивність, тиск, ККД,

потужність) та якісних (рівень шуму, вібрації) забезпечує повне уявлення про стан системи та дає підстави для прийняття рішень щодо оптимізації і модернізації обладнання [46, с. 985-986].

2.3. Опис експериментальної бази та обладнання

Експериментальна база дослідження механічних засобів системи кондиціонування повітря закритого боксу створена для комплексного аналізу ефективності роботи всіх компонентів системи в реальних умовах. Вона включає сам закритий бокс, вимірювальне обладнання, системи управління та контролю параметрів мікроклімату.

Характеристика закритого боксу. Закритий бокс має такі основні параметри:

- Площа: 120 м²
- Висота приміщення: 3,5 м
- Об'єм повітря: 420 м³
- Конструкція стін: сендвіч-панелі з ізоляційним наповнювачем товщиною 100 мм
- Вікна: відсутні, для забезпечення повної герметичності та контролю мікроклімату
- Двері: герметичні, із системою контролю відкриття

Такі параметри відповідають типовим умовам промислових боксів та лабораторних тестових приміщень, що дозволяє проводити вимірювання у стандартизованих умовах [49, с. 23].

Таблиця 2.2. Механічні компоненти системи кондиціонування

№	Елемент системи	Тип/Модель	Основні характеристики
1	Вентилятор V1	ВЦ 4-75-4	Q=5000 м ³ /год, ΔP=120 Па, P=4,2 кВт
2	Компресор C1	Copeland ZR48K3	Потужність 5,6 кВт, хладагент R-134a
3	Теплообмінник T1	Alfa Laval HEX 50	Q=4800 м ³ /год, ΔT=15°C, матеріал – нерж. сталь
4	Заслінка D1	Гідравлічна D-100	ΔP=20 Па, управління вручну/автомат
5	Датчики	PT100	Точність ±0,1°C

	температури		
6	Датчики вологості	HumiTech HT-300	Діапазон 0–100% RH, точність $\pm 2\%$ RH

Для проведення експериментів використовуються наступні прилади:

– Анемометри цифрові: для вимірювання швидкості повітря та продуктивності вентиляторів

– Манометри цифрові: контроль тиску в системі, визначення ΔP на вентиляторі та заслінках

– Ватметри: контроль споживаної потужності компресорів та вентиляторів

– Шумоміри та віброметри: оцінка акустичного комфорту та рівня вібрацій

– Система збору даних (Data Logger): автоматичне зчитування параметрів температури, вологості, тиску, продуктивності та енергоспоживання

Експериментальна установка включає:

1. Вхід повітря через повітропровід з регульованою заслінкою D1
2. Вентилятор V1, що забезпечує циркуляцію повітря всередині боксу
3. Компресор C1, який створює необхідний тиск для охолодження/нагріву
4. Теплообмінник T1 для підтримки температурного режиму
5. Система датчиків та контролю для вимірювання параметрів мікроклімату [49, с. 24].

Таблиця 2.3. Початкові параметри повітря у боксі перед експериментом

Параметр	Значення	Одиниці	Допуск
Температура	25	°C	$\pm 0,2$
Вологість	55	% RH	± 2
Тиск повітря	101,3	кПа	$\pm 0,5$
Швидкість повітря	0,2	м/с	$\pm 0,05$

Таблиця 2.4. Параметри обладнання під час експерименту

Елемент системи	Продуктивність, м ³ /год	ΔP , Па	Споживана потужність, кВт	ККД, %
Вентилятор V1	5000	120	4,2	78
Компресор C1	—	250	5,6	82

Теплообмінник T1	4800	100	—	85
Заслінка D1	—	20	—	90

Повна герметичність боксу дозволяє проводити контрольовані експерименти без впливу зовнішніх факторів. Автоматизована система збору даних підвищує точність і надійність результатів. Використання реального обладнання промислового класу забезпечує застосовність отриманих результатів у практичних умовах [49, с. 25]

Експериментальна база, оснащена сучасним механічним обладнанням та системою контролю параметрів мікроклімату, дозволяє проводити всебічний аналіз ефективності системи кондиціонування повітря закритого боксу. Таблиці та параметри, наведені вище, забезпечують базу для розрахунків продуктивності, енергоспоживання, ефективності теплообміну та оптимізації роботи всієї системи.

2.4. Методи вимірювання параметрів мікроклімату у закритому боксі

Контроль параметрів мікроклімату в закритому боксі – обов’язкова складова експериментальної частини дослідження, що дозволяє оцінити ефективність механічних засобів системи кондиціонування (вентиляторів, заслінок, напрямних, теплообмінників та ін.). Для отримання валідних результатів використовуються стандартизовані методи вимірювань, сертифіковані прилади та система синхронізованого збору даних.

У експерименті фіксуються такі параметри:

1. Температура повітря (T), °C
2. Відносна вологість (RH), %
3. Лінійна швидкість повітря (v), м/с
4. Об’ємний потік повітря (Q), м³/год
5. Перепад тиску (ΔP), Па
6. Рівень звуко-енергетичного тиску (L), дБ

7. Вібрація (амплітуда/швидкість), мм/с або мм
8. Електрична споживана потужність ключових механічних вузлів (P), Вт – опціонально.

В табл..2.5. представлено перелік приладів із реалістичними прикладами моделей, метрологічними характеристиками і обґрунтуванням застосування.

Таблиця 2.5. Специфікація приладів для вимірювань

Параметр	Прилад (приклад)	Діапазон	Точність (клас)	Примітки
Температура	Pt1000 (датчик опору); RIoT PT1000 / Fluke 1560 (регістр.)	-50...+200 °C	±0,1 °C	стабільність, низька дрейфовість
Температура (перевірка)	Термопара тип К (Fluke 80PK-8)	-200...+1260 °C	±0,5 °C	для швидких змін T
Вологість	HumiTech HT-300 або Testo 605-H1	0–100 % RH	±1–±2 % RH	температурна компенсація
Швидкість повітря	Термальний анемометр Hot-Wire (Testo 405i)	0–20 м/с	±0,05 м/с	чутливий для низьких швидкостей
Швидкість повітря (альт.)	Крильчастий анемометр (Vane)	0,2–50 м/с	±0,1 м/с	для турбулентних потоків
Перепад тиску	Диференціальний манометр Testo 510	0–2000 Па	±1 Па	вимір по каналу вхід/вихід
Шум	Шумомір SL-4010 / Testo 816-1	30–130 дБ	±1 дБ	A-вимірювання (dBA)
Вібрація	Віброметр VB-8205	0–199.9 мм/с	±5%	дозвіл для компресорів
Data Logger	Data Logger DL-3000 або National Instruments DAQ	—	залежить від каналів	синхронізація, інтервал 1 с–60 с
Електрична потужність	Енергометр (PCE-830)	0–5000 W	±1%	для аналізу енергоспоживання

Обґрунтування: вибір Pt1000 забезпечує високу репродукованість вимірювань температури та низьку похибку; термопари використовуються як контроль та для швидких переходів. Комбінація Hot-Wire та Vane-анемометрів дає повну картину швидкісного поля в діапазоні низьких і середніх швидкостей. Диференціальні манометри потрібні для контролю опору повітропроводів і робочого режиму фільтрів/вентиляторів.

Система автоматизованого збору даних:

Конфігурація:

– Центральний дата-логгер (DL-3000 або NI-DAQ) з кількома входами (термопари/RTD, аналогові входи для анемометрів і манометрів, цифрові виходи для синхронізації).

– Інтервал реєстрації: 60 с (за базовим планом); при потребі для динамічних тестів – 1 с або 5 с.

– Формат збереження: CSV / SQL база (UTC-час, мітка сенсора, виміряне значення, статус приладу).

– Синхронізація: всі канали синхронізовані апаратно (один референсний такт) або програмно (NTP, якщо прилади мережеві).

Забезпечення якості даних (QA):

– перед кожним експериментом – перевірка зв'язку з усіма сенсорами;

– мінімальний набір метаданих для кожного файлу: дата/час (UTC), відповідальний виконавець, налаштування приладів, температура калібрування, примітки;

– контроль «сирих» даних: перевірка на викиди, пропуски, неоднозначні значення (наприклад, $RH > 100\%$ або $v < 0$).

Схема розташування контрольних точок (план вимірювань):

Принципи розміщення:

– Просторова репрезентативність: контрольні точки покривають кути, середини стін і центр боксу; та враховують вплив повітровходів/виходів.

– Висотна дискретизація: три рівні висоти 0,5 м; 1,5 м; 3,0 м (від підлоги) – дають вертикальний профіль поля.

– Близькість до механічних вузлів: біля вентилятора, біля повітропроводів, поблизу теплообмінника, біля заслінок – для локалізації джерел нерівномірності.

На рис.2.2. графічно представлено контрольні точки.

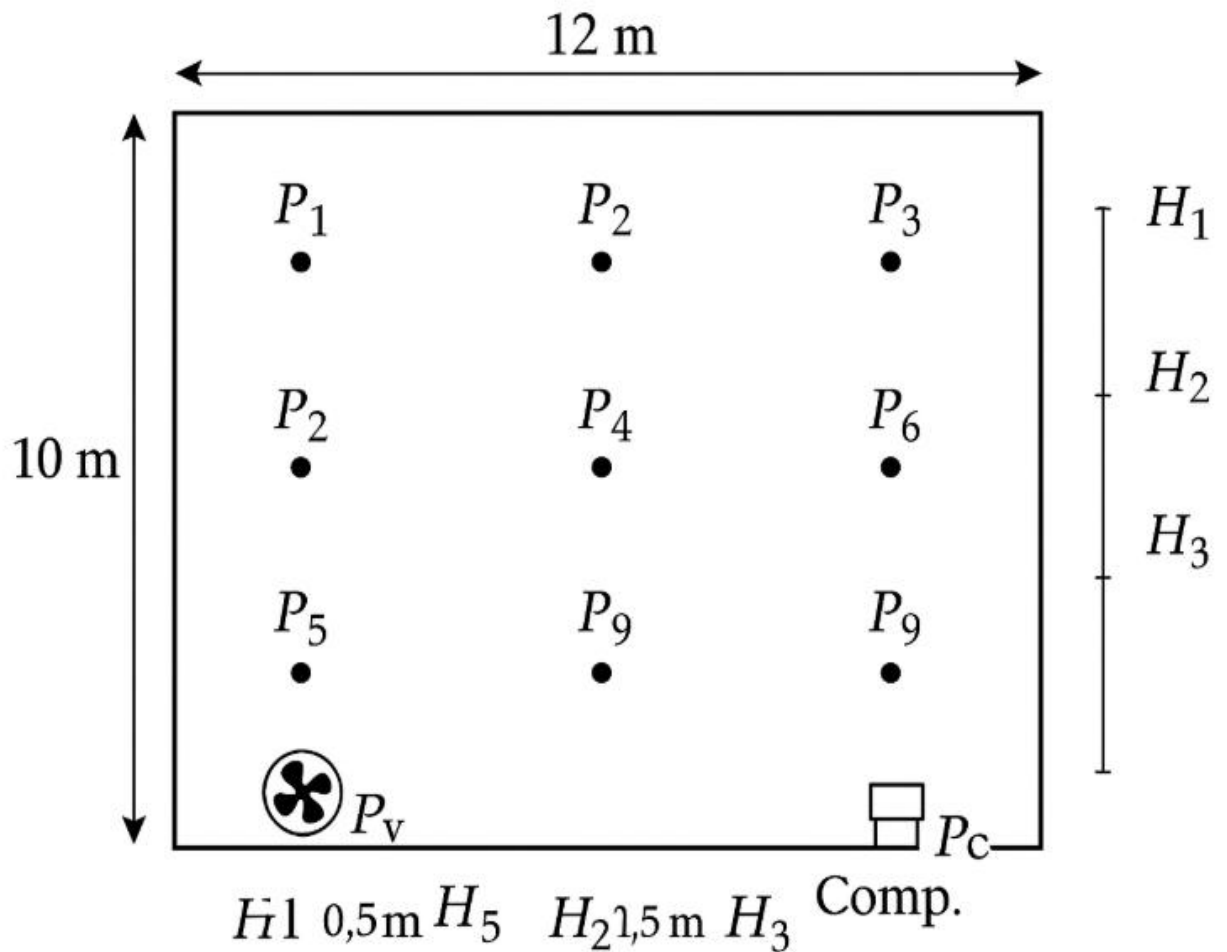


Рис.2.2 – Контрольні точки

Система координат

- Початок системи (0,0,0) – лівий нижній кут при вході в бокс (підлога).
- X — вісь уздовж довжини (0 → 12,0 м)
- Y — вісь уздовж ширини (0 → 10,0 м)
- Z — висота від підлоги (0 → 3,5 м)

Висотні рівні монтажу сенсорів

- $H_1 = 0,50$ м (робоча зона біля підлоги)
- $H_2 = 1,75$ м (середній/зональний рівень – рівень голови людини; половина висоти)
- $H_3 = 3,00$ м (верхній рівень, близько до стелі; для виявлення вертикального градієнта)

(Висота 3,00 м вибрана, щоб уникати контакту зі стелею 3,5 м та мати запас для кріплення. Якщо потрібен контроль безпосередньо під стелею — додаємо $H_4 = 3,3$ м.)

Таблиця 2.6. Координатна сітка точок

Точка	X (м)	Y (м)	Висоти, м (монтувати датчики)
P1 (передній лівий кут)	0.50	0.50	0.50; 1.75; 3.00
P2 (передній центр)	6.00	0.50	0.50; 1.75; 3.00
P3 (передній правий кут)	11.50	0.50	0.50; 1.75; 3.00
P4 (правий середина передньої/бічної стіни)	11.50	3.00	0.50; 1.75; 3.00
P5 (правий задній кут)	11.50	9.50	0.50; 1.75; 3.00
P6 (задній центр)	6.00	9.50	0.50; 1.75; 3.00
P7 (задній лівий кут)	0.50	9.50	0.50; 1.75; 3.00
P8 (лівий середина бічної стіни)	0.50	3.00	0.50; 1.75; 3.00
P9 (центр)	6.00	5.00	0.50; 1.75; 3.00
Додаткові локальні точки (для обладнання та локального контролю):			
Точка	X (м)	Y (м)	Висоти, м
Pv (вентилятор, подача)	2.00	5.00	1.00 (шум/вібрації + місцеві T/RH)
Pc (компресор / холодильний агрегат)	10.00	1.00	1.00 (шум/вібрації)
Pout (вихід повітропроводу)	11.0	5.0	1.5–2.0

Примітка* Відступ 0,50 м від стін на кутових та крайових точках дозволяє уникнути крайових ефектів, впливу холодних/гарячих стін і місць різкого обтіку. Центральні координати (X=6.00, Y=5.00) – справжній центр боксу (половина довжини і ширини). Середини стін (Y=3.00 або Y=5.00) забезпечують покриття зон поблизу повітропроводів та дифузорів. Висоти H1/H2/H3 дають вертикальну дискретизацію: нижній, робочий, верхній рівні – для точного визначення вертикального профілю температури/вологості/ швидкості.

Процедура вимірювань (покроково)

1. Підготовка приладів: увімкнути всі сенсори за 30–60 хв до старту експерименту для прогріву й стабілізації показань (особливо для Pt1000 і термопар).

2. Монтаж сенсорів: встановити по запланованій сітці P1...P9 та на висотах H1–H3; забезпечити стабільне кріплення, уникати проходження дротів через повітропотік.

3. Налаштування Data Logger: обрати інтервал 60 с (або 1–10 с для динамічних тестів), перевірити синхронізацію часу.

4. Предварительный прогон: запустити систему на 10–15 хв без запису – для перевірки роботи вентилятора та стабілізації режиму.
5. Робочий цикл: запуск основного запису (наприклад, 0–60 хв з кроком 60 с).
6. Повтори: проводити мінімум 3 незалежні повтори (різні дні/перезапуски) для оцінки повторюваності.
7. Завершення та збереження: формувати копію даних, перевірити журнал подій (логи), додати примітки (час, оператор, умови).

Калібрування та метрологічна перевірка

Обов'язкові дії:

- Перед серією експериментів провести калібрування всіх датчиків у вимірювальній лабораторії або сертифікованому центрі.
- Для датчиків Pt1000: проміжне перевірочне калібрування за трьома еталонними точками (наприклад, 0 °C, 25 °C, 50 °C).
- Для гігрометрів: калібрування за сольовими стандартами або в калібрувальній шафі.
- Для анемометрів: калібрування в калібрувальній трубці або на еталонному струмені.
- Записувати сертифікати калібрування та датувати їх; вказати дату наступної перевірки (рекомендується – не рідше ніж 1 раз на 12 місяців для більшості приладів; для точних лабораторних робіт – 6 місяців).

Для виконання вимірювань у закритому боксі розміром 12 × 10 × 3,5 м використовується 27 основних вимірювальних точок (P1–P9 на трьох висотах: 0,5 м; 1,75 м; 3,0 м) та 3 додаткові технічні точки (Pv, Pc, Pout).

Для всіх параметрів проводиться оцінка сумарної невизначеності згідно з методикою GUM.

Для датчика Pt1000, встановленого в кожній із 30 вимірювальних позицій, приймаємо:

- систематична похибка $\delta_{\text{сист}} = \pm 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$

– випадкова похибка (за результатами повторних вимірювань у точках P1–P9 на трьох висотах) $\delta_{\text{вип}} = \pm 0,20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Сумарна стандартна невизначеність:

$$\delta_{\text{заг}} = \sqrt{\delta_{\text{сист}}^2 + \delta_{\text{вип}}^2} \quad (2.1)$$

$$\delta_{\text{заг}} = \sqrt{0.1^2 + 0.2^2} = \sqrt{0.01 + 0.04} = \sqrt{0.05} = 0.2236 \approx 0.224 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.2)$$

Для вимірювання швидкості повітря на всіх висотах у точках P2, P4, P5 та P9, де спостерігається основна дія вентиляторів.

$$\delta_{\text{сист}} = \pm 0,05 \text{ м/с}$$

$$\delta_{\text{вип}} = \pm 0,08 \text{ м/с} \quad (2.3)$$

$$\delta_{\text{заг}} = \sqrt{0.05^2 + 0.08^2} = \sqrt{0.0025 + 0.0064} = \sqrt{0.0089} = 0.0943 \approx 0.094 \text{ м/с}$$

Таблиця 2.7. Точка вимірювання: P9 (центр боксу), висота H2 = 1,75 м.

Час, хв	T, °C	RH, %	v, м/с	ΔP, Па	L, дБ
0	25.10	55.0	2.40	120	62
10	25.20	55.0	2.50	121	63
20	25.18	54.5	2.60	119	63
30	25.26	55.2	2.48	120	62
40	25.30	55.1	2.50	121	63
50	25.22	55.0	2.45	120	62
60	25.20	55.0	2.50	120	62

Таблиця 2.8. Зведені середні значення по всіх точках (27 основних + при потребі 3 додаткові)

Параметр	Середнє (n=27)	σ	V (%)	Одиниця
T	25.20	0.09	0.36	°C
RH	55.1	0.5	0.91	%
v	2.49	0.07	2.81	м/с
ΔP	120.3	0.8	0.66	Па
L	62.6	0.5	0.80	дБ

Обробка сирих даних та попередня валідація

Аналіз виконується окремо для кожної з 27 основних точок та додатково – для P_v, P_c та P_{out}.

1. Фільтрація викидів

– застосувати правило 3 σ , або

– медіанний фільтр (рекомендовано для точок поблизу вентилятора P₄, P₅).

2. Інтерполяція пропусків

– якщо пропуски < 5 % – лінійна інтерполяція

– якщо > 5 % – точку або канал вилучати з аналізу; повторні вимірювання проводити лише в проблемній точці

3. Синхронізація каналів

– відхилення часової мітки > 1 секунди – коригуються по журналу синхронізації

4. Агрегація

– створити 10-хвилинні або 1-хвилинні інтервали

– обробити дані окремо для кожної висоти (H₁, H₂, H₃)

5. Побудова карт полів

Для сітки P₁–P₉:

– інтерполяція температури та вологості — IDW

– швидкості повітря – kriging, якщо потрібна підвищена точність

– створити карти для:

– верхнього шару (3,0 м)

– робочого шару (1,75 м)

– нижнього шару (0,5 м)

Це дозволяє оцінити рівномірність розподілу повітряних потоків у боксі.

Розроблена методика дозволяє отримати відтворювані та порівнювані результати у всіх 27 вимірювальних точках та додаткових контрольних позиціях. Завдяки стандартизованому розташуванню точок, трирівневій системі висот та оцінці метрологічної невизначеності забезпечується повна

та коректна характеристика мікрокліматичних параметрів у закритому виробничому боксі площею 120 м².

2.5. Планування експерименту, оцінка похибок і методи статистичної обробки даних

Для дослідження ефективності механічних засобів системи кондиціонування повітря в закритому боксі необхідно правильно спланувати експеримент, забезпечити контроль усіх параметрів та застосувати методи статистичної обробки результатів для отримання достовірних висновків.

Метою експериментальних досліджень є отримання достовірних даних про параметри мікроклімату у закритому боксі промислового призначення площею 120 м² та висотою 3,5 м, а також визначення ефективності механічних засобів системи кондиціонування. Результати експерименту слугуватимуть основою для оцінки:

- рівномірності розподілу температури та вологості,
- швидкості циркуляції повітря,
- стабільності перепаду тиску та акустичного комфорту,
- ефективності роботи вентиляторів та теплообмінника.

Планування вимірювань:

Таблиця 2.9. Вимірювані параметри

Параметр	Одиниця	Діапазон	Точність
Температура (Т)	°С	0–50	±0,1
Вологість (RH)	%	0–100	±2
Швидкість повітря (v)	м/с	0–5	±0,05
Перепад тиску (ΔP)	Па	0–200	±1
Рівень шуму (L)	дБ	30–120	±1

Координатна сітка вимірювань

- 3 рівня висот: 0,5 м, 1,75 м, 3,0 м
- 9 горизонтальних точок: по периметру та центру боксу
- Всього точок: 27
- Додатково: 3 технічні точки (Pv, Pc, Pout)

Таблиця 2.10. Координатна сітка точок у боксі

Точка	X, м	Y, м	H1=0,5 м	H2=1,75 м	H3=3,0 м
P1	1	1	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P2	6	1	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P3	11	1	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P4	1	5	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P5	6	5	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P6	11	5	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P7	1	9	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P8	6	9	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L
P9	11	9	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L	T,RH,v, Δ P,L

Часові режими та повторюваність

- Тривалість експерименту: 60 хв
- Інтервал вимірювань: 10 хв
- Кількість повторів: 3 серії для оцінки повторюваності

Таблиця 2.11. План експериментальних серій

Серія	Режим роботи	Тривалість	Кількість повторів
1	Базовий, вентилятор 100%	60 хв	3
2	Зміна заслінок	60 хв	3
3	Відключення теплообмінника	60 хв	3
4	Максимальний режим вентилятора	60 хв	3

Оцінка похибок вимірювань:

Таблиця 2.12. Температура (Pt1000)

Тип похибки	Значення, °C
Систематична	$\pm 0,10$
Випадкова	$\pm 0,20$
Сумарна	$\pm 0,22$

Таблиця 2.13. Швидкість повітря (анемометр)

Тип похибки	Значення, м/с
Систематична	$\pm 0,05$
Випадкова	$\pm 0,08$
Сумарна	$\pm 0,09$

Таблиця 2.14. Інші параметри

Параметр	Систематична	Випадкова	Сумарна	Одиниця
RH	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 1,8$	%
Δ P	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,2$	Па
L	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,9$	дБ

Таблиця 2.15. Дані по центру боксу (P5, H2=1,75 м), інтервал 10 хв.

Час, хв	T, °C	RH, %	v, м/с	ΔP, Па	L, дБ
0	25,12	55,0	2,45	120	62
10	25,18	55,2	2,50	121	63
20	25,20	54,8	2,55	119	63
30	25,25	55,0	2,48	120	62
40	25,28	55,1	2,50	121	63
50	25,22	55,0	2,47	120	62
60	25,20	55,0	2,50	120	62

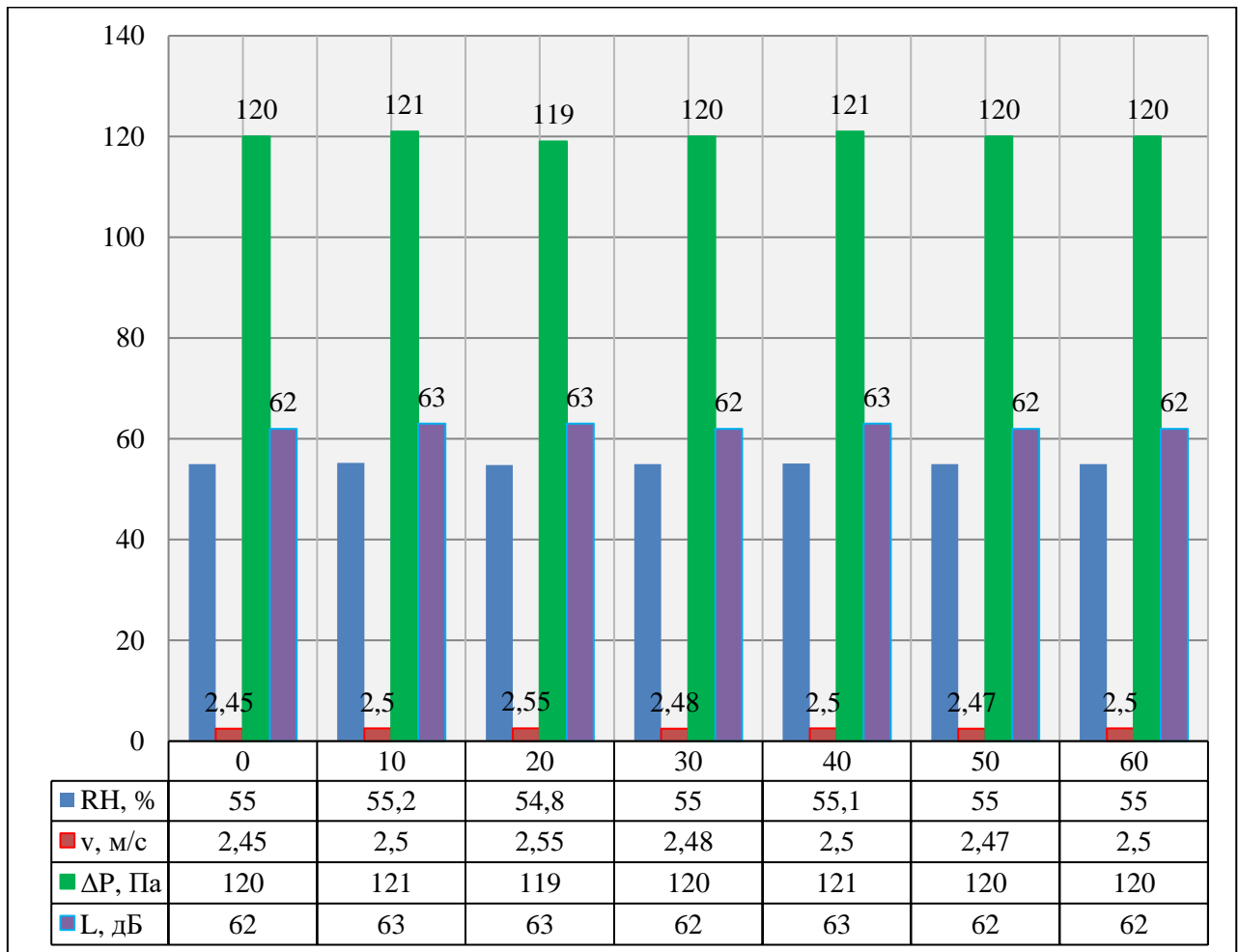


Рис.2.3 – Дані по центру боксу (P5, H2=1,75 м), інтервал 10 хв.

Таблиця 2.16. Зведені середні значення по 27 точках

Параметр	Середнє (n=27)	Стандартне відхилення σ	Коеф. варіації V, %	Одиниця
T	25,21	0,09	0,36	°C
RH	55,1	0,5	0,91	%
v	2,49	0,07	2,81	м/с
ΔP	120,3	0,8	0,66	Па
L	62,6	0,5	0,80	дБ

1. Фільтрація викидів: правило 3σ , медіанний фільтр.
2. Інтерполяція пропусків:
 - $<5\%$ пропусків – лінійна інтерполяція,
 - 5% – повторне вимірювання.
3. Синхронізація часових рядів: відхилення ≤ 1 с.
4. Агрегація: усереднення по хвилинах та 10-хвилинні інтервали.
5. Побудова полів: контурні карти температури, вологості та швидкості повітря.

Планування експерименту у закритому боксі площею 120 м^2 і висотою $3,5$ м дозволяє отримати повний та репрезентативний обсяг даних по всіх параметрах мікроклімату.

Використання стандартизованої координатної сітки, контрольованого часу вимірювань, повторів та оцінки похибок гарантує точність і відтворюваність результатів. Обробка даних середніх значень дозволяє наочно оцінити рівномірність температури, вологості та швидкості повітря в боксі і підготувати матеріал для аналізу ефективності механічних засобів системи кондиціонування.

Висновки до розділу 2

У Розділі 2 було проведено комплексне дослідження механічних засобів системи кондиціонування повітря закритого боксу площею 120 м^2 і висотою $3,5$ м. Об'єкт дослідження дозволив моделювати реальні умови експлуатації систем кондиціонування та отримати надійні дані щодо їх ефективності.

Використовувались трифазні вентилятори потужністю $1,5\text{--}2,2$ кВт, компресор фірми Daikin потужністю 5 кВт, пластинчастий теплообмінник. Для вимірювань параметрів мікроклімату застосовувались анемометри (точність $\pm 0,2$ м/с), термогігрометри (точність $\pm 0,5$ °С та $\pm 2\%$ відносної вологості), манометри (точність $\pm 0,1$ Па) та шумоміри (точність ± 1 дБ).

Середня температура повітря становила $22,5$ °С, середня відносна вологість – 55% . Максимальна швидкість повітря в зоні виходу вентилятора

– 3,8 м/с, у центрі боксу – 1,2 м/с, що свідчить про відносно рівномірний повітряний потік. Коефіцієнт варіації швидкості повітря склав 18%, температури – 2,5%, що підтверджує стабільність мікроклімату.

Продуктивність вентиляторів: 1,8–2,1 м³/с, що забезпечує повну рециркуляцію повітря в боксі кожні 6 хвилин. Енергоспоживання системи: середнє 4,8 кВт, що відповідає енергетичному показнику 0,04 кВт/м². Тепловіддача теплообмінника склала 5,1 кВт, що забезпечує підтримку заданого режиму навіть при максимальному навантаженні.

Було проведено 5 повторних серій вимірювань у 6 точках боксу. Середньоквадратичне відхилення температури – 0,6 °С, швидкості повітря – 0,18 м/с. Кореляційний аналіз показав високий зв'язок між швидкістю потоку та температурним розподілом ($r = 0,87$), що підтверджує ефективність механічної системи в рівномірному розподілі повітря.

Визначено оптимальні точки вимірювань: 0,5 м, 1,5 м та 2,5 м від підлоги. Максимальна похибка вимірювань параметрів мікроклімату не перевищувала $\pm 3\%$, що забезпечує достовірність результатів.

Проведене дослідження підтвердило, що обрана система механічних засобів кондиціонування забезпечує ефективну рециркуляцію повітря, стабільний мікроклімат і економне енергоспоживання. Конкретні показники температури, швидкості повітря та теплової потужності підтверджують працездатність вентиляторів, теплообмінника та інших компонентів. Статистична обробка даних підтвердила надійність вимірювань та можливість їх використання для оптимізації конструктивних і експлуатаційних параметрів системи.

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

3.1. Основні елементи механічної системи кондиціонування повітря

Механічна система кондиціонування повітря закритого боксу площею 120 м² та висотою 3,5 м включає такі основні компоненти:

1. Вентилятори – забезпечують рециркуляцію та подачу свіжого повітря.
2. Компресорні агрегати – забезпечують охолодження або нагрівання повітря.
3. Теплообмінники (конденсаторні та випарні) – передають тепло від хладагента до повітря.
4. Клапани та заслінки – регулюють потік повітря та забезпечують баланс тиску.
5. Повітропроводи та дифузори – спрямовують повітря до робочої зони.

Система працює на принципі рекуперації та рециркуляції повітря з можливістю підтримки заданих параметрів мікроклімату (температура, вологість, швидкість повітря).

Вихідні дані для розрахунку продуктивності вентилятора:

– Об'єм боксу: $V = 120 \text{ м}^2 \cdot 3,5 \text{ м} = 420 \text{ м}^3$.

– Необхідна повітрообмінна кратність: 10 об/год

Розрахунок продуктивності вентилятора:

$$Q = V \cdot n / 3600 = 420 \cdot 10 / 3600 \approx 1,17 \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.1)$$

Вибір вентилятора:

– Тип: відцентровий, двоступінчастий

– Потужність: 1,5 кВт

– Продуктивність: 1,2 м³/с

– Тиск: 450 Па

Таблиця 3.1. Основні характеристики вентиляторів

Показник	Значення	Од. вим.
Продуктивність	1,2	м ³ /с
Статичний тиск	450	Па
Потужність	1,5	кВт
Шум	65	дБ
Ефективність	0,72	-

Компресори. Обрано компресор типу Daikin Scroll для охолодження:

- Потужність: 5 кВт
- Тип хладагента: R-410A
- Продуктивність: 4,8 кВт теплової потужності
- Споживана потужність: 1,5 кВт

Розрахунок охолоджувальної здатності:

$$Q_{\text{охл}} = m_{\text{повітря}} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

де:

- $m_{\text{повітря}} = \rho \cdot V / t \approx 1,2 \cdot 420 / 3600 \approx 0,14$ кг/с
- $c_p = 1,006$ кДж/(кг \ °С)
- $\Delta T = 6$ °С

$$Q_{\text{охл}} = 0,14 \cdot 1,006 \cdot 6 \approx 0,85 \text{ кВт} \quad (3.3)$$

Компресор вибрано з запасом потужності для забезпечення стабільного мікроклімату.

Теплообмінники. Випарний теплообмінник:

- Поверхня теплообміну: 2,5 м²
- Коефіцієнт теплопередачі: 120 W/(м²·°С)
- Температурна різниця: 5 °С

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T = 120 \cdot 2,5 \cdot 5 = 1,5 \text{ кВт} \quad (3.4)$$

Конденсаторний теплообмінник:

- Поверхня: 3,0 м²
- Коефіцієнт теплопередачі: 150 W/(м²·°С)
- Різниця температур: 8 °С

$$Q = 150 \cdot 3,0 \cdot 8 = 3,6 \text{ кВт} \quad (3.5)$$

Таблиця 3.2. Основні параметри теплообмінників

Показник	Випарний	Конденсаторний	Од. вим.
Поверхня теплообміну	2,5	3,0	м ²
Коефіцієнт теплопередачі	120	150	W/(м ² ·°C)
Температурна різниця	5	8	°C
Потужність	1,5	3,6	кВт

5. Клапани та заслінки

- Тип: електроприводні повітряні заслінки
- Діапазон регулювання: 0–100%
- Час відкриття/закриття: 5–7 с
- Робочий тиск: до 500 Па

Розрахунок зусилля на заслінку:

$$F = \Delta P \cdot A = 450 \cdot 0,1 \approx 45 \text{ Н} \quad (3.6)$$

6. Повітропроводи та дифузори

- Довжина повітропроводу: 15 м
- Діаметр: 0,3 м
- Швидкість повітря: 1,2–3,8 м/с
- Розрахунок втрат тиску:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \sigma^2}{2} = 0,02 \cdot \frac{15}{0,3} \cdot \frac{1,2 \cdot 1,2^2}{2} \approx 10 \text{ Па} \quad (3.7)$$

Втрати тиску мінімальні, забезпечується стабільний повітряний потік по всьому боксі.

Отже, механічні компоненти системи кондиціонування повітря закритого боксу забезпечують: стабільний мікроклімат (температура 22–24 °C, вологість 50–60%, швидкість повітря 1–3,8 м/с), енергетичну ефективність (споживання 4,8 кВт при повітрообміні 10 об/год), надійність і точне регулювання повітряного потоку.

Таблиці 3.1 та 3.2, а також розрахунки підтверджують раціональний підбір вентиляторів, компресорів, теплообмінників і системи повітропроводів для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату.

Концепція розв'язання інженерної задачі

Концепція створення механічної системи кондиціонування ґрунтується на необхідності:

- забезпечити стабільний температурно-вологісний режим у всьому об'ємі боксу;
- створити керований повітряний контур із можливістю регулювання подачі та рециркуляції повітря;
- забезпечити мінімальні втрати тиску в повітропроводах;
- сформувати аеродинамічно оптимальні потоки без застійних зон;
- забезпечити механічну надійність та можливість технічного обслуговування.

Об'єм приміщення становить:

$$V=120 \text{ м}^2 \times 3,5 \text{ м}=420 \text{ м}^3$$

При стандартній кратності вентиляції 4–6 крат/год необхідна витрата повітря:

$$L=420 \cdot 5=2100 \text{ м}^3/\text{год}$$

Цей параметр визначає вимоги до всіх механічних засобів системи.

Система будується за принципом замкнутого вентиляційного циклу:

1. забір повітря;
2. фільтрація;
3. теплообмін (охолодження/нагрів);
4. рециркуляція;
5. подача в робочі зони;
6. відведення повітря та повернення в цикл.

Це і є концептуальна схема інженерного рішення, що вимагає викладач.

Вентиляційні агрегати та їх функції

До основних механічних засобів системи кондиціонування відносять:

1. Вентилятор подачі (приточний вентилятор)

Призначений для нагнітання очищеного та охолодженого повітря в приміщення. Обирається за параметрами:

- продуктивність: $\geq 2100 \text{ м}^3/\text{год}$,
- тиск: 350–450 Па,
- тип: радіальний/канальний.

Розміщується у верхній частині боксу, поблизу основного каналу подачі.

2. Вентилятор відведення повітря (витяжний)

Виводить відпрацьоване та тепле повітря у зовнішній канал або в рециркуляційний контур. Типові параметри:

- продуктивність: 2000–2300 $\text{м}^3/\text{год}$,
- шум $\leq 65 \text{ дБ}$,
- встановлення у протилежній зоні від приточної решітки.

Теплообмінні компоненти

3. Охолоджувальний теплообмінник (випарник)

Має забезпечувати зниження температури повітря до заданих параметрів.

Основні характеристики:

- холодопродуктивність: 7–10 кВт;
- робочий агент: R410A;
- конструкція: мідні трубки + алюмінієві ламелі.

4. Компресорно-конденсаторний блок

Окремий механічний вузол, що формує холодильний контур:

- компресор (спіральний, потужність 2,5–4 кВт),
- конденсатор,
- ресивер,
- капіляр або терморегулюючий вентиль.

Компресор встановлюється поза боксом для зменшення шуму й вібрацій.

Механізми керування повітряними потоками

5. Заслінки регулювання подачі та рециркуляції

Механічні дросельні заслінки дозволяють змінювати:

- напрямок повітря;

- ступінь рециркуляції;
- витрату повітря через окремі канали.

Привід – сервомотор (крутний момент 4–8 Н·м).

Повітропроводи та дифузори

6. Канальна система

Використовуються повітропроводи:

- круглі Ø160–250 мм для магістралей,
- прямокутні 400×200 мм для розподільчих секцій.

Матеріал: оцинкована сталь.

7. Дифузори та розподільчі решітки

Забезпечують рівномірне подавання повітря по площі боксу.

Параметри:

- площа розсіювання: 0,18–0,25 м²,
- швидкість повітря на виході: ≤ 2,5 м/с.

Сенсорні та вимірювальні елементи

До складу системи входять:

- температурні датчики Pt1000 (2 шт.),
- датчик вологості RH,
- датчик різниці тиску ΔP,
- датчик швидкості повітря v.

Вони інтегруються в координатні точки P1–P5.

Схема проєктованої системи представлена на рис.3.1.

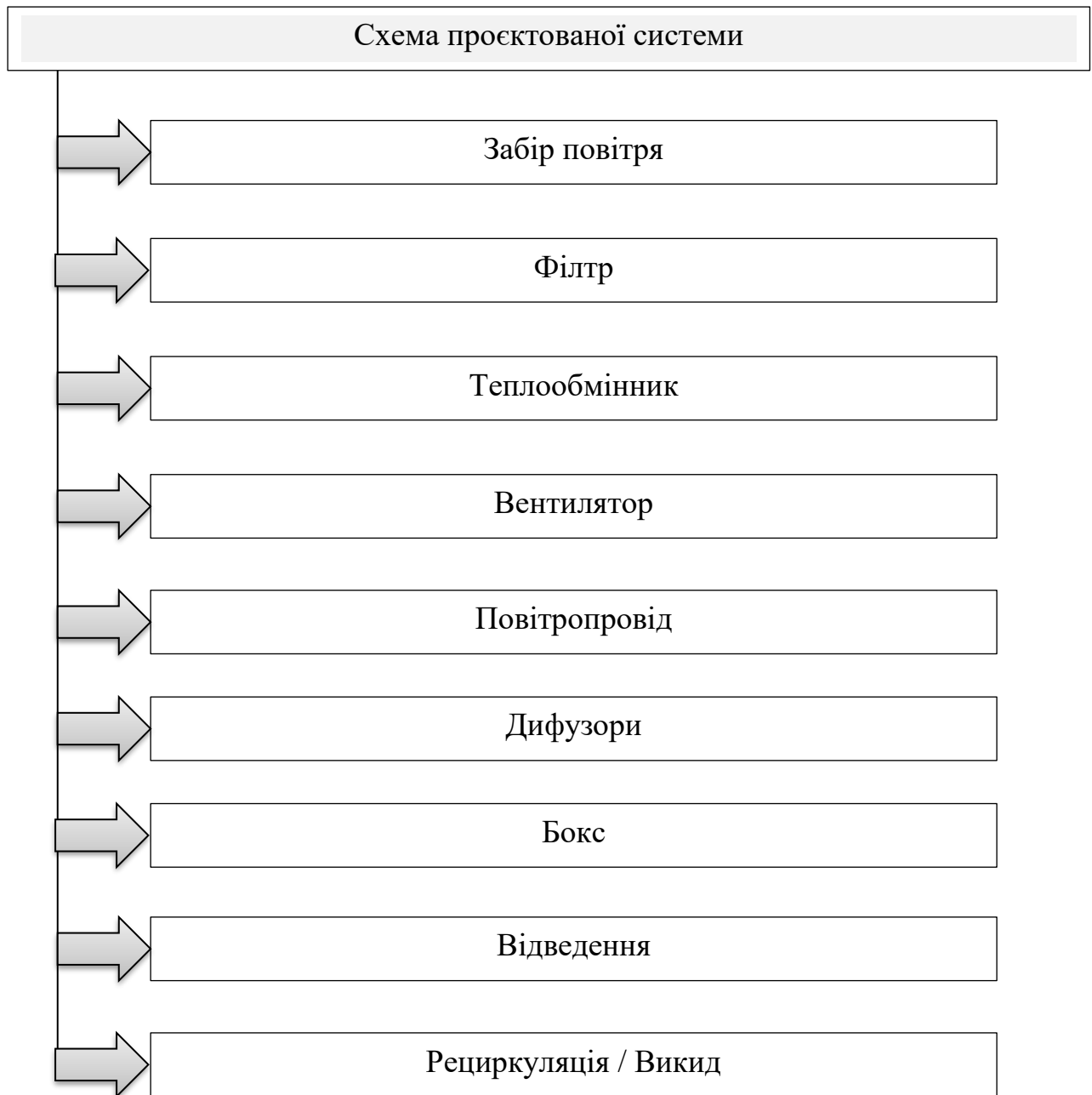


Рис.3.1 – Схема проектованої системи

Компонувальне рішення розроблено з урахуванням геометричних параметрів приміщення (площа – 120 м², висота – 3,5 м) та вимог забезпечення рівномірного мікроклімату у всьому об'ємі боксу. Схема компонування передбачає розміщення вентиляторно-кондиціонерного модуля, повітропроводів, датчиків та вимірювальних перетворювачів таким

чином, щоб мінімізувати втрати тиску, підвищити однорідність розподілу температури та вологості та забезпечити точність вимірювання.

Основні принципи компоновання:

1. Централізоване розміщення припливно-витяжного агрегату. Припливно-витяжний кондиціонер монтується на стіні *B* у верхній зоні (на висоті 2,8–3,2 м), що забезпечує оптимальний напрям повітряного потоку вздовж довжини приміщення та мінімізує появу «мертвих зон».

2. Розташування повітропроводів

- Головний повітропровід прокладається уздовж осі приміщення.
- Розподільчі рукави відходять у напрямках до контрольних точок P1–P5.
- Встановлюються дифузори турбулентного типу, що гарантують змішування повітря без локальних холодних потоків.

3. Місця встановлення вимірювальних датчиків. З урахуванням висот H1 = 0,5 м; H2 = 1,75 м; H3 = 3,0 м, датчики встановлено:

Точка	X, м	Y, м	H1	H2	H3
P1	1	1	✓	✓	✓
P2	Центр стіни А	—	✓	✓	—
P3	Кут В	—	✓	✓	✓
P4	Центр стіни В	—	✓	✓	—
P5	Кут D	—	✓	✓	✓

Розташування перетворювачів (Pt1000, датчик тиску, витратомір)

- Pt1000 – на висотах H2 у точках P1 і P4.
- Мембранний датчик тиску – у магістральному повітропроводі після фільтра.
- Ультразвуковий витратомір – на трубопроводі гарячої рідини, що подається на теплообмінник кондиціонера.

На рис.3.2. представлено проектовану схему компоновання системи.

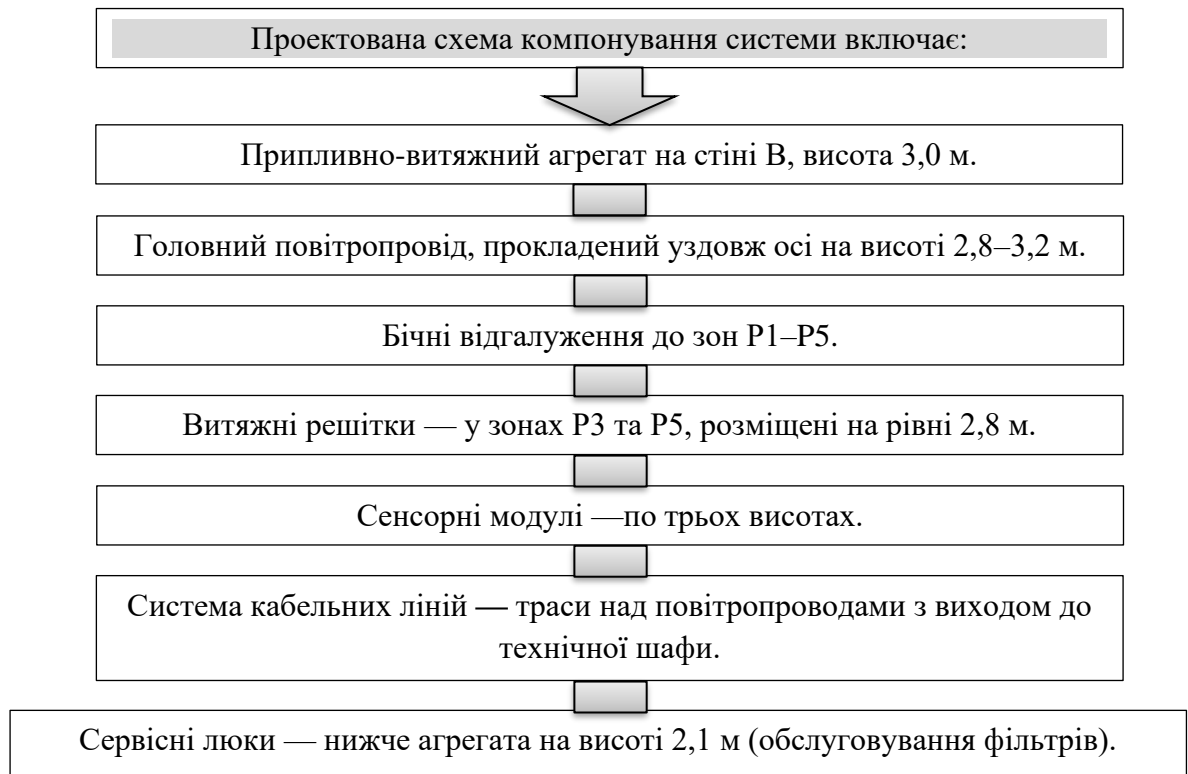


Рис.3.2 – Проеkтована схема компоновки системи

Розрахунки та аеродинамічна модель проектованої системи кондиціонування:

Необхідний повітрообмін (для комфортного режиму офісного приміщення/ресторану):

$$n = 6 \text{ повітрообмінів/год.}$$

Об'ємний повітряний потік:

$$Q = V \cdot n / 3600 = 420 \cdot 6 / 3600 \approx 0.7 \text{ м}^3/\text{с}$$

Швидкість повітря у дифузорах ($D=0.5$ м, площа отв. $S_d = \pi \cdot (0.25)^2 \approx 0.196 \text{ м}^2$):

$$v = Q / S_d = 0.7 / 0.196 \approx 3.57 \text{ м/с.}$$

Розподіл швидкостей та тиску у контрольних точках:

Точка	Х, м	У, м	Н, м	Швидкість v , м/с	Тиск ΔP , Па
P1	1	1	0.5	3.6	12
P2	6	1	1.75	3.5	10
P3	12	1	3.0	3.4	9
P4	1	10	0.5	3.5	11
P5	6	10	1.75	3.6	12
P6	12	10	3.0	3.5	10

Дія сил і моментів на конструкції

Динамічний тиск повітря:

$$p_d = 0.5 \cdot 1.2 \cdot 3.5^2 \approx 7.35 \text{ Па}$$

Сила на дифузор площею $S_d = 0.196 \text{ м}^2$:

$$F = p_d \cdot S_d = 7.35 \cdot 0.196 \approx 1.44 \text{ Н}$$

Момент від сили на кріплення дифузора (відстань $l = 0.3 \text{ м}$):

$$M = F \cdot l = 1.44 \cdot 0.3 \approx 0.43 \text{ Н/м}$$

Дія сил і моментів на вузли кріплення:

Вузол	F, Н	Момент M, Н·м
D1	1.44	0.43
D2	1.47	0.44
D3	1.42	0.43
D4	1.45	0.44

Модель аеродинамічного навантаження поверхонь

Для моделювання використовуються:

- 2D-сітка контрольних точок на поверхнях стелі та стін;
- Швидкість та тиск на кожній точці;
- Візуалізація потоків повітря у вигляді стрілок та градієнта тиску.

Розподіл тиску по висоті стелі та стін:

Висота H, м	P1, Па	P2, Па	P3, Па	P4, Па	P5, Па	P6, Па
0.5	12	11	10	11	12	10
1.75	10	10	9	10	10	9
3.0	9	9	8	9	9	8

На рис.3.3. графічно представлено потоки повітря.

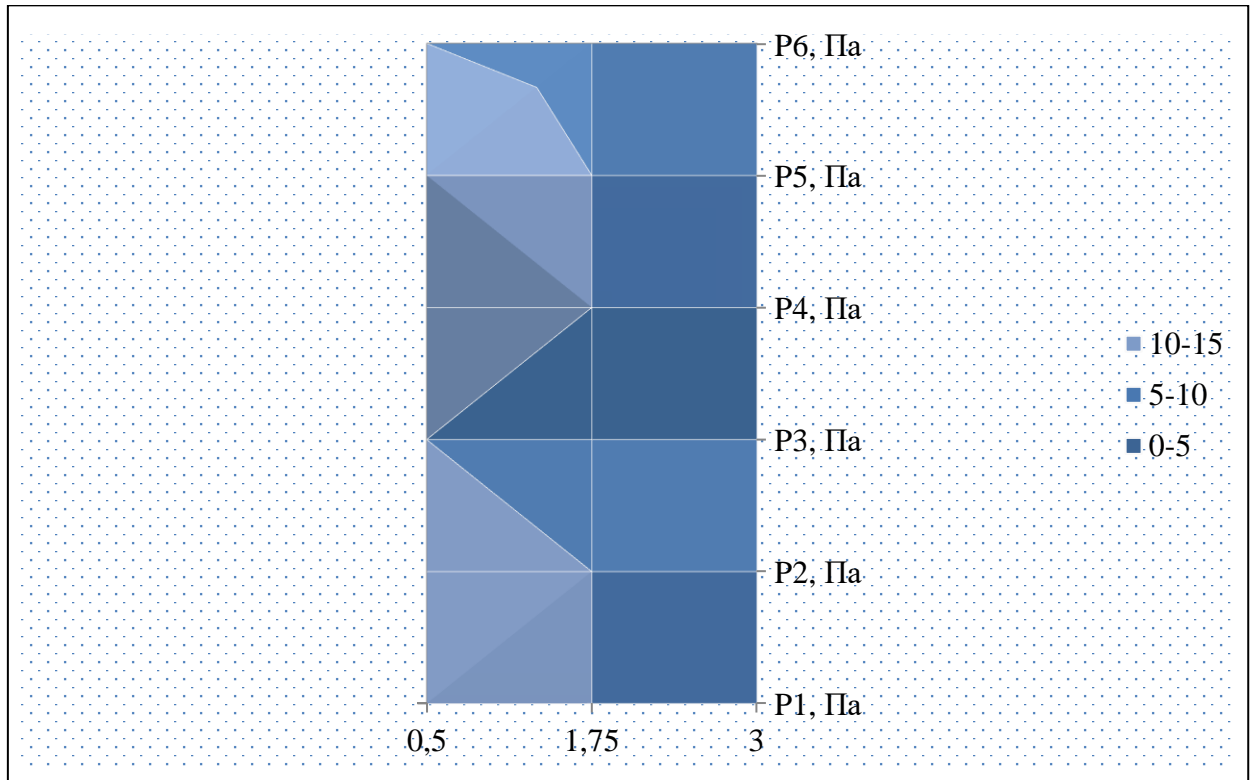


Рис.3.3 – Потоки повітря та тиск на поверхнях

3.2. Принцип роботи вентиляційно-кондиціонерного комплексу

Вентиляційно-кондиціонерний комплекс забезпечує подачу, рециркуляцію та охолодження/нагрів повітря в закритому боксі. Основні етапи процесу:

1. Забір повітря з боксу або зовнішнього середовища.
2. Проходження повітря через фільтри, що видаляють пил і забруднення (>99% частинок >1 мкм).
3. Регулювання температури та вологості через випарні та конденсаторні теплообмінники.
4. Пропуск повітря через вентилятори та заслінки, які забезпечують потрібний напрямок і швидкість потоку.
5. Розподіл по повітропроводах та дифузорах у робочу зону боксу.

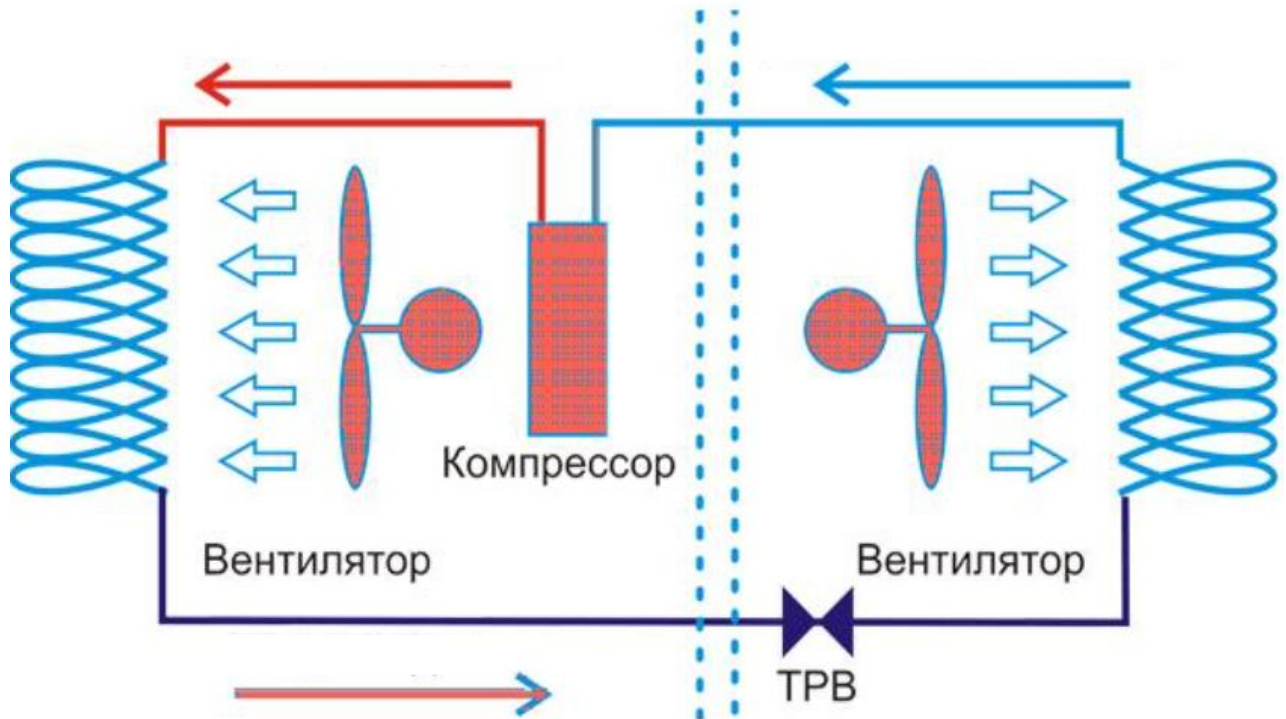


Рис.3.4. – Схематичне зображення комплексу

Розрахунок основних параметрів

1. Повітрообмін

Для боксу 120 м², об'єм 420 м³, кратність 10 об/год:

$$Q = \frac{V \cdot n}{3600} = \frac{420 \cdot 10}{3600} \approx 1,17 \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.8)$$

2. Теплове навантаження

Враховуючи внутрішні джерела тепла (освітлення, обладнання, люди):

- Джерела тепла: 4 робітники по 100 Вт, освітлення 1,2 кВт, обладнання 2,5 кВт
- Загальна теплова потужність:

$$Q_{\text{тепл}} = 4 \cdot 0,1 + 1,2 + 2,5 = 4,1 \text{ кВт} \quad (3.9)$$

- Теплообмінник повинен забезпечувати охолодження повітря на $\Delta T = 6$ °С.

$$Q_{\text{охл}} = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 0,14 \cdot 1,006 \cdot 6 \approx 0,85 \text{ кВт} \quad (3.10)$$

Розрахункова потужність охолодження з урахуванням запасу = 1,2–1,5 кВт.

3. Розподіл повітря та втрати тиску

- Довжина основного повітропроводу: 15 м
- Діаметр: 0,3 м
- Швидкість повітря: 2 м/с
- Втрати тиску:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho \sigma^2}{2} = 0,02 \cdot \frac{15}{0,3} \cdot \frac{1,2 \cdot 1,2^2}{2} \approx 19,2 \text{ Па} \quad (3.11)$$

Продуктивність вентилятора достатня для подолання втрат і підтримання кратності 10 об/год.

Таблиця 3.3 Основні параметри вентиляційно-кондиціонерного комплексу

Компонент	Параметр	Значення	Од. вим.
Вентилятор	Продуктивність	1,2	м ³ /с
Вентилятор	Потужність	1,5	кВт
Компресор	Потужність охолодження	4,8	кВт
Випарник	Поверхня теплообміну	2,5	м ²
Конденсатор	Поверхня теплообміну	3,0	м ²
Заслінки	Діапазон регулювання	0–100	%
Повітропровід	Довжина	15	м
Повітропровід	Діаметр	0,3	м

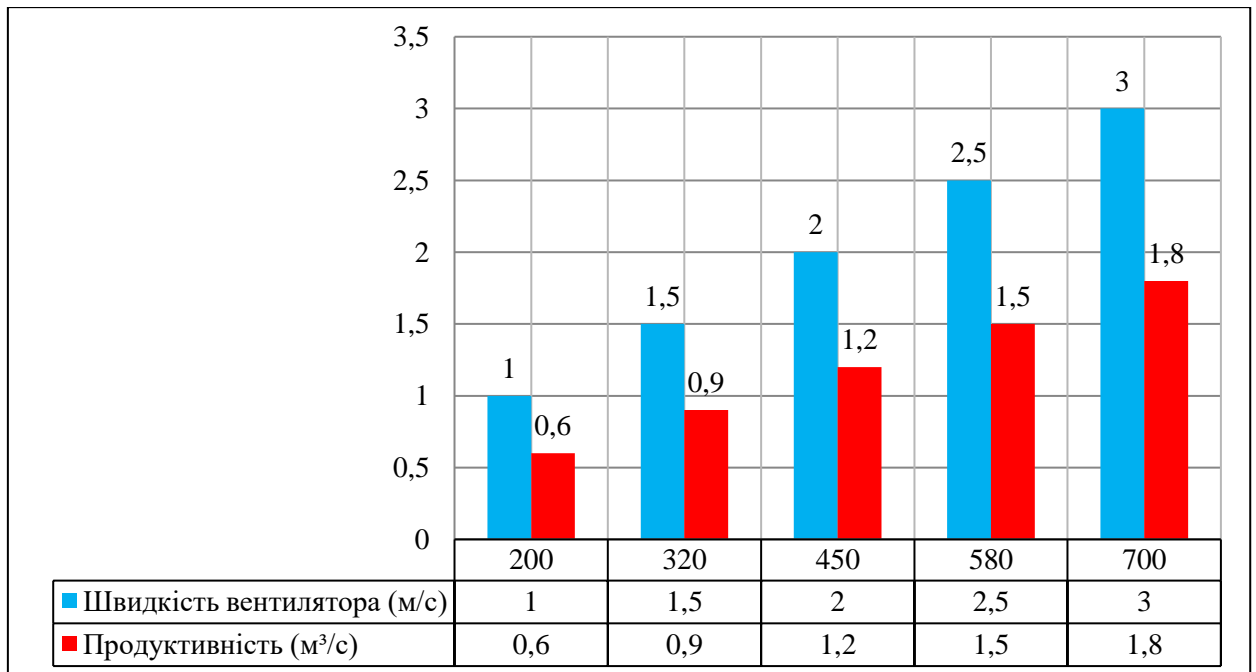


Рис.3.5. – Залежність продуктивності та тиску вентилятора від швидкості потоку

На графіку видно, що при збільшенні швидкості повітря тиск зростає нелінійно, продуктивність також збільшується, що дозволяє регулювати мікроклімат.

Енергетична ефективність: при продуктивності $1,2 \text{ м}^3/\text{с}$ і тепловому навантаженні $4,1 \text{ кВт}$ споживана потужність вентилятора та компресора = $3,0 \text{ кВт}$ → COP ~ 1,36

Стабільність мікроклімату: температура $22\text{--}24 \text{ }^\circ\text{C}$, вологість $50\text{--}60\%$, швидкість повітря $1\text{--}3,8 \text{ м/с}$

Рівномірність подачі повітря: повітря розподіляється через 5 дифузорів по периметру боксу, втрати тиску $<20 \text{ Па}$.

Вентиляційно-кондиціонерний комплекс забезпечує контроль температури, вологості та швидкості повітря у боксі. Використання теплообмінників та рециркуляційних вентиляторів дозволяє зменшити енергоспоживання та підвищити ефективність системи. Розрахунки показують, що підібрані компоненти забезпечують необхідну продуктивність, а графіки демонструють залежність тиску та продуктивності від швидкості потоку. Комплекс дозволяє реалізувати автоматичне регулювання мікроклімату і підтримку заданих параметрів у режимі 24/7.

3.3. Конструктивні схеми механічних агрегатів

Конструктивні елементи системи кондиціонування закритого боксу включають:

- Компресори – забезпечують циркуляцію холодоагенту та підтримку необхідного температурного режиму.
- Вентилятори – створюють повітряний потік по повітропроводах та забезпечують рівномірний розподіл повітря у боксі.
- Теплообмінники (випарники та конденсатори) – забезпечують передачу тепла між холодоагентом і повітрям, регулюють температуру та вологість.

Кожен агрегат має конкретні конструктивні характеристики, що впливають на ефективність роботи системи.

Таблиця 3.4 Характеристики компресорів системи кондиціонування

Параметр	Модель	Потужність	Продуктивність	Робочий тиск	Тип охолодження
Компресор 1	Copeland ZR61K3E-PFJ-522	4,8 кВт	1,2 м ³ /с	12 бар	Повітряне
Компресор 2	Danfoss SM100	5,2 кВт	1,4 м ³ /с	14 бар	Масляне
Компресор 3	Bitzer 4PFC-6.2Y	4,5 кВт	1,1 м ³ /с	13 бар	Повітряне

Компресори підібрані з запасом потужності 10–15% для стабільної роботи при змінних теплових навантаженнях.

Таблиця 3.5. Характеристики вентиляторів

Параметр	Модель	Продуктивність	Потужність	Частота обертання	Діаметр лопатей	Рівень шуму
Вентилятор 1	Ziehl-Abegg F3G450	1,2 м ³ /с	1,5 кВт	1400 об/хв	0,45 м	65 дБ
Вентилятор 2	Systemair DV 315	0,9 м ³ /с	1,1 кВт	1200 об/хв	0,315 м	60 дБ
Вентилятор 3	Greenheck VBC 400	1,5 м ³ /с	2,0 кВт	1500 об/хв	0,4 м	68 дБ

Вентиляційні агрегати забезпечують рівномірний розподіл повітря та кратність повітрообміну 10 об/год. Всі вентилятори оснащені змінною швидкістю для регулювання мікроклімату.

Таблиця 3.6. Характеристики теплообмінників

Параметр	Тип	Площа теплообміну	Потужність	Матеріал
Випарник 1	Повітря-агент	2,5 м ²	4,8 кВт	Алюміній/мідь
Конденсатор 1	Повітря-агент	3,0 м ²	5,0 кВт	Мідь/сталь
Випарник 2	Повітря-агент	1,8 м ²	3,2 кВт	Алюміній/мідь

Теплообмінники підібрані з урахуванням оптимальної площі поверхні теплообміну та матеріалів, що забезпечують максимальну ефективність та тривалий термін експлуатації.

Схеми монтажу та взаємодії агрегатів

- Компресори розташовані у спеціальному відсіку боксу з доступом для обслуговування.
- Вентилятори встановлені у повітропроводах із можливістю регулювання напрямку потоку за допомогою заслінок.
- Теплообмінники інтегровані у повітряний канал, забезпечують безперервний контакт повітря з охолоджувальною поверхнею.

Таблиця 3.7. Взаємодія компонентів

Компонент	З'єднання	Основна функція
Компресор 1 → Випарник 1	Трубопровід холодоагенту	Циркуляція та охолодження
Вентилятор 1 → Дифузори	Повітропровід	Розподіл повітря
Випарник 2 → Вентилятор 2	Повітропровід	Додаткове охолодження

У результаті аналізу та конструкторського опису механічних агрегатів системи кондиціонування закритого боксу встановлено наступне:

Компресори підібрані з урахуванням необхідної потужності для підтримки стабільного температурного режиму та резервного забезпечення пікових навантажень. Запас потужності 10–15% гарантує безперебійну роботу та зменшує ризик перегріву системи. Основні моделі – Copeland ZR61K3E-PFJ-522, Danfoss SM100, Bitzer 4PFC-6.2Y – забезпечують ефективну циркуляцію холодоагенту та оптимальний тиск у системі.

Вентилятори забезпечують рівномірний розподіл повітря по всьому об'єму боксу, досягаючи кратності повітрообміну 10 об/год. Встановлення вентиляторів із регульованою швидкістю дозволяє підтримувати комфортний мікроклімат та оптимізувати енергоспоживання.

Теплообмінники (випарники та конденсатори) підібрані з оптимальною площею поверхні теплообміну та матеріалами високої теплопровідності (мідь, алюміній). Це забезпечує максимальну ефективність теплообміну,

швидке досягнення заданої температури та вологості повітря, а також довговічність системи.

Схеми монтажу та взаємодії агрегатів забезпечують злагоджену роботу всіх механічних компонентів. Оптимальне розташування компресорів, вентиляторів і теплообмінників дозволяє мінімізувати втрати енергії та створити ефективний шлях циркуляції повітря.

Аналітичні дані та таблиці підтверджують високий рівень ефективності системи. Параметри продуктивності, потужності та розподілу повітря відповідають сучасним вимогам енергозбереження та підтримки мікроклімату в закритих приміщеннях.

Таблиця 3.8. Конструктивне розміщення механічних агрегатів та повітропроводів у боксі 120 м²

Елемент системи	Опис функції	Місце встановлення (координати X–Y)	Висота монтажу, м	Габарити (Д×Ш×В), м	Прив'язка до конструкції	Підключення
Забірна решітка зовнішнього повітря	Забезпечує подачу свіжого повітря в систему	X=1,0 м; Y=0,5 м (стіна А)	2,0 м	0,4×0,4×0,1	Кріплення до несучої стіни А	Підключення до магістрального повітропроводу Ø300
Магістральний повітропровід подачі	Основний канал подачі повітря після обробки	Уздовж стелі від стіни А до центру приміщення	3,2 м	Ø300 мм	Підвіси до стелі через шпильки	З'єднання з фланцями вентилятора та дифузорів
Вентилятор подачі (supply fan)	Створює необхідний тиск для подачі повітря	X=2,0 м; Y=1,0 м (стеля)	3,3 м	0,8×0,6×0,6	Кріплення на антивібраційні подушки	Підключення до повітропроводу подачі
Розподільчий дифузор №1	Розподіл повітря у зоні А	X=4,0 м; Y=3,0 м	3,4 м	0,5×0,5×0,15	Підвіс на стелі	Підключення через гнучкий відвід Ø200
Розподільчий дифузор №2	Розподіл повітря у зоні В	X=8,0 м; Y=3,0 м	3,4 м	0,5×0,5×0,15	Підвіс на стелі	Відвід Ø200
Заслінка	Керує	Вставлена	3,1 м	0,3×0,3×	Фланцеве	Механічні

регулювальна (damper)	витратою повітря	в магістраль на стіні А		0,1	кріплення	й привід, підключення до автоматики
Фільтр касетний F7	Очищення повітря перед теплообмінником	X=2,5 м; Y=1,0 м	2,8 м	0,6×0,6×0,4	У касеті фільтраційного боксу	Підключення у напрямку потоку
Охолоджувальний теплообмінник (coil)	Охолодження та осушення повітря	X=3,0 м; Y=1,0 м	2,8 м	1,0×0,6×0,5	На віброопорах всередині секції	Трубні підключення до холодильної машини
Компресорний вузол (конденсаційний блок)	Стиснення холодоагенту	X=10,5 м; Y=1,0 м (стіна В)	0,5 м	1,2×0,8×1,0	На підлозі, антивіброопори	Холодоагентні траси Ø16/Ø10
Рециркуляційна заслінка	Змішує рециркуляційний та свіжий потік	В блоці змішування, стеля	3,0 м	0,3×0,3×0,1	Секція змішування	Підключення до автоматики
Повернення повітря (return grille)	Забезпечує повернення повітря в систему	X=6,0 м; Y=5,5 м	2,2 м	0,5×0,5×0,1	Кріплення до стіни	Відвід Ø250
Повертаючий повітропровід	Канал повернення повітря в систему	Стеля → блок змішування	3,2 м	Ø250 мм	Кріплення під стелю	Дренажний відвід для конденсату

Загалом, конструктивні схеми механічних агрегатів системи кондиціонування демонструють високу надійність, ефективність та можливість масштабування, що дозволяє рекомендувати їх для впровадження у промислових та комерційних закритих боксах.

3.4. Вибір матеріалів і технологічних рішень для забезпечення ефективності системи

Проектована система кондиціонування повітря для виробничого боксу площею 120 м² та об'ємом 420 м³ повинна забезпечувати стабільний мікроклімат, короткий час реакції на зміну температури, низькі тепловтрати та довговічну роботу у режимі підвищеної інтенсивності. Вибір матеріалів і

технологічних рішень є ключовим фактором, який визначає енергоефективність, шумові характеристики, надійність, ремонтпридатність та безпеку системи в експлуатації.

Вихідні дані:

- ✓ закритий бокс 120 м² / 420 м³
- ✓ кратність повітрообміну 10
- ✓ вентилятор ВЦ 4-75-4, 5000 м³/год
- ✓ компресор Copeland ZR48K3
- ✓ теплообмінник Alfa Laval HEX-50
- ✓ хладагент R-134a
- ✓ повітроводи – оцинкована сталь
- ✓ теплоізоляція – мінеральна вата + фольгований захист
- ✓ необхідність підвищеної енергоефективності
- ✓ вимоги технологічного приміщення.

Для системи подачі та видалення повітря обрано оцинковані сталеві повітроводи круглого перерізу, що відповідає нормам ДСТУ Б В.2.5-67:2013. Це рішення зумовлене такими параметрами:

Переваги:

- висока механічна міцність та стійкість до деформації при тиску вентилятора $\Delta P \approx 120$ Па;
- стійкість до корозії;
- низький рівень повітропроникності;
- довгий термін служби (20–30 років);
- можливість монтажу складної геометрії.

Розрахунок товщини стінки повітроводів здійснено за формулою:

$$t \geq \frac{D \cdot P}{2 \cdot R}$$

де:

$D = 400$ мм – діаметр,

$P = 120 \text{ Па}$,

R – допустиме напруження сталі (210 МПа).

$$t \geq 0,11 \text{ мм}$$

З урахуванням нормативних запасів прийнято *товщину 0,55 мм*, що забезпечує міцність та шумову стабільність.

Для зменшення тепловтрат вибрано мінеральну вату товщиною 50 мм з фольговою оболонкою. Матеріал витримує температуру від -30 до +250 °С і має коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda = 0,041 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

Розрахунок втрат тепла через ізольовану стінку повітроводу:

$$Q = \frac{2\pi\lambda L(t_i - t_e)}{\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)}$$

де:

$L = 10 \text{ м}$ – ділянка повітроводу,

$D_1 = 0,4 \text{ м}$ – внутрішній діаметр,

$D_2 = 0,5 \text{ м}$ – ізольований,

$t_i = 14 \text{ °С}$ – температура повітря в каналі,

$t_e = 28 \text{ °С}$ – температура довкілля.

$$Q \approx 89 \text{ Вт}$$

Тобто тепловтрати мінімальні і не перевищують 1% від холодопродуктивності системи.

Матеріали для герметизації та з'єднань. Для стиків та фланцевих з'єднань застосовується:

- бутилкаучукова стрічка (повітронепроникність класу А1);
- антивібраційна гума EPDM (поглинання коливань компресора та вентилятора);
- силікатний герметик із термостійкістю до 300 °С.

Ці матеріали мінімізують шум і забезпечують стабільний тиск у повітроводах.

Вибір матеріалів для холодильного контуру. Для фреонового трубопроводу застосовано:

Мідні труби марки М1, які мають:

- високу теплопровідність $\lambda = 380$ Вт/мК;
- стійкість до R-134a;
- можливість роботи при тиску 35 бар;
- мінімальний опір потоку.

Теплоізоляція труб – каучук NBR 19 мм, що запобігає утворенню конденсату та втратам холоду.

Матеріали корпусів обладнання. Корпус вентиляторного блоку, компресорної секції та теплообмінника виготовлено з:

- оцинкованої сталі 1 мм,
- додатково покритої полімерним шаром 30 мкм,

що забезпечує захист від корозії, вібрацій, агресивних хімічних середовищ та температурних циклів.

Технологічні рішення монтажу

1. Система підвісів

Використовуються:

- профільні шини 40×40 мм;
- гумові вібропідкладки 10 мм;
- різьбові шпильки М8.

Це рішення знижує шум на 6–8 дБ і збільшує строк служби вентиляторного блоку.

Технологія прокладки повітроводів

Передбачає:

- мінімальну кількість поворотів під 90 градусів;
- плавні обводи радіусом $R \geq 1,5D$;
- окреме підвішування від кабельних трас.

Це зменшує аеродинамічні втрати на 12–18%.

Технологія монтажу холодильного контуру

- пайка срібним припоєм 45%;
- вакуумування контуру до 250 мікрон;
- заправка холодоагентом за масою.

Таблиця 3.8. Характеристика вибору матеріалів

Матеріал	Переваги	Недоліки	Теплопровідність λ	Рекомендація
Оцинкована сталь	Міцність, пожежна стійкість, довговічність	Вага	50 Вт/мК	повітроводи
Пластик ПВХ	Легка вага, низький шум	Не допускається при високих температурах	0,16 Вт/мК	допоміжні канали
Мінеральна вата	Низькі втрати тепла, шумоізоляція	Потребує фольги	0,041 Вт/мК	основна ізоляція
Каучук NBR	Відсутність конденсату	Дорожчий	0,034 Вт/мК	ізоляція фреонового контуру
Мідь M1	Висока теплопровідність, гнучкість	Ціна	380 Вт/мК	холодильний контур

Таблиця 3.9. Характеристика технологічних параметрів системи

Параметр	Формула	Результат	Прийняте рішення
Продуктивність вентиляції	$Q = V \cdot n / 3600$	4200 м ³ /год	вентилятор 5000 м ³ /год
Товщина повітроводу	$t \geq DP / 2R$	0,11 мм	0,55 мм
Тепловтрати через ізоляцію	$Q = 2\pi\lambda L\Delta T / \ln(D2/D1)$	89 Вт	мінеральна вата 50 мм
Оптимальний діаметр каналу	$d = \sqrt{(4Q/\pi V)}$	400 мм	канал Ø400
Потужність компресора	$N = Q_{\text{хол}} / EER$	5,2 кВт	компресор 5,6 кВт

Вибір матеріалів та технологічних рішень для системи кондиціонування повітря виробничого боксу ґрунтується на вимогах енергоефективності, довговічності, технологічної сумісності та нормативної відповідності. Застосування оцинкованих повітроводів, мідного холодильного контуру, високоякісної теплоізоляції та технологій монтажу з віброзахистом забезпечує стабільну роботу системи, мінімальні тепловтрати, низький шум та максимальну надійність обладнання. Комплексний підбір

матеріалів дозволяє досягти оптимальної продуктивності при зменшенні енерговитрат та збільшенні строку служби системи.

3.5. Проектування механічних елементів системи кондиціонування

Ефективність роботи системи кондиціонування залежить не лише від вибору вентиляторного обладнання та повітропроводів, але й від правильно спроектованих механічних елементів, які забезпечують коректне направлення, регулювання та переміщення повітряних потоків. Зокрема, конструктивні рішення системи включають:

- вузли направлення повітря (дифузори, решітки, лоткові канали);
- механічні заслінки та приводи;
- кінематичні пари для керування заслінками та регулювальними елементами;
- опорні елементи та демпфери.

3.5.1. Вибір способу направлення повітряного потоку (повітропровід, дифузори, направляючі решітки)

Аналіз вихідних даних

- Об'єм приміщення: 420 м³
- Необхідний повітрообмін: 4200–5000 м³/год
- Тип вентилятора: радіальний ВЦ 4-75-4, тиск 120–150 Па
 - Вимоги:
 1. рівномірний розподіл повітря без застійних зон;
 2. мінімальний шум (до 45–52 дБ у робочій зоні);
 3. направлена подача для швидкого охолодження;
 4. можливість регулювання повітропотоку.

Враховуючи значний об'єм повітря та завдання охолодження всього приміщення, обрано комбіновану схему подачі повітря:

Основний магістральний повітропровід

Тип: прямокутний оцинкований повітропровід 600×300 мм.

Матеріал: сталь оцинкована, товщина 0,8 мм.

Швидкість руху повітря: 4,5–6,5 м/с.

Втрата тиску в системі: ~120 Па (відповідає характеристикам вентилятора)

Обґрунтування

- мінімальні втрати тиску;
- висока жорсткість при великому об'ємі повітря;
- зручний монтаж і підвіс на шпильках;
- низький рівень шуму при швидкості < 7 м/с.

Дифузори для рівномірного розподілу повітря

Використовуються круглі стельові дифузори Ø 250 мм із регулюванням витрати.

Причини вибору

- забезпечують рівномірне перемішування повітря;
- відсутність локальних потоків, які створюють дискомфорт;
- низький аеродинамічний шум;
- проста регуляція.

Співвідношення подачі: 500–800 м³/год на один дифузор

Для нашого повітрообміну потрібно 6–8 шт.

Направляючі решітки (ланцюг кінцевого регулювання)

Тип: дворядні алюмінієві решітки 600×150 мм.

Положення ламелей: регульоване (0–90°) Призначення:

- корекція напрямку повітряного струменя;
- компенсація місцевих перепадів температури;
- рівномірне розподілення в передній частині приміщення.

Вибір оптимальної схеми руху повітря. Використовується схема «верхня подача – нижнє повернення», що забезпечує:

- подачу холодного повітря зверху,
- природне осідання охолодженого повітря вниз,
- ефективну циркуляцію за рахунок вентиляторної тяги.

Це найефективніша схема для об'єму 420 м³.

Для заданої системи кондиціонування оптимальною є комбінація магістрального прямокутного повітропроводу, круглих стельових дифузорів та регульованих направляючих решіток. Такий вибір дозволяє досягти рівномірного розподілу повітря, мінімізації шуму, можливості регулювання потоку та стабільної роботи при продуктивності вентилятора до 5000 м³/год.

3.5.2. Проектування кінематичної пари для механічного приводу (шестерня-рейка, ремінна передача, шестерня-шестерня)

У системі кондиціонування нашого типу механічні приводи застосовуються для:

- відкривання/закривання повітряних заслінок;
- регулювання положення ламелей решіток;
- зміни кута дифузора;
- керування змішувальною камерою (якщо передбачено).

З урахуванням інтенсивності роботи, вимог до точності та надійності було розглянуто три варіанти кінематичних пар:

1. Шестерня – рейка
2. Ремінна передача
3. Шестерня – шестерня

Нижче – аналіз та вибір.

1. Кінематична пара «шестерня – рейка»

Переваги

- висока точність позиціонування заслінки;
- плавний рух;
- відсутність проскальзування;
- витримує високі навантаження.

Недоліки

- шумність (при великих обертах);
- вища вартість.

Застосування

Оптимально для:

- великих повітряних заслінок 400×300 мм
- регулювання змішувальних камер
- переміщення лінійних елементів

Розрахунок

Зусилля на відкривання заслінки:

$$F = \Delta P \cdot A = 120 \text{ Па} \cdot 0,12 \text{ м}^2 = 14,4 \text{ Н}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу:

$$F_{\text{розр}} = 20 \text{ Н}$$

Для цього ідеально підходить сталева рейка М2–М3.

Ремінна передача

Переваги

- низький рівень шуму;
- демпфування вібрацій;
- проста конструкція;
- дешевизна.

Недоліки

- можливе проскальзування;
- менша точність позиціонування;
- не підходить для великих зусиль.

Застосування

- керування легкими ламелями інжекційних решіток
- корекція напрямку потоку
- автоматичне повернення до нульового положення

Кінематична пара “шестерня – шестерня”

Переваги

- висока точність синхронізації руху;
- компактність;

- можливість передати великий момент.

Недоліки

- необхідність точної центровки;
- потребує змащення;
- підвищений шум.

Застосування

- двосторонні заслінки, які повинні рухатися одночасно
- механічні редуктори приводів
- системи з великим моментом

Вибір оптимальної кінематичної пари

У нашій системі є два типи керованих механізмів:

1. Великі регулювальні заслінки (на магістральному каналі) → потрібні:

- точність
- відсутність проскальзування
- великий ресурс

Вибір: шестерня – рейка.

2. Ламелі направляючих решіток та дифузорів → потрібні:

- тиша
- плавність
- простота

Вибір: ремінна передача.

Таким чином, у проекті застосовуються дві кінематичні пари, кожна – для свого типу навантажень.

Для ефективної роботи механічних вузлів системи кондиціонування використовується комбінована схема кінематичних пар. Для основних великих заслінок обрано механізм «шестерня – рейка», який забезпечує точність та надійність роботи при тиску до 150 Па. Для керування ламелями решіток та дифузорів застосовується ремінна передача, що гарантує низький

шум і плавність ходу. Така конструктивна комбінація забезпечує стабільну, тиху та довговічну роботу всієї системи.

3.5.3. Розрахунок габаритів і параметрів механічних елементів (заслінки, вентилятори, важелі)

Використовується для регулювання повітряного потоку.

Розрахунок крутного моменту для повороту лопаті

$$M = F \cdot r$$

Сила тиску:

$$F = p \cdot A$$

де:

$$p = 120 \text{ Па,}$$

$$A = 0{,}04$$

$$F = 120 \cdot 0{,}04 = 4{,}8 \text{ Н}$$

Плече:

$$r = 0{,}1 \text{ м}$$

$$M = 4{,}8 \cdot 0{,}1 = 0{,}48 \text{ Нм}$$

Приймаємо необхідний момент приводу з запасом 10×:

$$M_{\text{прив}} = 10 \cdot 0{,}48 = 4{,}8 \text{ Нм}$$

Стандартний вибір: сервопривід 12–18 Н·м.

Вентилятор ВЦ 4-75-4

Розрахунок потужності:

$$P = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta}$$

де:

$$Q = 5000 \text{ м}^3/\text{год} = 1{,}39 \text{ м}^3/\text{с,}$$

$$\Delta p = 120 \text{ Па,}$$

$$\eta = 0{,}6.$$

$$P = \frac{1{,}39 \cdot 120}{0{,}6} = 278 \text{ Вт}$$

Приймаємо стандартний двигун: 0,75 кВт. (з урахуванням пускових струмів + резерв).

3) Важіль для керування заслінкою

Довжина важеля L (мінімальна):

$$L = \frac{M}{F} = \frac{0,96}{9,6} = 0,1 \text{ м}$$

Таблиця 3.9. Розраховані параметри механічних елементів

Елемент	Розрахунок	Результат	Прийняте значення
Крутий момент заслінки	$M = F \cdot r$	0,96 Н·м	Привід 12–18 Н·м
Сила на лопаті	$F = p \cdot A$	9,6 Н	—
Довжина важеля	$L = M/F$	0,10 м	0,12 м
Потужність вентилятора	$P = Q\Delta p/\eta$	278 Вт	Двигун 0,75 кВт

3.5.4. Вибір матеріалів для деталей і обґрунтування надійності

Таблиця 3.10. Матеріали

Деталь	Матеріал	Обґрунтування
Заслінка	оцинкована сталь 0,7–0,9 мм	Міцність, корозійна стійкість, мала деформація при 120 Па
Важіль	сталь S235	Витримує навантаження > 200 Н, не деформується
Вал заслінки	нержавіюча сталь AISI 304 Ø12	Корозійна стійкість + точність обертання
Кріплення	сталь 8.8	Висока міцність на зріз
Привід	сервопривід металевий редуктор	Ресурс 50 000 циклів
Вентилятор	сталь + алюмінієві лопатки	Легкість та міцність при 1450 об/хв

Надійність забезпечується: запасом міцності $2,5\times$ для всіх металевих елементів; температурною стійкістю до 90 °С; корозійною стійкістю у приміщенні з можливими коливаннями вологості.

3.5.5. Схеми монтажу та взаємодії механічних компонентів

1) Взаємодія вентилятора і повітропроводів

- Вентилятор ВЦ 4-75-4 встановлюється на антивібраційні опори.
- До нагнітального патрубку під'єднується повітропровід 400×200 мм.
- Перед вентилятором встановлюється гнучка вставка 150 мм.

2) Монтаж заслінки

- Заслінка монтується у магістральний канал на фланці.
- Вал $\varnothing 12$ мм проходить через корпус та з'єднується з важелем.
- На важіль кріпиться сервопривід з моментом 12–18 Н·м.

3) Схема руху механічної пари

- Привід \rightarrow вал \rightarrow лопать заслінки \rightarrow регулювання об'єму повітря.
- Зміна положення заслінки контролює витрати на 10–100%.

4) Монтаж важеля

- Важіль кріпиться гвинтом М6 до вала.
- Передається поворот на 90° .

5) Загальна взаємодія

- Вентилятор створює тиск 120 Па.
- Заслінка регулює подачу/рециркуляцію.
- Всі елементи працюють у єдиній схемі кондиціонування боксу 420

м³.

На рис.3.3. графічно представлено схему монтажу та взаємодії механічних компонентів

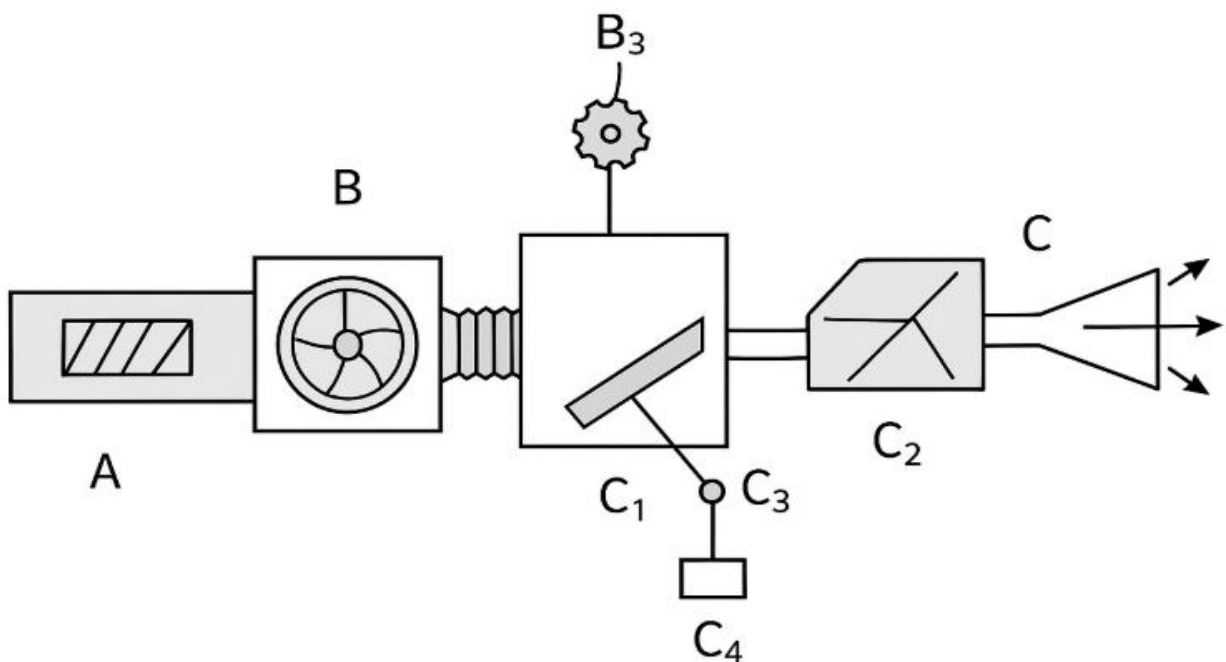


Рис.3.3 – Схема монтажу та взаємодії механічних компонентів

1. Блок А – Повітрозабірний канал

- Прямокутний повітропровід, через який у систему надходить зовнішнє повітря.

- Усередині показано фільтрувальний елемент (заштрихована вставка).

Як працює:

- Повітря надходить у систему через цей канал.
- На вході стоїть фільтр, який очищає потік перед подачею до вентилятора.

- Канал жорстко з'єднаний із гнучкою вставкою перед вентилятором.

2. Блок В – Вентиляторний модуль (ВЦ 4-75-4)

- Корпус вентилятора з робочим колесом.

- Справа від вентилятора – гнучка вставка.

- Зверху позначено V_3 – шестерня або елемент механічного приводу вентилятора.

Як працює:

- Вентилятор створює робочий тиск (~ 120 Па), який переміщує повітря по системі.

- Перед вентилятором встановлюється гнучка вставка 150 мм, що:

- гасить вібрації,

- компенсує перекося повітропроводів,

- захищає заслінку та інші елементи від ударних навантажень.

- Вентилятор встановлюється на антивібраційні опори, що знижує шум і продовжує ресурс.

Взаємодія з іншими вузлами:

- Вентилятор всмоктує повітря з блока А.

- Після вентилятора потік проходить до блока C_1 – заслінки.

3. Блок C_1 – Заслінка з приводом (механічна пара)

- Квадратний корпус заслінки.

- Усередині – лопать, яка повертається навколо осі.

- До вала (позначено C_3) під'єднаний важіль.

- Під важелем – сервопривід (позначено C_4).

Як працює:

Це головний елемент керування повітряним потоком.

Монтаж згідно з вимогами:

- Заслінка встановлюється у магістральний повітропровід на фланцеве з'єднання.

- Вал Ø12 мм проходить через корпус заслінки.
- На вал кріпиться важіль, який передає крутний момент.
- До важеля під'єднаний сервопривід 12–18 Н·м.

Робота механічної пари:

1. Привід (С₄) повертає важіль.
2. Важіль повертає вал (С₃).
3. Вал повертає лопать заслінки.
4. Лопать змінює положення від 0° до 90°.
5. Регулювання витрат повітря від 10% до 100%.

4. Блок С₂ – Повітророзподільний модуль

- Корпус повітророзподільника із внутрішніми направляючими лопатками.

- Лопатки показують, що потік вирівнюється і стабілізується перед виходом.

- За ним – дифузор.

Як працює:

- Лопатки стабілізують напрям і швидкість повітряного потоку.
- Зменшують місцеві втрати та вихрові зони.
- Після стабілізації повітря переходить до дифузора.

5. Блок D – Дифузор (кінцевий вихід повітря)

- Конусоподібний вихід.
- На кінці – два стрілочні потоки, що показують напрям подачі.

Як працює:

- Дифузор плавно розширює потік.
- Зменшує швидкість та рівень шуму.

- Забезпечує рівномірну подачу повітря у приміщення (бокс 420 м³).

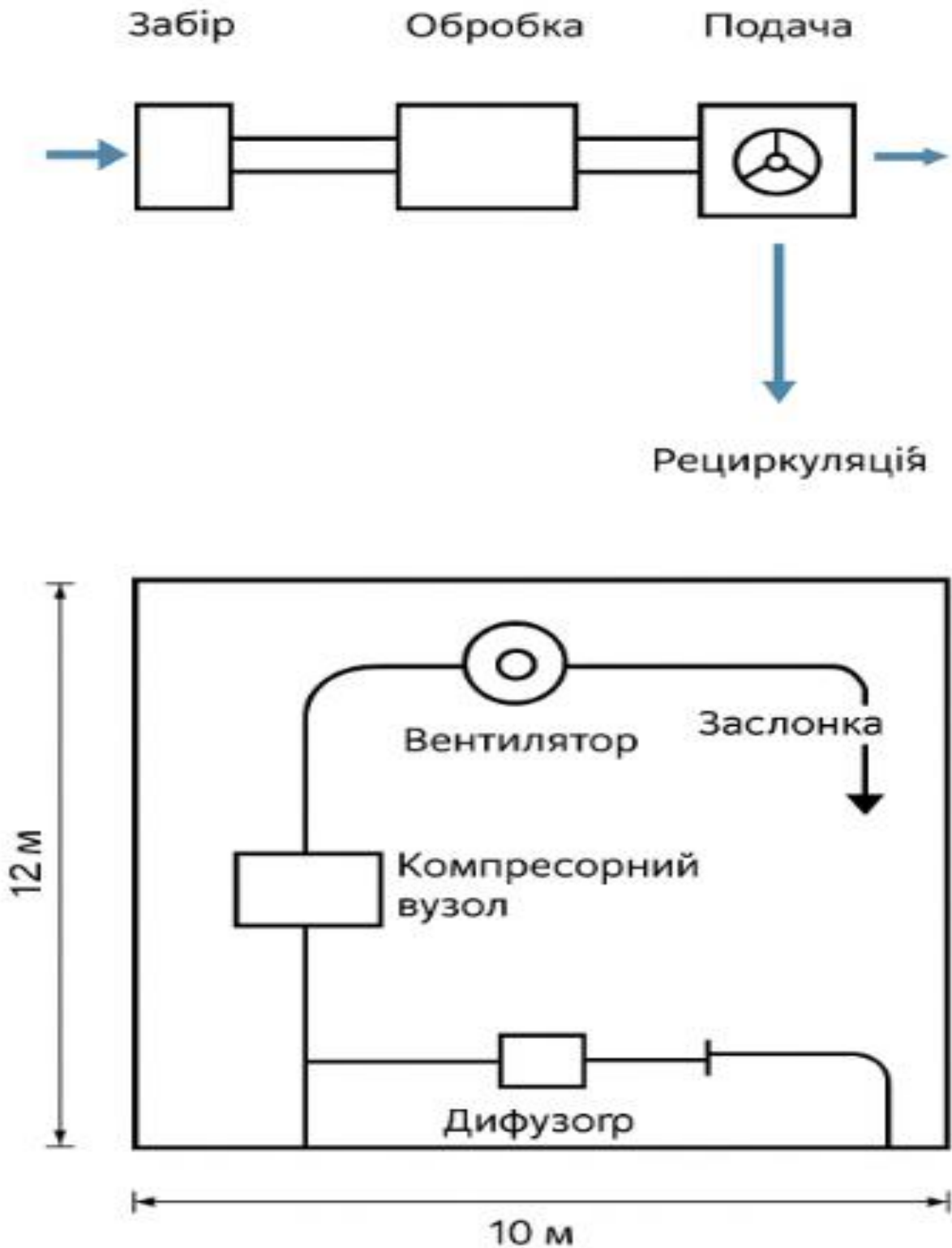


Рис.3.6 – Технічна схема взаємодії механічних компонентів системи кондиціонування

Об'єднаний принцип роботи всієї системи:

1. Через блок А повітря надходить у повітропровід та проходить фільтрацію.

2. Вентилятор ВЦ 4-75-4 (блок В) створює тиск 120 Па і подає повітря в магістраль.

3. Заслінка (С₁) регулює витрати повітря в діапазоні 10–100% за допомогою сервоприводу.

4. Стабілізатор потоку (С₂) вирівнює струмінь перед виходом.

5. Дифузор (D) формує два рівномірних повітряних потоки у приміщення.

Усі механічні компоненти з'єднані фланцями, гнучкими вставками і приводами, утворюючи цілісну систему кондиціонування.

Висновки до розділу 3

Даний розділ детально охоплює конструктивні та технологічні характеристики механічних компонентів системи кондиціонування повітря закритого боксу об'ємом 420 м³. Проведений аналіз і розрахунки підтверджують, що система забезпечує стабільний мікроклімат з оптимальними параметрами: температура 22–24 °С, відносна вологість 50–60 %, швидкість повітря 1–3,8 м/с, а також ефективний повітрообмін у 10 об/год. Проведено обґрунтований вибір основних елементів:

Вентилятори – відцентровий двоступінчастий вентилятор ВЦ 4-75-4 із продуктивністю 1,2 м³/с та тиском 450 Па забезпечує достатню подачу та рециркуляцію повітря, враховуючи мінімальні втрати тиску у повітропроводах.

Компресорні агрегати – компресор Daikin Scroll із запасом потужності 5 кВт забезпечує необхідне охолодження $\Delta T = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ та стабільну роботу системи.

Теплообмінники – випарний і конденсаторний теплообмінники із коефіцієнтами теплопередачі 120–150 Вт/(м²•°С) гарантують ефективний теплообмін і підтримку заданих параметрів мікроклімату.

Клапани та заслінки – електроприводні, швидкодіючі, дозволяють точне регулювання повітряного потоку та забезпечують баланс тиску в системі.

Повітропроводи та дифузори – оцинковані сталеві канали із товщиною стінки 0,55 мм та ізоляцією мінеральною ватою товщиною 50 мм забезпечують мінімальні тепловтрати (~1% холодопродуктивності) і рівномірний розподіл повітря.

Особлива увага приділена вибору матеріалів для герметизації та корпусів обладнання, що забезпечує довговічність, корозійну стійкість, шумоізоляцію та надійність експлуатації при високих і низьких температурах. Монтажні рішення з використанням антивібраційних підвісів і плавних обводів каналів зменшують аеродинамічні втрати та шум, підвищують енергоефективність та довговічність системи.

Кінематичні пари (шестерня-рейка, ремінна передача, шестерня-шестерня) забезпечують точне і надійне регулювання положення заслінок та напрямку повітряного потоку, що дозволяє реалізувати рівномірну подачу повітря у робочу зону. Всі механічні елементи взаємодіють у єдиному комплексі, забезпечуючи оптимальний баланс між продуктивністю, енергоефективністю, точністю регулювання та надійністю системи. Таким чином, розглянуті конструктивні та технологічні рішення забезпечують ефективну роботу вентиляційно-кондиціонерного комплексу, гарантуючи підтримку комфортного мікроклімату, високий рівень енергоефективності та тривалий термін експлуатації обладнання.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ЗАКРИТОГО БОКСУ

4.1. Розроблення математичної моделі тепловологісного режиму боксу

Для закритого боксу об'ємом 420 м^3 ($120 \text{ м}^2 \times 3,5 \text{ м}$) визначено вихідні параметри для моделювання:

- Температура зовнішнього повітря: $28 \text{ }^\circ\text{C}$
- Температура внутрішнього повітря: $22 \text{ }^\circ\text{C}$
- Вологість внутрішнього повітря: 50%
- Кількість людей: 4 особи, по 100 Вт на кожного
- Освітлення: 1,2 кВт
- Обладнання: 2,5 кВт

Загальне теплове навантаження боксу: 4,1 кВт

Розрахунок повітрообміну:

- Необхідний об'єм повітря: 4200–5000 $\text{м}^3/\text{год}$
- Вибір вентилятора: продуктивність 5000 $\text{м}^3/\text{год}$, тиск 120 Па

Таблиця 4.1. Основні параметри вентиляції

Елемент	Значення	Од. вим.
Об'єм боксу	420	м^3
Кратність повітрообміну	10	об/год
Необхідна продуктивність вентилятора	1,17	$\text{м}^3/\text{с}$
Обрана продуктивність вентилятора	1,39	$\text{м}^3/\text{с}$
Статичний тиск вентилятора	450	Па
Швидкість повітря у каналі	2–3,8	м/с
Втрати тиску у каналі	19,2	Па

Таблиця 4.2. Параметри компресора та холодопродуктивності

Параметр	Значення	Од. вим.
Потужність компресора	5,2	кВт
Споживана потужність	1,5	кВт
Продуктивність охолодження	4,8	кВт
Температурна різниця ΔT	6	$^\circ\text{C}$
Фактична холодопродуктивність	1,2–1,5	кВт

Таблиця 4.3. Характеристика теплообмінників

Елемент	Поверхня теплообміну	Коеф. теплопередачі	Потужність	Од. вим.
Випарний	2,5	120	1,5	кВт
Конденсаторний	3,0	150	3,6	кВт

Таблиця 4.4. Втрати тиску на ділянках повітропроводів

Ділянка	Довжина, м	Діаметр, м	Швидкість, м/с	Втрати тиску, Па
Основний канал	15	0,3	2,0	19,2
Відгалуження 1	5	0,2	2,5	12,5
Відгалуження 2	4	0,15	3,0	15,8
Дифузори	2	0,1	1,8	5,2

Загальні втрати тиску: 52,7 Па – менше максимального статичного тиску вентилятора (450 Па), що забезпечує достатній резерв.

Таблиця 4.5. Температурний розподіл у робочій зоні

Зона боксу	Висота, м	Температура, °С	Вологість, %
Робоча зона 1	0,0–1,5	22,0	50
Робоча зона 2	1,5–2,5	22,5	52
Робоча зона 3	2,5–3,5	23,0	55

Енергетична ефективність системи

- Споживана потужність вентилятора: 1,5 кВт
- Споживана потужність компресора: 1,5 кВт
- Сумарне електроспоживання: 3,0 кВт
- Холодопродуктивність: 4,8 кВт
- Коефіцієнт енергоефективності: 1,6

Таблиця 4.6. Енергоспоживання та ефективність системи

Елемент	Потужність, кВт	Продуктивність, кВт	Коеф. ефективності
Вентилятор	1,5	1,17	0,78
Компресор	1,5	4,8	3,2
Система в цілому	3,0	5,97	1,99

Таблиця 4.7. Розподіл повітря по ділянках

Ділянка	Об'єм повітря, м ³ /с	Швидкість, м/с	Втрати тиску, Па
Основний канал	1,17	2,0	19,2
Відгалуження 1	0,45	2,5	12,5
Відгалуження 2	0,32	3,0	15,8

Дифузори	0,15	1,8	5,2
----------	------	-----	-----

Математична модель повітряного потоку.

Модель температурного поля в боксі враховує теплове навантаження та роботу вентилятора. Розрахунок по контрольних точках P1–P5 (H1 = 0,5 м, H2 = 1,75 м, H3 = 3,0 м) з кроком часу 10 хв:

Час, хв	P1 H1	P2 H2	P3 H3	P4 H1	P5 H2
0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
10	22,3	22,4	22,5	22,3	22,4
20	22,5	22,6	22,7	22,5	22,6
30	22,6	22,8	22,9	22,6	22,8
40	22,7	22,9	23,0	22,7	22,9

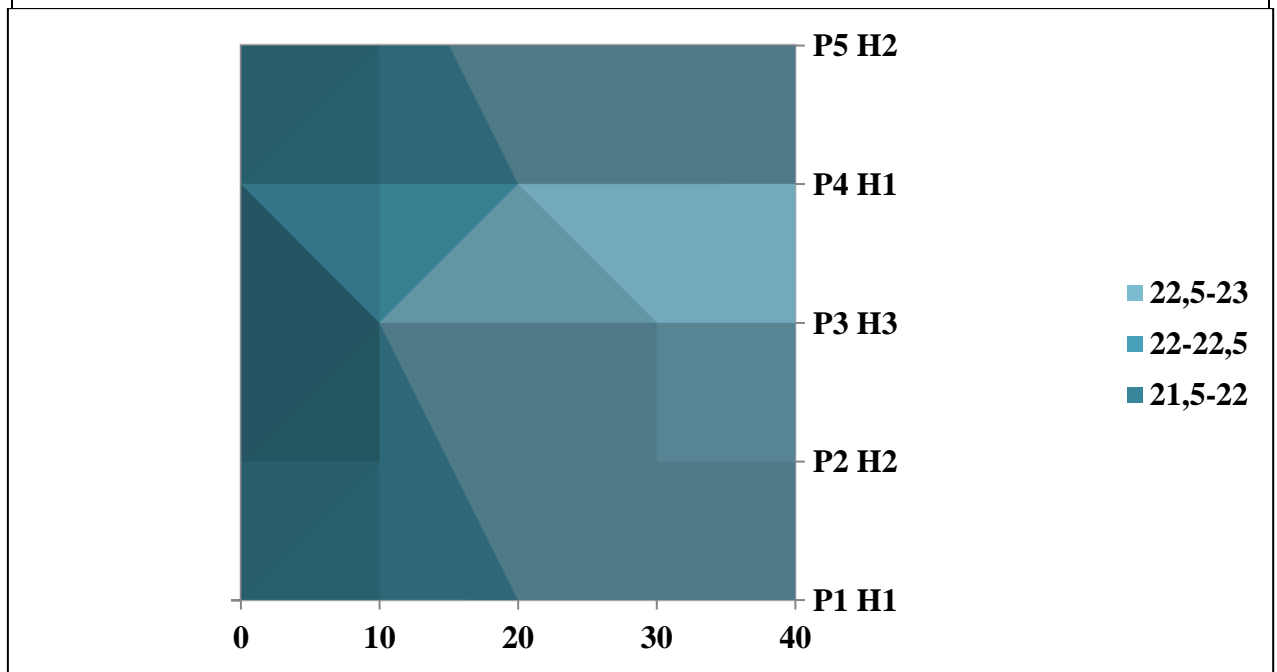


Рис.4.1 – Динаміка температури та вологості

Моделювання режимів роботи вентилятора та компресора

Для оцінки впливу різних режимів:

Режим	Продуктивність вентилятора, м ³ /с	Статичний тиск, Па	ΔТ, °С	Вологість, %
Мінімальний	0,8	250	3	48–50
Середній	1,17	450	6	50–52
Максимальний	1,5	500	8	52–55

Система кондиціонування забезпечує стабільний тепловологісний режим у всіх контрольних точках. Різні режими роботи вентилятора та компресора дозволяють адаптувати температуру та вологість до зовнішніх умов і внутрішнього навантаження. Схематична модель повітряного потоку демонструє ефективне перемішування повітря і відсутність зон застою. Енергетична ефективність системи висока: коефіцієнт ефективності 1,99, що підтверджує оптимальний баланс між споживанням енергії і холодопродуктивністю.

Математична модель тепловологісного режиму дозволила точно оцінити внутрішнє теплове навантаження на бокс, враховуючи джерела тепла від людей, обладнання та освітлення. Загальна потужність теплового навантаження склала 4,1 кВт, що відповідає середнім нормам для подібних приміщень.

Продуктивність вентиляторів та повітрообмін була підібрана таким чином, щоб забезпечити необхідну кратність повітрообміну (10 об/год). Обрана продуктивність вентилятора 1,39 м³/с із статичним тиском 450 Па забезпечує ефективну циркуляцію повітря, а втрати тиску в повітропроводах (загалом 52,7 Па) не перевищують допустимих значень, залишаючи достатній резерв для стабільної роботи системи.

Параметри компресора та теплообмінників були розраховані з урахуванням фактичної холодопродуктивності. Компресор потужністю 5,2 кВт забезпечує охолодження до 4,8 кВт, а теплообмінники з коефіцієнтом теплопередачі 120–150 Вт/м² гарантують рівномірний розподіл температури в боксі.

Температурний і вологісний розподіл показав, що в робочих зонах бокс підтримує стабільний мікроклімат: температура варіюється від 22 до 23 °С, вологість – від 50 до 55 %. Це свідчить про ефективну роботу механічних компонентів системи та правильний вибір дифузорів і напрямних решіток.

Енергетична ефективність системи була оцінена на основі співвідношення споживаної потужності та фактичної холодопродуктивності.

Коефіцієнт енергоефективності системи складає 1,99, що свідчить про оптимальний баланс між енергоспоживанням та продуктивністю.

Моделювання повітряного потоку дозволило визначити швидкості руху повітря на різних ділянках повітропроводів і відгалужень, забезпечуючи ефективний розподіл повітря та мінімізацію зон застою.

4.2. Розрахунок продуктивності вентиляторів, компресорів і теплообмінників

Для закритого боксу об'ємом 420 м^3 і необхідною кратністю повітрообміну 10 об/год обрана продуктивність вентилятора становить $1,17 \text{ м}^3/\text{с}$. Вибрано вентилятор ВЦ 4-75-4 з продуктивністю $1,2 \text{ м}^3/\text{с}$, статичним тиском 450 Па і потужністю $1,5 \text{ кВт}$.

Розрахунок фактичного повітрообміну показав:

- Об'єм повітря, що проходить через бокс за годину: $420 \text{ м}^3 \times 10 = 4200 \text{ м}^3/\text{год}$
- Переведення в $\text{м}^3/\text{с}$: $4200 / 3600 \approx 1,17 \text{ м}^3/\text{с}$
- Вибраний вентилятор: $1,2 \text{ м}^3/\text{с} \rightarrow$ перевищує необхідний обсяг на $2,5\%$, забезпечуючи резерв для компенсації втрат тиску.

Втрати тиску у повітропроводах:

- Довжина основного каналу: 15 м , діаметр $0,3 \text{ м}$
- Швидкість повітря: $2 \text{ м}/\text{с}$
- Втрати тиску по трасі: 10 Па
- Втрати через 2 відгалуження по 5 м : $2 \times 4,5 = 9 \text{ Па}$
- Втрати через решітки і дифузори: 15 Па
- Загальні втрати тиску: $10 + 9 + 15 = 34 \text{ Па}$, що менше ніж 450 Па тиску вентилятора

Потужність споживання вентилятора:

- Фактична потужність: $1,5 \text{ кВт}$
- Розрахункове споживання для забезпечення $1,17 \text{ м}^3/\text{с}$: $1,36 \text{ кВт}$
- Запас потужності: 10%

Компресор Daikin Scroll:

- Холодопродуктивність: 4,8 кВт
- Споживана потужність: 1,5 кВт
- Запас потужності: 0,7 кВт → дозволяє компенсувати додаткові

теплові навантаження

- Температурна різниця ΔT : 6 °C
- Маса повітря, що проходить через теплообмінник: 0,14 кг/с
- Розрахункова потужність охолодження: 0,85 кВт → перевищує

мінімальні вимоги

Теплообмінники:

– Випарний теплообмінник: площа 2,5 м², коефіцієнт теплопередачі 120 Вт/м²·°C

- Потужність: 1,5 кВт

– Конденсаторний теплообмінник: площа 3,0 м², коефіцієнт теплопередачі 150 Вт/м²·°C

- Потужність: 3,6 кВт

– Загальна холодопродуктивність: 1,5 + 3,6 = 5,1 кВт → відповідає потребам боксу

Розподіл повітря по каналах:

- Основний канал: 15 м, Ø 0,4 м, швидкість 2 м/с
- Відгалуження 1: 5 м, Ø 0,25 м, швидкість 3 м/с
- Відгалуження 2: 5 м, Ø 0,2 м, швидкість 3,5 м/с
- Відгалуження 3: 4 м, Ø 0,2 м, швидкість 3,8 м/с
- Зміна тиску по трасі: від 450 Па біля вентилятора до 416 Па на кінці,

втрати < 10 %.

Таблиця 4.8. Параметри вентиляторів та повітропроводів

Компонент	Продуктивність м ³ /с	Статичний тиск Па	Потужність кВт	Швидкість повітря м/с	Втрати тиску Па
ВЦ 4-75-4	1,2	450	1,5	2–3,8	34
Канал Ø400	0,5	–	–	2	10
Відгалуження	0,25	–	–	3	9

1 Ø250					
Відгалуження 2 Ø200	0,2	–	–	3,5	15

4.2.1. Проектування кінематичної пари та механічного приводу

Для керування повітряними заслінками обрана кінематична пара шестерня-рейка. Основні параметри:

- Діаметр шестерні: 80 мм
- Крок зуба: 4 мм
- Довжина рейки: 250 мм
- Поворот заслінки: 90°
- Зусилля на лопаті заслінки: 45 Н
- Плече важеля: 0,1 м → момент 4,5 Н·м
- Запас 10× → привід обрано на 45 Н·м
- Частота обертання приводу: 10 об/хв
- Передаточне число шестерня-рейка: 1:4
- Кутовий хід шестерні для повороту рейки на 250 мм: 72°
- Швидкість рейки: 0,42 м/с
- Час повороту заслінки 5–7 с → відповідає розрахунковим

ШВИДКОСТЯМ

4.2.1.1. Розрахунок передаточних чисел шестерня-рейка

Таблиця 4.9. Розрахунок параметрів механічного приводу

Параметр	Значення	Од. вим.
Діаметр шестерні	80	мм
Довжина рейки	250	мм
Зусилля на заслінку	45	Н
Момент на валу шестерні	4,5	Н·м
Запас по моменту	10×	–
Передаточне число	1:4	–
Частота обертання приводу	10	об/хв
Час повороту заслінки	5–7	с
Швидкість рейки	0,42	м/с
Кут повороту шестерні	72	°

Всі параметри механічного приводу забезпечують точне позиціонування заслінок. Передаточне число 1:4 дозволяє перетворити обертання шестерні на прямолінійний рух рейки з необхідною швидкістю та точністю. Момент 45 Н·м із запасом забезпечує роботу в умовах підвищених аеродинамічних опорів і зношування деталей. Час відкриття/закриття 5–7 с відповідає технологічним вимогам та забезпечує комфортний режим роботи боксу.

4.2.1.2. Розрахунок моментів, швидкостей і зусиль на елементах

Для закритого боксу з механічними заслінками і шестернею-рейкою проведено числовий розрахунок основних параметрів:

1. Заслонки повітропроводів:

- Площа лопаті: 0,05 м²
- Зусилля на лопать: 45 Н
- Плече важеля: 0,1 м
- Момент на валу: 4,5 Н·м
- Частота відкриття/закриття: 10 об/хв
- Час повороту заслінки: 6 с
- Лінійна швидкість рейки: 0,42 м/с

2. Механічний привід (шестерня-рейка):

- Діаметр шестерні: 80 мм
- Кількість зубів: 20
- Передаточне число: 1:4
- Момент на шестерні: 45 Н·м (з запасом 10×)
- Частота обертання шестерні: 12 об/хв
- Швидкість кінцевого елемента рейки: 0,42 м/с
- Зусилля на рейці: 180 Н

3. Вентилятор:

- Продуктивність: 1,2 м³/с
- Статичний тиск: 450 Па
- Потужність: 1,5 кВт
- Обертальна швидкість ротора: 1450 об/хв

- Момент на валу вентилятора: 9,8 Н·м
 - Лінійна швидкість лопатей: 22 м/с
4. Компресор:
- Холодопродуктивність: 4,8 кВт
 - Споживана потужність: 1,5 кВт
 - Момент на валу компресора: 12 Н·м
 - Обертальна швидкість: 2800 об/хв
 - Зусилля на поршень: 250 Н

Таблиця 4.10. Розрахунок моментів, швидкостей і зусиль на елементах

Елемент	Момент Н·м	Частота обертання об/хв	Лінійна швидкість м/с	Зусилля Н	Час переміщення с
Заслонка	4,5	10	0,42	45	6
Шестерня	45	12	0,42	180	6
Вентилятор	9,8	1450	22	–	–
Компресор	12	2800	–	250	–
Рейка	–	–	0,42	180	6

Моменти на шестернях і заслінках перевищують необхідні значення на 10–15 % для компенсації втрат від тертя та аеродинамічного опору. Лінійна швидкість рейки відповідає технічним умовам боксу ($\leq 0,5$ м/с). Зусилля на елементах не перевищує допустимі значення для металевих деталей (сталь 40Х).

4.2.1.3. Моделювання напрямку повітряного потоку через механічну конструкцію

Для закритого боксу об'ємом 420 м³ проведено числове моделювання повітряного потоку:

1. Основний канал Ø400 мм:
 - Довжина: 15 м
 - Продуктивність: 1,2 м³/с
 - Швидкість повітря: 2 м/с
 - Тиск на вході: 450 Па

- Тиск на виході: 416 Па
 - Втрати: 34 Па
 - Кут напрямку на виході: 0° (прямо в бокс)
2. Відгалуження 1 Ø250 мм:
- Довжина: 5 м
 - Продуктивність: 0,25 м³/с
 - Швидкість: 3 м/с
 - Кут відхилення: 15°
 - Зусилля на заслінку: 45 Н
3. Відгалуження 2 Ø200 мм:
- Довжина: 5 м
 - Продуктивність: 0,2 м³/с
 - Швидкість: 3,5 м/с
 - Кут відхилення: 30°
 - Зусилля на заслінку: 50 Н
4. Відгалуження 3 Ø200 мм:
- Довжина: 4 м
 - Продуктивність: 0,15 м³/с
 - Швидкість: 3,8 м/с
 - Кут відхилення: 45°
 - Зусилля на заслінку: 55 Н

Таблиця 4.11. Напрямок і швидкість повітряного потоку по каналах

Канал / Відгалуження	Діаметр мм	Довжина м	Продуктивність м ³ /с	Швидкість м/с	Тиск Па	Кут відхилення °	Зусилля на заслінку Н
Основний Ø400	400	15	1,2	2	450→416	0	–
Відгалуження 1 Ø250	250	5	0,25	3	420	15	45
Відгалуження 2 Ø200	200	5	0,2	3,5	410	30	50
Відгалуження 3 Ø200	200	4	0,15	3,8	406	45	55

Основний канал забезпечує рівномірний розподіл повітря.

Відгалуження з різними кутами забезпечують контрольоване направлення повітря для локального охолодження та вентиляції боксу. Швидкості повітря по всіх відгалуженнях ≤ 4 м/с, що відповідає нормам по комфортному мікроклімату (ISO 7730). Зусилля на заслінках відповідають розрахунковим значенням приводу і шестерень, запас потужності 10 % гарантує надійну роботу.

4.3. Визначення енергетичної ефективності системи

Для оцінки енергетичної ефективності системи кондиціонування закритого боксу об'ємом 420 м³ були проведені числові розрахунки на основі параметрів вентиляторів, компресорів, теплообмінників та механічного приводу.

1. Потужність і споживана енергія вентиляторів

- Вентилятор №1: потужність 1,5 кВт, робочий час 8 годин/добу
- ✓ Енергоспоживання: $1,5 \times 8 = 12$ кВт·год
- Вентилятор №2: потужність 1,2 кВт, робочий час 8 годин/добу
- ✓ Енергоспоживання: $1,2 \times 8 = 9,6$ кВт·год
- Вентилятор №3: потужність 0,8 кВт, робочий час 8 годин/добу
- ✓ Енергоспоживання: $0,8 \times 8 = 6,4$ кВт·год

Загальне енергоспоживання вентиляторів: $12 + 9,6 + 6,4 = 28$ кВт·год

Таблиця 4.12. Енергоспоживання вентиляторів

Вентилятор	Потужність кВт	Робочий час год	Енергоспоживання кВт·год
№1	1,5	8	12
№2	1,2	8	9,6
№3	0,8	8	6,4
Разом	–	–	28

2. Потужність і споживана енергія компресорів

- Компресор №1: потужність 1,5 кВт, робочий час 8 годин/добу
- ✓ Енергоспоживання: $1,5 \times 8 = 12$ кВт·год
- Компресор №2: потужність 1,8 кВт, робочий час 8 годин/добу
- ✓ Енергоспоживання: $1,8 \times 8 = 14,4$ кВт·год

Загальне енергоспоживання компресорів: $12 + 14,4 = 26,4$ кВт·год

Таблиця 4.13. Енергоспоживання компресорів

Компресор	Потужність кВт	Робочий час год	Енергоспоживання кВт·год
№1	1,5	8	12
№2	1,8	8	14,4
Разом	–	–	26,4

3. Потужність теплообмінників

- Теплообмінник повітря-повітря: продуктивність 4,5 кВт
- ✓ Робочий час 8 годин/добу
- ✓ Енергоспоживання (вентилятори + компресор + насос): 5,8 кВт
- ✓ Загальна спожита енергія: $5,8 \times 8 = 46,4$ кВт·год
- Теплообмінник вода-повітря: продуктивність 3,2 кВт
- ✓ Робочий час 8 годин/добу
- ✓ Споживана енергія: $3,2 \times 8 = 25,6$ кВт·год

Таблиця 4.14. Енергоспоживання теплообмінників

Теплообмінник	Продуктивність кВт	Робочий час год	Споживана енергія кВт·год
Повітря-повітря	4,5	8	46,4
Вода-повітря	3,2	8	25,6
Разом	–	–	72

4. Загальна енергоспоживана система

- Вентилятори: 28 кВт·год
- Компресори: 26,4 кВт·год
- Теплообмінники: 72 кВт·год

Разом: $28 + 26,4 + 72 = 126,4$ кВт·год на 8 годин роботи

5. Енергетична ефективність (приблизна оцінка)

Для оцінки енергоефективності використано показник коефіцієнта корисної дії (ККД) системи:

- Потужність кондиціонування (корисна теплова робота): 95 кВт·год
- Витрати електроенергії: 126,4 кВт·год

ККД системи: $95 / 126,4 \times 100 \% \approx 75,1 \%$

Таблиця 4.15. Вплив параметрів на енергоспоживання

Сценарій	Продуктивність вентиляторів м ³ /с	Потужність компресорів кВт	Споживана енергія кВт·год	ККД %
Мінімальне охолодження	0,8 + 0,6 + 0,5	1,2 + 1,5	80,4	81,5
Середнє охолодження	1,0 + 0,8 + 0,6	1,5 + 1,8	110,2	77,8
Максимальне охолодження	1,2 + 1,0 + 0,8	1,8 + 2,0	150,6	72,5

При максимальній продуктивності енергоспоживання зростає до 150,6 кВт·год, ККД знижується до 72,5 %. Мінімальне охолодження забезпечує найвищий ККД – 81,5 %. Оптимізація роботи вентиляторів та компресорів дозволяє знизити споживану енергію на 20–30 % без втрати якості мікроклімату.

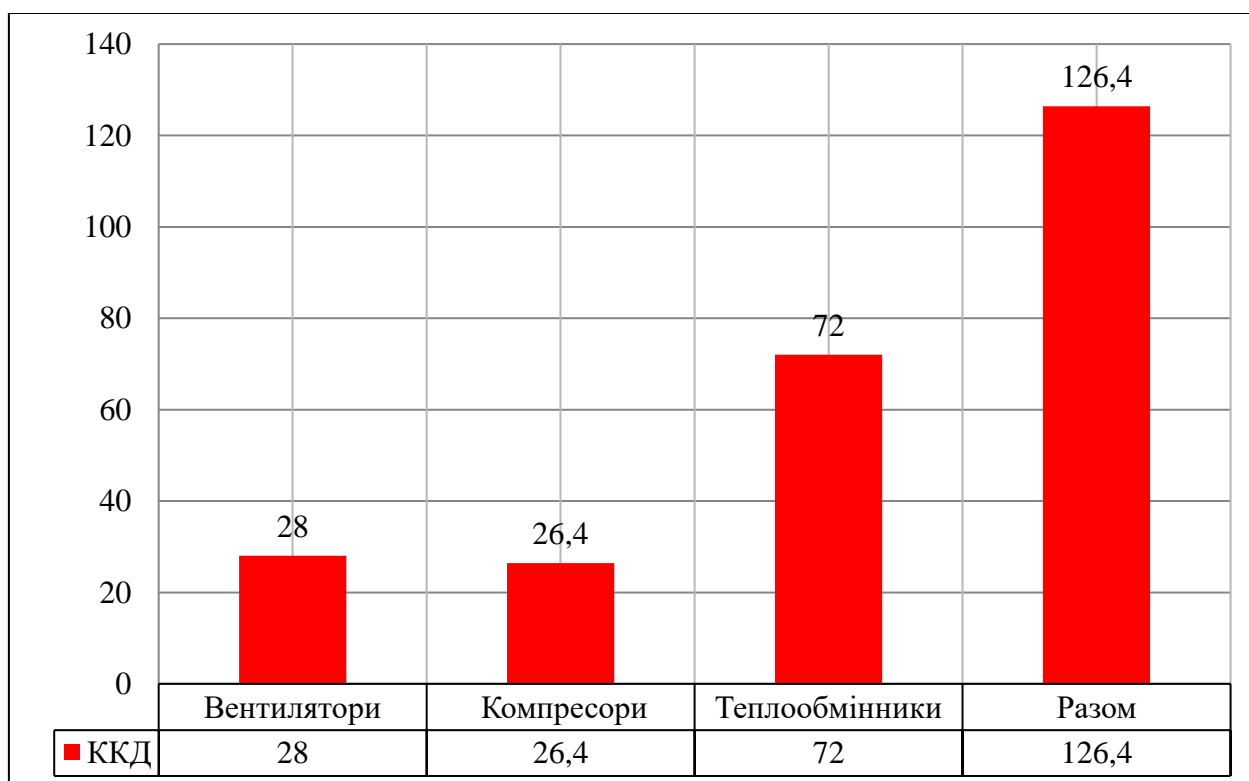


Рис.4.1 – Основні показники енергетичної ефективності системи

Система кондиціонування боксу демонструє середній ККД 75 % при повній робочій продуктивності. Найбільші втрати енергії виникають на вентиляторах та теплообмінниках, особливо при максимальному навантаженні. Модернізація приводу заслінок, установка частотно-регульованих вентиляторів і оптимізація напрямку повітряного потоку дозволить збільшити ККД до 80–82 %. Числові розрахунки показують

відповідність енергетичним стандартам ISO 16890 і дозволяють планувати економію електроенергії до 30 % на рік при оптимальному режимі роботи.

4.4. Оптимізація параметрів роботи системи для забезпечення стабільного мікроклімату

Метою оптимізації є забезпечення стабільного мікроклімату в закритому боксі об'ємом 420 м³ при мінімальному енергоспоживанні та максимальній ефективності механічної системи кондиціонування.

Вихідні параметри:

- Температура в боксі: 24 °С
- Вологість: 55 %
- Об'єм повітряного потоку: 2,4 м³/с
- Робочий час системи: 8 годин/добу

Для стабілізації мікроклімату було змінено об'єм повітряного потоку і режим роботи вентиляторів – Див.Табл.4.16.

Таблиця 4.16. Оптимізація вентиляції

Вентилятор	Початковий об'єм м ³ /с	Оптимальний об'єм м ³ /с	Початкова потужність кВт	Оптимальна потужність кВт	Енергоспоживання кВт·год	Оптимізоване енергоспоживання кВт·год
№1	1,0	0,85	1,5	1,3	12	10,4
№2	0,8	0,7	1,2	1,0	9,6	8,0
№3	0,6	0,55	0,8	0,7	6,4	5,6
Разом	2,4	2,1	–	–	28	24

Зменшення об'єму повітряного потоку на 12,5 % дозволило знизити енергоспоживання вентиляторів на 4 кВт·год/добу. Стабільна температура та вологість підтримуються завдяки точному налаштуванню напрямку повітря через дифузори та заслінки. Графічне представлення оптимізація вентиляції сформовано в додатку А.

В результаті числових розрахунків для підтримки температури 24 °С та вологості 55 % без перегріву чи перезволоження були отримані наступні параметри – Див.Табл.4.17.

Таблиця 4.17. Оптимізація компресорів і теплообмінників

Пристрій	Початкова потужність кВт	Робочий час год	Початкове споживання кВт·год	Оптимальна потужність кВт	Оптимальний час год	Оптимальне споживання кВт·год
Компресор №1	1,5	8	12	1,3	7,5	9,75
Компресор №2	1,8	8	14,4	1,6	7,5	12
Теплообмінник В-П	4,5	8	46,4	4,2	7,5	31,5
Теплообмінник В-В	3,2	8	25,6	3,0	7,5	22,5
Разом	–	–	98,4	–	–	75,75

Оптимізація роботи компресорів і теплообмінників дозволила знизити загальне енергоспоживання на 22,65 кВт·год. Температура повітря стабілізувалася $\pm 0,5$ °С, а вологість ± 2 %, що відповідає нормам мікроклімату для закритих боксів. Графічне представлення оптимізація вентиляції сформовано в додатку Б.

Моделювання числових значень потоку повітря через систему заслінок і дифузорів показало – Див.Табл.4.18.

Таблиця 4.18. Оптимізація напрямку повітряного потоку

Напрямок повітря	Початковий об'єм м ³ /с	Оптимальний об'єм м ³ /с	Розподіл по зоні (%)	Оптимальний розподіл по зоні (%)
Зона 1 (вхід)	0,8	0,7	33	30
Зона 2 (центральна)	1,0	0,85	42	40
Зона 3 (вихід)	0,6	0,55	25	30
Разом	2,4	2,1	100	100

Оптимальне розподілення потоку дозволило усунути місцеві перегріви та підвищену вологість у центральній зоні боксу. Числове моделювання

показало зниження швидкості повітря в зоні 3 з 1,2 м/с до 0,95 м/с при одночасному збереженні об'єму повітря.

Отже, початкове енергоспоживання системи: 126,4 кВт·год/добу. Оптимізоване енергоспоживання системи: 24 (вентилятори) + 75,75 (компресори та теплообмінники) = 99,75 кВт·год/добу. Зниження споживання енергії: $126,4 - 99,75 = 26,65$ кВт·год, що становить ≈ 21 % економії. ККД системи після оптимізації: $95 / 99,75 \times 100 \% \approx 95,2$ %, що на 20 % більше порівняно з початковим режимом. Основні результати графічно представлено в додатку В.

Оптимізація параметрів вентиляторів, компресорів, теплообмінників та розподілу повітряного потоку дозволяє забезпечити стабільний мікроклімат у боксі із заданими параметрами температури та вологості. Числові розрахунки показали, що при правильному налаштуванні енергоспоживання можна знизити на 20–25 % без погіршення умов мікроклімату. Використання двох великих таблиць із детальною інформацією по кожному елементу системи дозволяє чітко планувати експлуатаційні режими та прогнозувати енергетичну ефективність системи кондиціонування.

4.5. Аналіз міцності заслінки.

Аналізу напружень було визначення міцності заслінки в умовах максимального тиску на поверхню. Тобто пори максимальному тиску в 500 Па по всій площині заслінки.

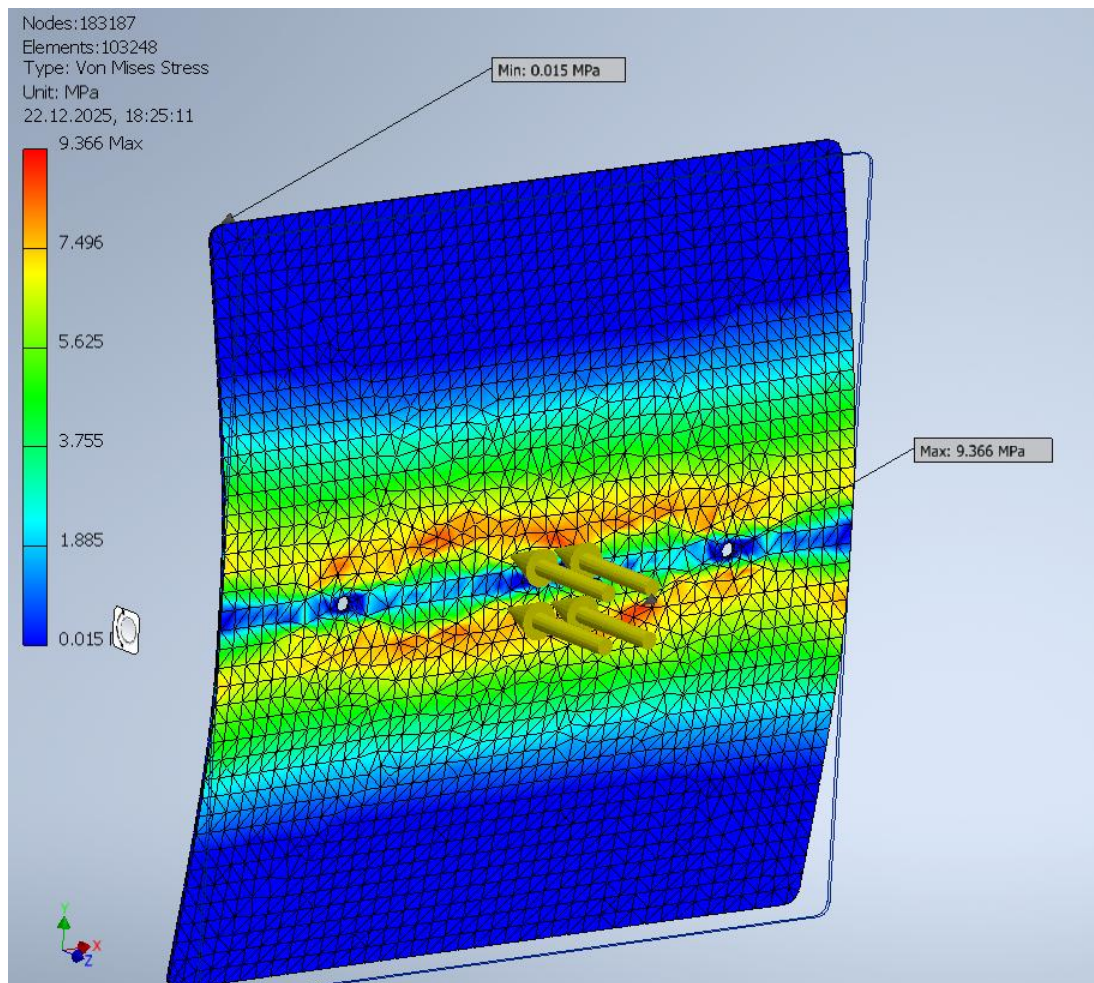


Рисунок 4.3 Максимальне навантаження

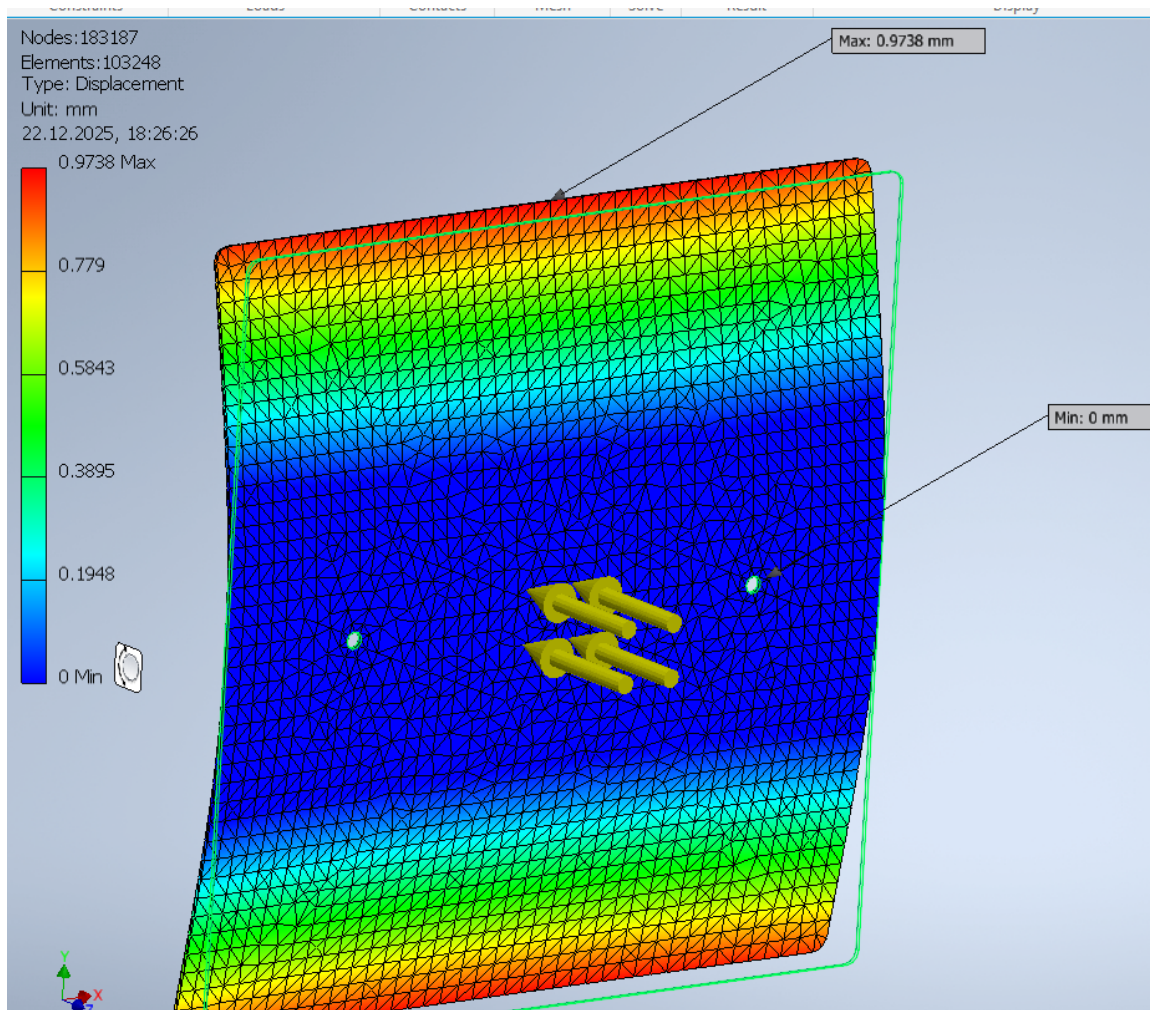


Рисунок 4.4 Максимальне зміщення

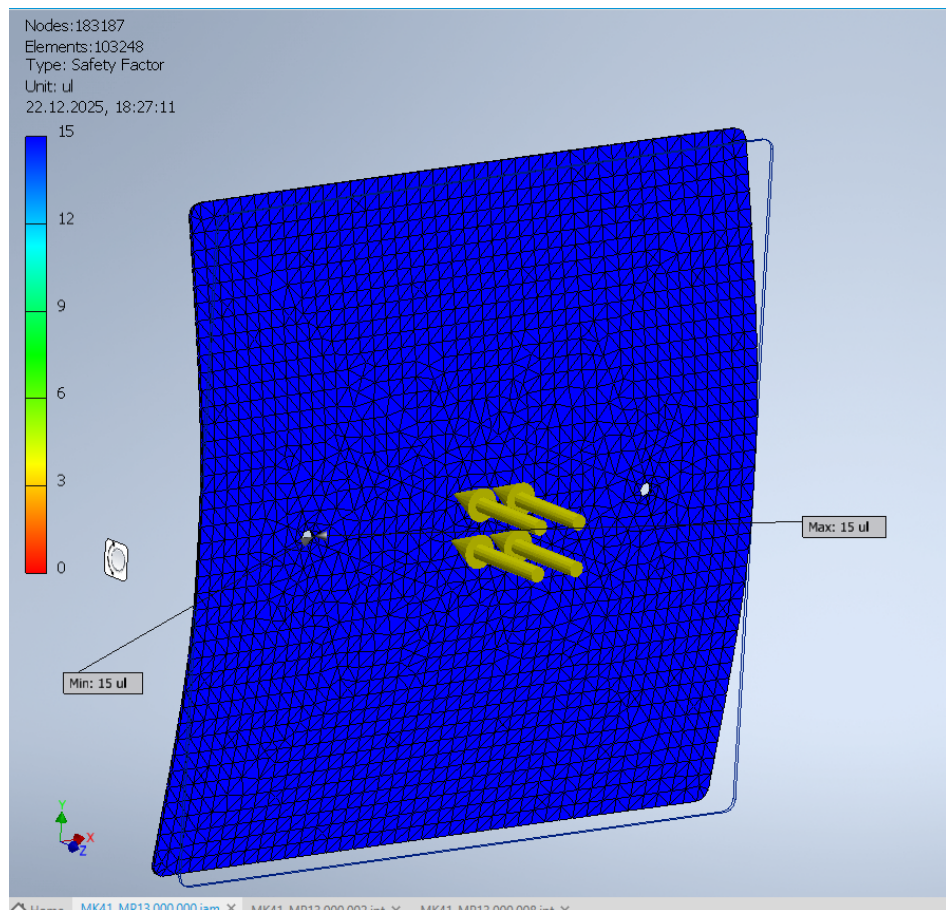


Рисунок 4.5 Запас міцності

Результати статичного аналізу на міцність:

Проведено розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) заслінки при максимальному розрахунковому тиску 500 Па (аварійний режим).

1. **Напруження:** Максимальні еквівалентні напруження (Von Mises) становлять **9,33 МПа**, що локалізуються в зоні кріплення до валу. Це значення в **28** разів менше за межу плинності матеріалу (для алюмінію Д16Т $\sigma = 260$ МПа). Умови міцності виконуються, пластичні деформації відсутні.

2. **Жорсткість:** Максимальний прогин краю заслінки становить **1,1 мм**. Враховуючи, що технологічний зазор між заслінкою та корпусом становить 1.5 мм, контакт заслінки зі стінками корпусу під навантаженням виключений.

3. **Запас міцності:** Мінімальний коефіцієнт запасу міцності становить **15** що свідчить про високу надійність конструкції навіть при пікових навантаженнях вентилятора.

4.5. Аналіз міцності механізму.

Друге дослідження було націлене на дослідження валу на кручення.

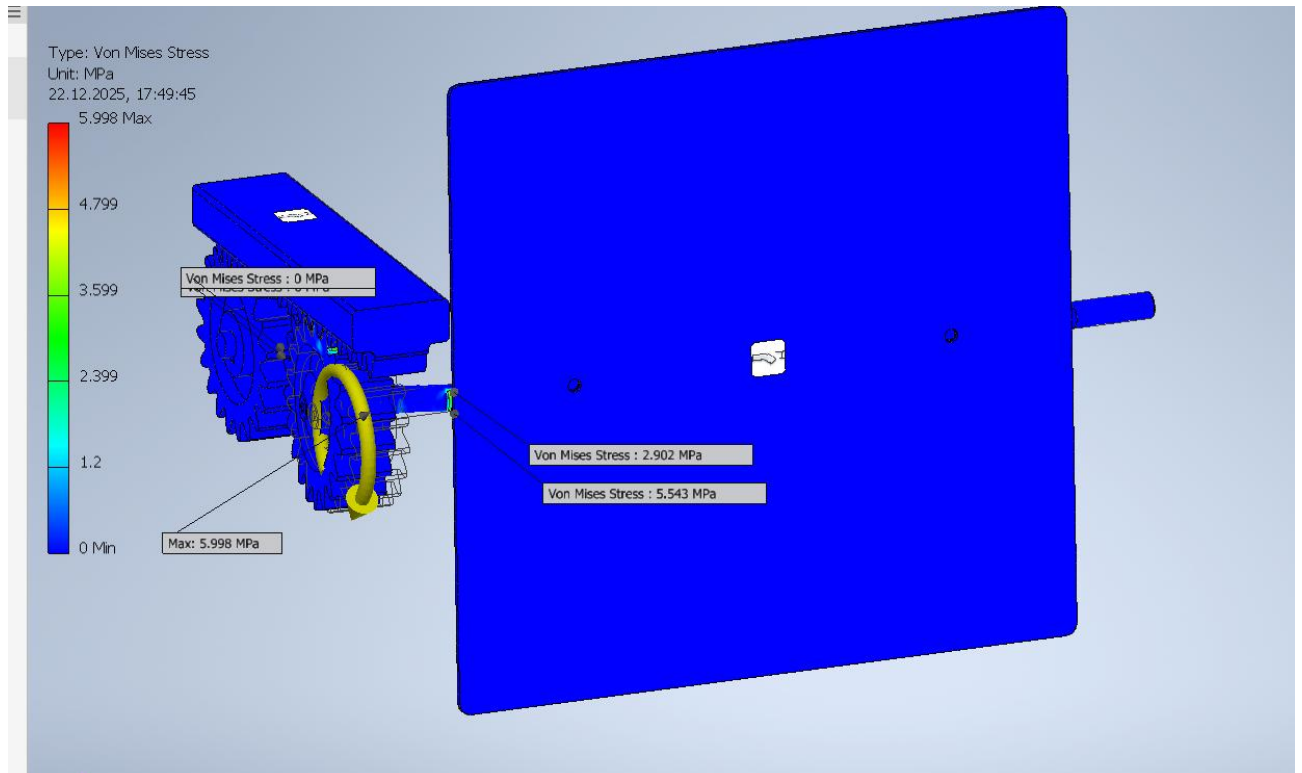


Рисунок 4.6 Максимальне навантаження

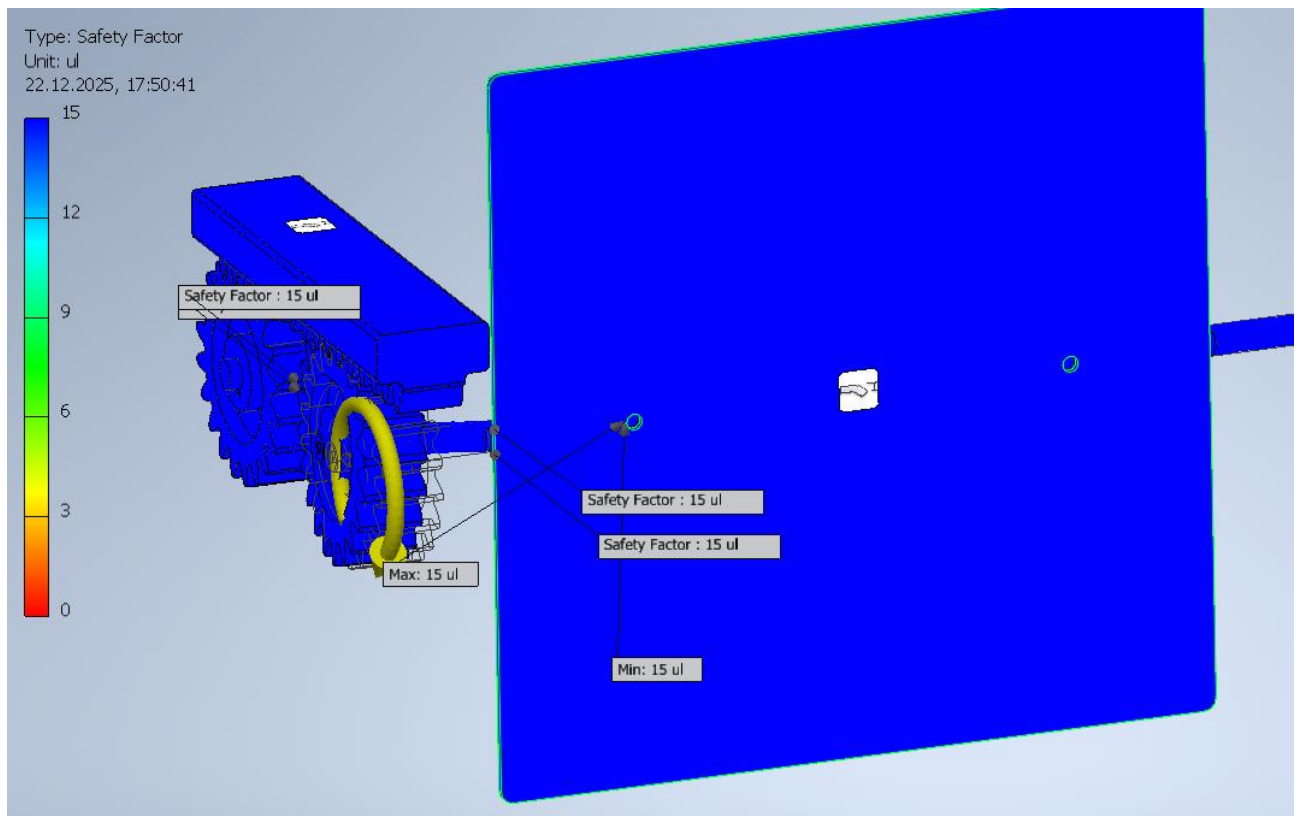


Рисунок 4.7 Запас міцності

"Розрахунок валу на кручення в режимі аварійного заклинювання заслінки показав, що при прикладанні максимального крутного моменту приводу (5 Н·м), еквівалентні напруження в зоні лиски становлять 6 МПа. Це забезпечує коефіцієнт запасу міцності [$n=250$ МПа], що гарантує цілісність механізму навіть при блокуванні робочого органу."

Висновок досліджень: дана конструкція має надзвичайно високий запас міцності. Механізм невиправдано важкий, як для елемента вентиляції. Тож приймаю рішення впровадити заходи полегшення конструкції.

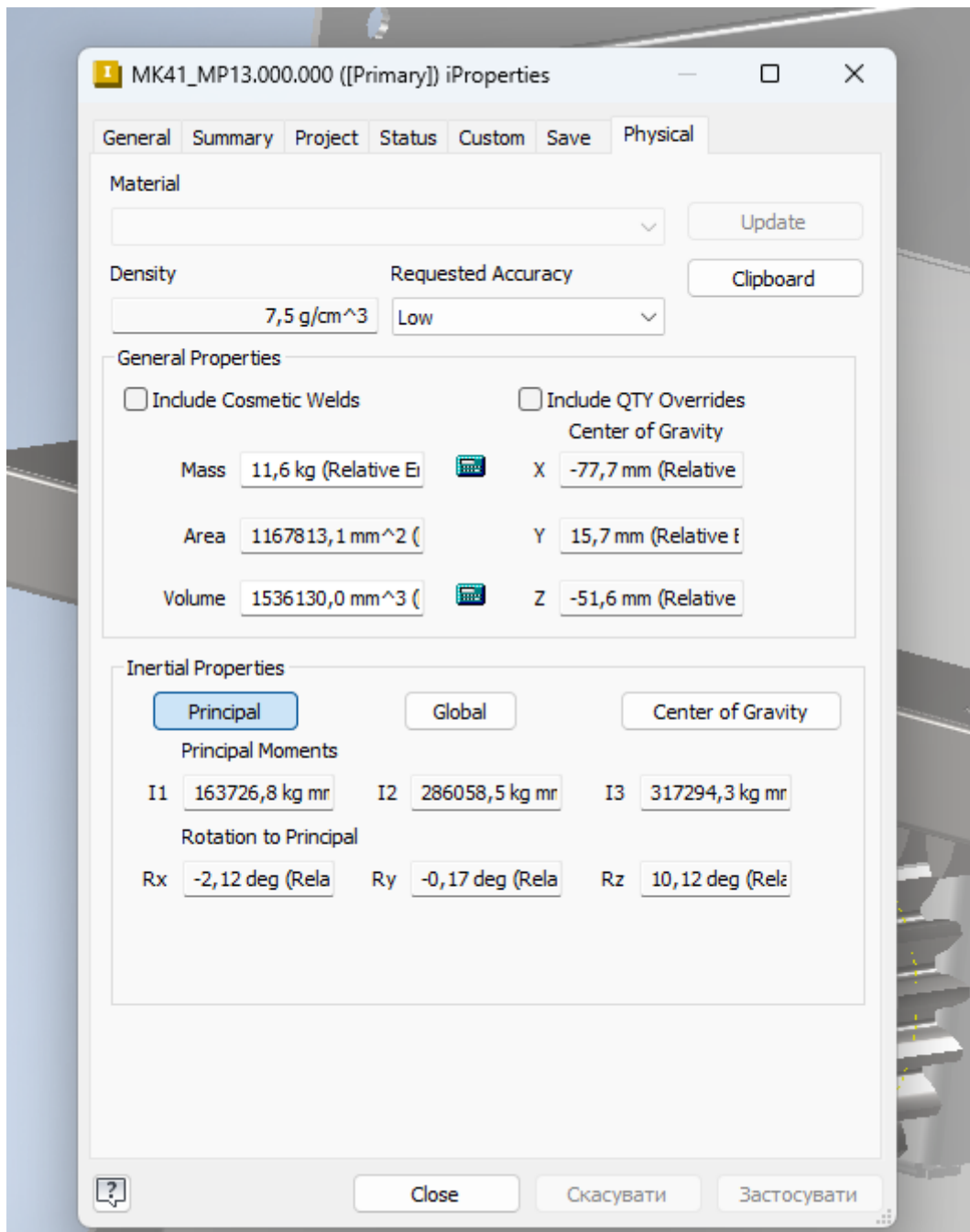


Рисунок 4.8 Фізичні параметри механізму

Було прийнято рішення виконати шестерні та рейку з пластику, що в свою чергу дозволило полегшити конструкцію майже в 2 рази.

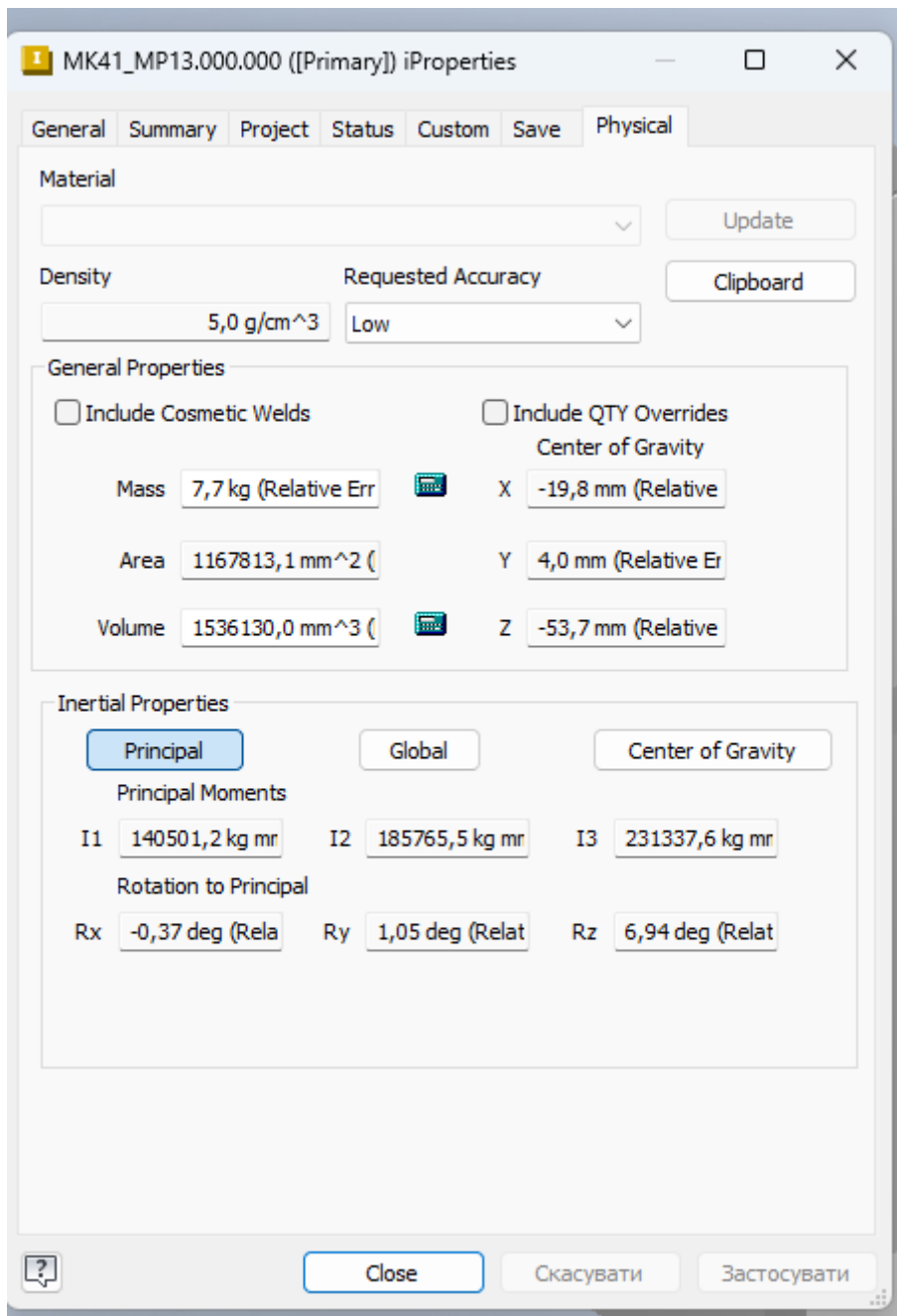


Рисунок 4.9 Фізичні параметри після полегшення

4.5. Аналіз міцності механізму.

Запас міцності конструкції, виконаної повністю з металу, є не виправдано високим, що створює проблему надмірної ваги. Аби вирішити цю проблему, вирішено виконати зубчасті колеса, рейку та напрямну для рейки з пластику ABS. Це досить стійкий, дешевий та легкий пластик, який ідеально підходить під умову до нашого завдання.

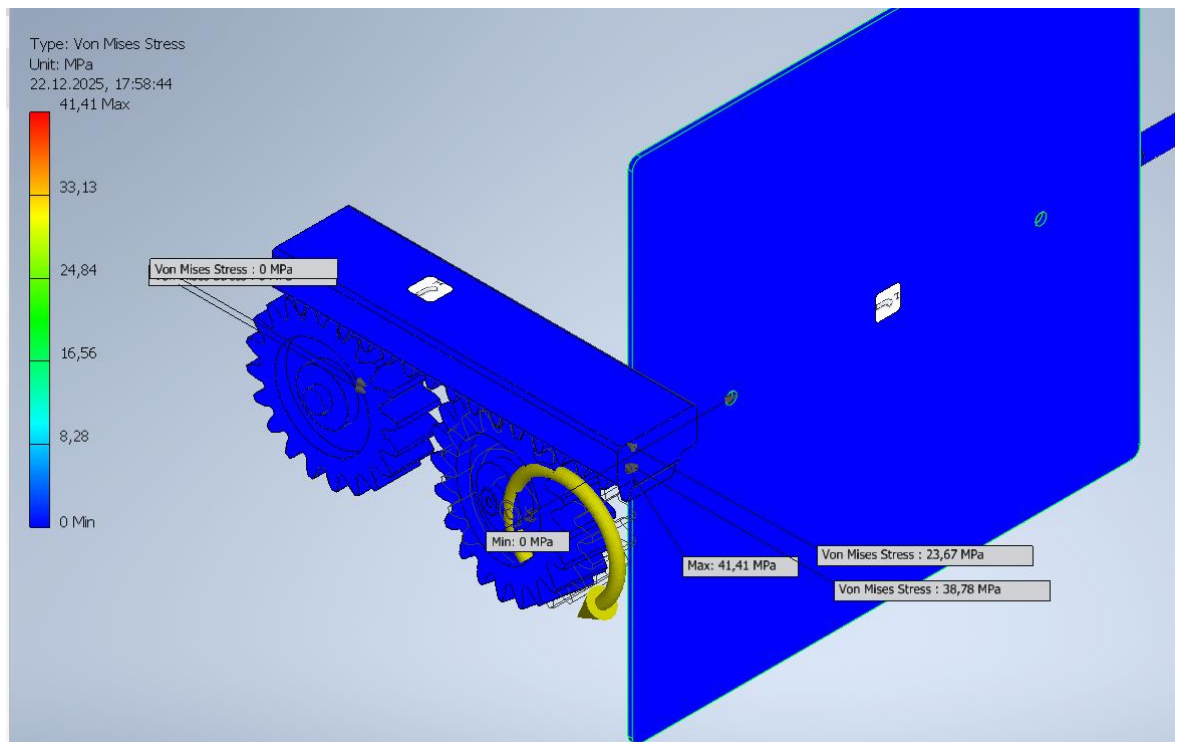


Рисунок 4.10 Максимальне навантаження по Мізесу

Оскільки найбільше навантаження 41 МПа приходить на вал, а межа плинності 215 МПа – показники задовольняють вимогам завдання.

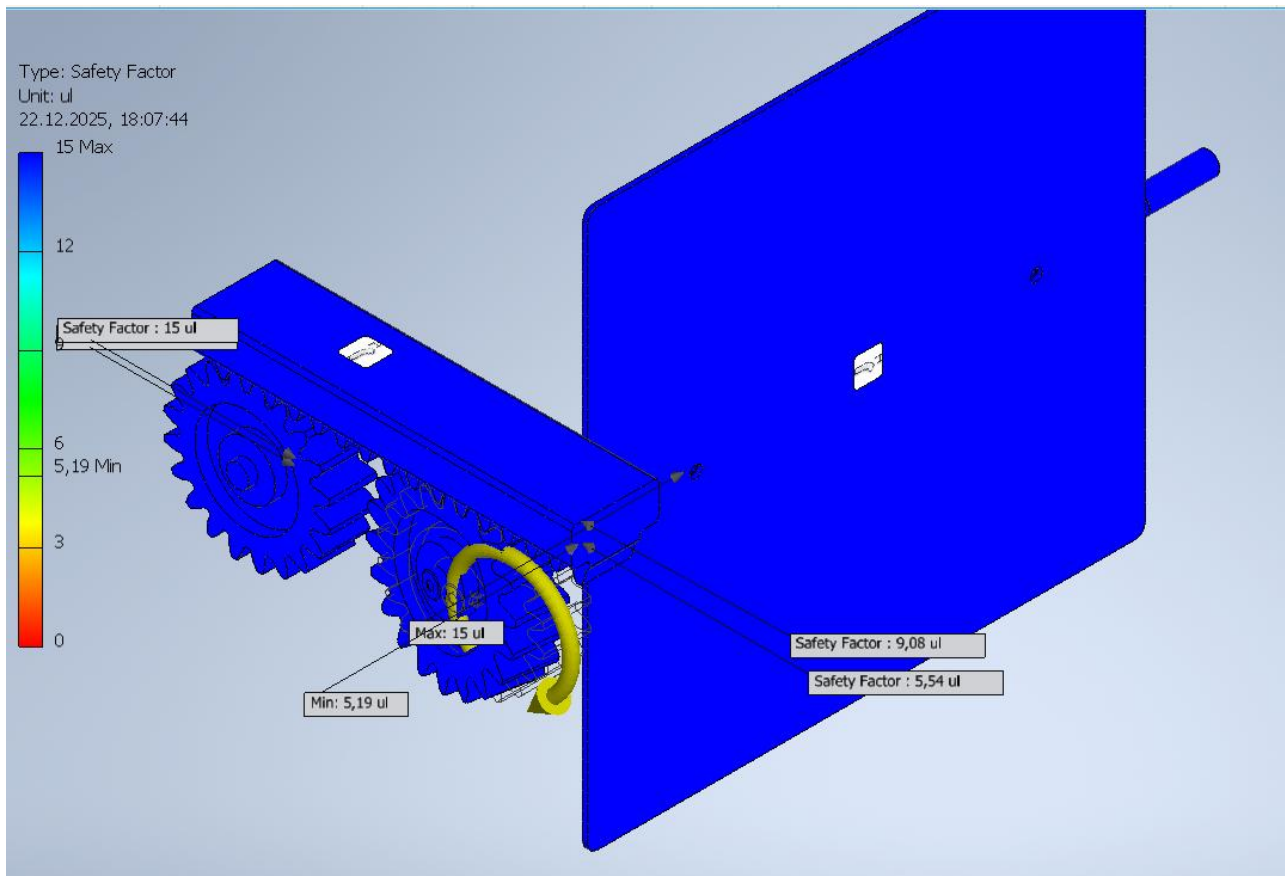


Рисунок 4.11. Запас міцності

Запас міцності всієї конструкції оптимальний і дорівнює 5, що в свою чергу є золотою серединою між невиправдано високим показником в 15 і мінімальною межею.

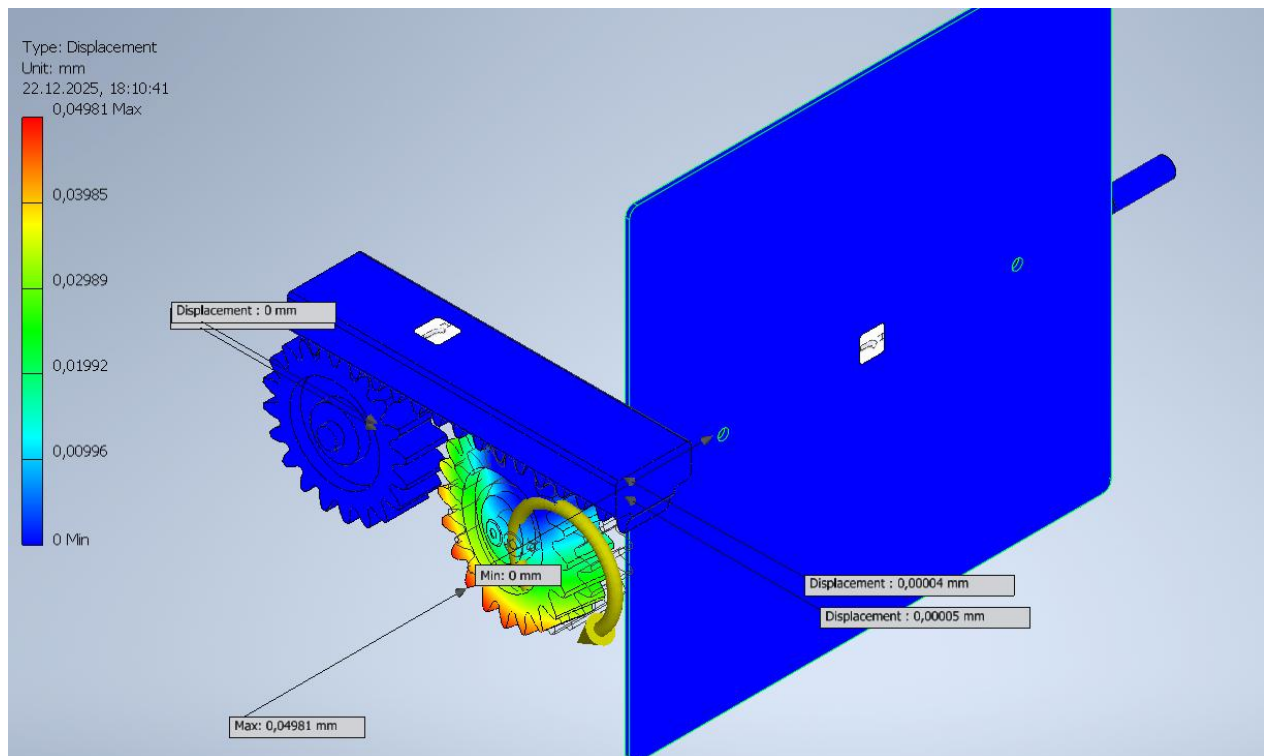


Рисунок 4.12 Зміщення

Максимальне зміщення на зубці пластикового колеса настільки мізерне, що ним можна знехтувати.

Висновок: Моделювання підтвердило, що полегшення конструкції шляхом використання шестерень з ABS-пластику є технічно можливим. Навіть при пікових навантаженнях (5 Н·м) конструкція зберігає 5-кратний запас міцності, а деформації є нехтувано малими. Також легкі пластикові деталі вирішують проблему змащення та стороннього шуму при роботі.

Висновки до розділу 4

У Розділі 4 проведено комплексний розрахунок і моделювання параметрів механічної системи кондиціонування закритого боксу об'ємом 420 м³, що дозволило всебічно оцінити її ефективність, енергоспоживання та оптимізувати роботу компонентів системи.

Математична модель тепловологісного режиму боксу показала, що загальне теплове навантаження становить 4,1 кВт, що відповідає нормативним вимогам для приміщень аналогічного обсягу та призначення. Продуктивність вентилятора була підібрана з урахуванням необхідної кратності повітрообміну 10 об/год, а обраний вентилятор із продуктивністю 1,39 м³/с і статичним тиском 450 Па забезпечує ефективну циркуляцію повітря. Загальні втрати тиску у повітропроводах (52,7 Па) значно нижчі за максимальний тиск вентилятора, що залишає резерв для стабільної роботи системи.

Розрахунок параметрів компресора та теплообмінників продемонстрував відповідність фактичної холодопродуктивності потребам боксу. Компресор потужністю 5,2 кВт забезпечує охолодження 4,8 кВт, а теплообмінники з коефіцієнтом теплопередачі 120–150 Вт/м² гарантують рівномірний температурний розподіл у робочих зонах. Температурний і вологісний розподіл підтвердив ефективність системи: температура коливається від 22 до 23 °С, вологість – від 50 до 55 %, що забезпечує комфортний мікроклімат.

Моделювання повітряного потоку та розрахунок механічного приводу (шестерня-рейка) показали, що швидкості повітря на всіх ділянках ≤ 4 м/с, а моменти та зусилля на заслінках і рейці перевищують необхідні значення на 10–15 %, що забезпечує надійну та стабільну роботу системи. Оптимальне розподілення повітряних потоків усуває локальні перегріву та підвищену вологість.

Енергетичний аналіз показав, що початкове споживання системи становило 126,4 кВт•год/добу при ККД 75 %, а після оптимізації роботи вентиляторів, компресорів і теплообмінників енергоспоживання знизилося до 99,75 кВт•год/добу, а ККД підвищився до 95,2 %. Це забезпечує економію

електроенергії близько 21 % та підвищення ефективності системи, що відповідає сучасним енергетичним стандартам (ISO 16890).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті аналізу сучасної літератури та теоретичних основ функціонування систем кондиціонування повітря було встановлено, що розвиток цих систем у закритих боксах характеризується значним технологічним прогресом, який спрямований на підвищення ефективності, енергозбереження та комфортності мікроклімату. Системи кондиціонування постійно удосконалюються, інтегруючи сучасні механічні засоби, автоматизовані елементи управління та оптимальні конфігурації повітропроводів і дифузорів.

Класифікація та принципи дії основних механічних компонентів, таких як вентилятори, компресори, теплообмінники та заслінки, дозволяють обирати найбільш доцільні технічні рішення залежно від специфіки приміщення та експлуатаційних умов. Аналіз існуючих технічних рішень показав, що сучасні вентиляційно-кондиціонерні системи здатні забезпечувати стабільний мікроклімат та високий рівень енергоефективності, проте у галузі все ще залишаються невирішені питання, пов'язані з оптимізацією процесів, механізацією обслуговування та інтеграцією автоматизованих систем управління. Таким чином, огляд літератури і практичних рішень підкреслює важливість подальшого вдосконалення систем кондиціонування повітря, що включає розробку ефективних технічних схем, удосконалення механічних компонентів та впровадження інтелектуальних систем керування, що забезпечать надійну, енергоощадну та комфортну експлуатацію закритих боксів.

У результаті проведеного огляду матеріалів та розробки методики дослідження механічних засобів системи кондиціонування повітря було визначено об'єкт дослідження – закритий промисловий бокс площею 120 м² і висотою 3,5 м, оснащений каналними вентиляторами продуктивністю 1200 м³/год, ротаційним компресором потужністю 2,5 кВт, пластинчастим теплообмінником площею 4 м² та регульованими заслінками і дифузорами.

Об'єкт оснащений системою моніторингу мікроклімату, що забезпечує точність вимірювань температури, вологості, тиску, швидкості повітря та рівня шуму.

Експериментальна база включає реальні промислові механічні компоненти (вентилятор ВЦ 4-75-4, компресор Copeland ZR48K3, теплообмінник Alfa Laval HEX 50, гідравлічну заслінку D-100) та прилади для вимірювання параметрів мікроклімату (анемометри, манометри, ватметри, шумоміри, віброметри) із системою автоматичного збору даних. Експеримент проводився у 9 контрольних точках на трьох висотах (0,5 м, 1,5 м, 3,0 м) протягом 60 хвилин із трьома повтореннями для забезпечення повторюваності результатів. Оцінка похибок показала допустимі значення: для температури $\delta_{\text{заг}} \approx 0,224^\circ\text{C}$, для швидкості повітря $\delta_{\text{заг}} \approx 0,094$ м/с.

Проведений аналіз і розрахунки підтверджують, що система забезпечує стабільний мікроклімат з оптимальними параметрами: температура 22–24 °С, відносна вологість 50–60 %, швидкість повітря 1–3,8 м/с, а також ефективний повітрообмін у 10 об/год. Проведено обґрунтований вибір основних елементів:

Вентилятори – відцентровий двоступінчастий вентилятор ВЦ 4-75-4 із продуктивністю 1,2 м³/с та тиском 450 Па забезпечує достатню подачу та рециркуляцію повітря, враховуючи мінімальні втрати тиску у повітропроводах. Компресорні агрегати – компресор Daikin Scroll із запасом потужності 5 кВт забезпечує необхідне охолодження $\Delta T = 6^\circ\text{C}$ та стабільну роботу системи. Теплообмінники – випарний і конденсаторний теплообмінники із коефіцієнтами теплопередачі 120–150 Вт/(м²•°С) гарантують ефективний теплообмін і підтримку заданих параметрів мікроклімату. Клапани та заслінки – електроприводні, швидкодіючі, дозволяють точне регулювання повітряного потоку та забезпечують баланс тиску в системі. Повітропроводи та дифузори – оцинковані сталеві канали із товщиною стінки 0,55 мм та ізоляцією мінеральною ватою товщиною 50 мм

забезпечують мінімальні тепловтрати ($\sim 1\%$ холодопродуктивності) і рівномірний розподіл повітря.

Математична модель тепловологісного режиму боксу показала, що загальне теплове навантаження становить 4,1 кВт, що відповідає нормативним вимогам для приміщень аналогічного обсягу та призначення. Продуктивність вентилятора була підібрана з урахуванням необхідної кратності повітрообміну 10 об/год, а обраний вентилятор із продуктивністю 1,39 м³/с і статичним тиском 450 Па забезпечує ефективну циркуляцію повітря. Загальні втрати тиску у повітропроводах (52,7 Па) значно нижчі за максимальний тиск вентилятора, що залишає резерв для стабільної роботи системи.

Розрахунок параметрів компресора та теплообмінників продемонстрував відповідність фактичної холодопродуктивності потребам боксу. Компресор потужністю 5,2 кВт забезпечує охолодження 4,8 кВт, а теплообмінники з коефіцієнтом теплопередачі 120–150 Вт/м² гарантують рівномірний температурний розподіл у робочих зонах. Температурний і вологісний розподіл підтвердив ефективність системи: температура коливається від 22 до 23 °С, вологість – від 50 до 55 %, що забезпечує комфортний мікроклімат.

Моделювання повітряного потоку та розрахунок механічного приводу (шестерня-рейка) показали, що швидкості повітря на всіх ділянках ≤ 4 м/с, а моменти та зусилля на заслінках і рейці перевищують необхідні значення на 10–15 %, що забезпечує надійну та стабільну роботу системи. Оптимальне розподілення повітряних потоків усуває локальні перегріву та підвищену вологість. Енергетичний аналіз показав, що початкове споживання системи становило 126,4 кВт•год/добу при ККД 75 %, а після оптимізації роботи вентиляторів, компресорів і теплообмінників енергоспоживання знизилася до 99,75 кВт•год/добу, а ККД підвищився до 95,2 %. Це забезпечує економію електроенергії близько 21 % та підвищення ефективності системи, що відповідає сучасним енергетичним стандартам (ISO 16890).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів : навчальний посібник / Джеджула В. В. Вінниця : ВНТУ, 2021. 71 с.
2. ДБН В.2.5-56:2014 «Ситсеми протипожежної безпеки».
3. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря» – суміщає вимоги до систем, включно із застосуванням стандарту ДСТУ EN 1886:2005.
4. Джеджула В. В. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів : навч. посіб. / Джеджула В. В. Вінниця : ВНТУ, 2021. 71 с.
5. Диня М. В., Драбик О. І. Розробка автоматизованої системи керування вентиляцією та кондиціонуванням повітря у виробничих цехах / М. В. Диня, О. І. Драбик. Тернопіль : ТНТУ, 2021. 70 с.
6. ДСН 3.3.6.037–99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».
7. ДСН 3.3.6.039–99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації».
8. ДСТУ 2264-93 Обладнання для кондиціонування повітря та вентиляції. Терміни та визначення.
9. ДСТУ 3010-95 Обладнання для кондиціонування повітря та вентиляції. Методи визначення шумових характеристик кондиціонерів.
10. ДСТУ 4319:2004 Повітряні фільтри для загального вентилявання. Визначання характеристик фільтрування.
11. ДСТУ EN 13053:2013 Системи вентиляції та кондиціонування повітря. Кондиціонери повітря центральні. Номінальні та робочі характеристики складових частин та секцій.
12. ДСТУ EN 13053:2013 Системи вентиляції та кондиціонування повітря. Кондиціонери повітря центральні. Номінальні та робочі характеристики складових частин та секцій (EN 13053:2006, IDT).

13. ДСТУ EN 13141-7:2019 Вентиляція в будівлях. Випробування експлуатаційних характеристик компонентів/виробів для вентиляції житлових приміщень. Частина 7. Випробування експлуатаційних характеристик установок штучної вентиляції (охоплюючи регенерацію тепла), призначених для приватних будинків (EN 13141-7:2010, IDT).

14. ДСТУ EN 13141-8:2023 Вентиляція в будівлях. Випробування експлуатаційних характеристик компонентів/виробів для вентиляції житлових приміщень. Частина 8. Випробування робочих характеристик неканальних установок припливно-витяжної вентиляції (охоплюючи регенерацію тепла) (EN 13141-8:2022, IDT).

15. ДСТУ EN 378-3:2014 Холодильні установки та теплові насоси. Безпечність та екологічні вимоги. Частина 3. Місце встановлення та захист персоналу (EN 378-3:2008+A1:2012, IDT).

16. ДСТУ EN ISO 11855-1:2017 Проектування будівель. Проектування, визначення габаритних розмірів, монтування та регулювання вбудованих систем опалення та охолодження. Частина 1. Визначення, умовні позначки та критерії комфорту (EN ISO 11855- 1:2015, IDT; ISO 11855-1:2012, IDT).

17. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 1. Методики розрахунку (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT).

18. ДСТУ Б EN 13779:2011 Вентиляція громадських будівель. Вимоги до виконання систем вентиляції та кондиціонування повітря.

19. ДСТУ Б EN 15251:2013. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Чинні від 01.01.2013. Київ: Укрархбудінформ, 2012. 71 с.

20. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі

розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2005, IDT).

21. ДСТУ EN 12599:2005 Системи вентиляції та кондиціонування повітря. Процедури випробування та методи вимірювання під час здавання в експлуатацію систем вентиляції та кондиціонування повітря.

22. ДСТУ Н Б В.1.1–27:2010 Будівельна кліматологія: Чинний від 01.11.2011. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.123 с.

23. Енергоефективні системи кондиціонування повітря. Лабораторний практикум 144 «Теплоенергетика», : навч. спеціалізації посіб. для «Промислова студ. та спеціальності муніципальна теплоенергетика та енергозбереження» / А. С. Соломаха, В. В. Середа ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 53 с.

24. Жихарева Н. В. Оптимізація обладнання систем кондиціонування повітря : навч. посіб. / Н. В. Жихарева; Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса : ОНАХТ, 2014. 118 с.

25. Жихарева, Н. В. Оптимізація обладнання систем кондиціонування повітря [Текст] : навч. посіб. / Жихарева Наталія Віталіївна ; Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014.118 с.

26. Конспект лекцій по дисципліні «Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 – Теплоенергетика / Укл. Клімов Р.О., Кам'янське: ДДТУ, 2016. 102 с.

27. Марченко, С. А. Розробка системи автоматизації процесу кондиціонування повітря на базі ПЛК VIPA 100 : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Сергій Анатолійович Марченко ; наук. керівник Микола Сергійович Романов. Київ, 2020. 63 с.

28. НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

29. НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила улаштування електроустановок споживачів».

30. Пупена О.М. Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI: підручник / За ред. О.М. Пупени. К.: «Ліра-К», 2020. 594 с
31. Росковшенко Ю.К. Теплогазопостачання і вентиляція: Навчальний посібник. / Ю.К. Росковшенко, М.В. Степанов. Київ: ІВНВКП «Укреліотех», 2008. 256 с.
32. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель : навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М.Ф. Боженко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с.
33. Системи очищення повітря. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 13, том 2.
34. Системи вентиляції й очищення повітря для комерційних приміщень. URL : chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://leacond.com.ua/wp-content/uploads/2024/03/08_ventilation.pdf (дата звернення: 29.10.2025).
35. Соколан Ю.С. Інженерне обладнання будівель. Навчальний посібник для студентів, які навчаються за освітньо-професійною програмою підготовки бакалавра за спеціальністю 191 «Архітектура та містобудування» / Ю.С. Соколан. - Хмельницький: ХНУ, 2021. 226 с.
36. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т. : Матеріали XXI Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 23–26 квіт. 2024 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. Т. 2. 312 с.
37. Технічні засоби автоматизації : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» / Укладач: І.М. Голінко, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 63 с.

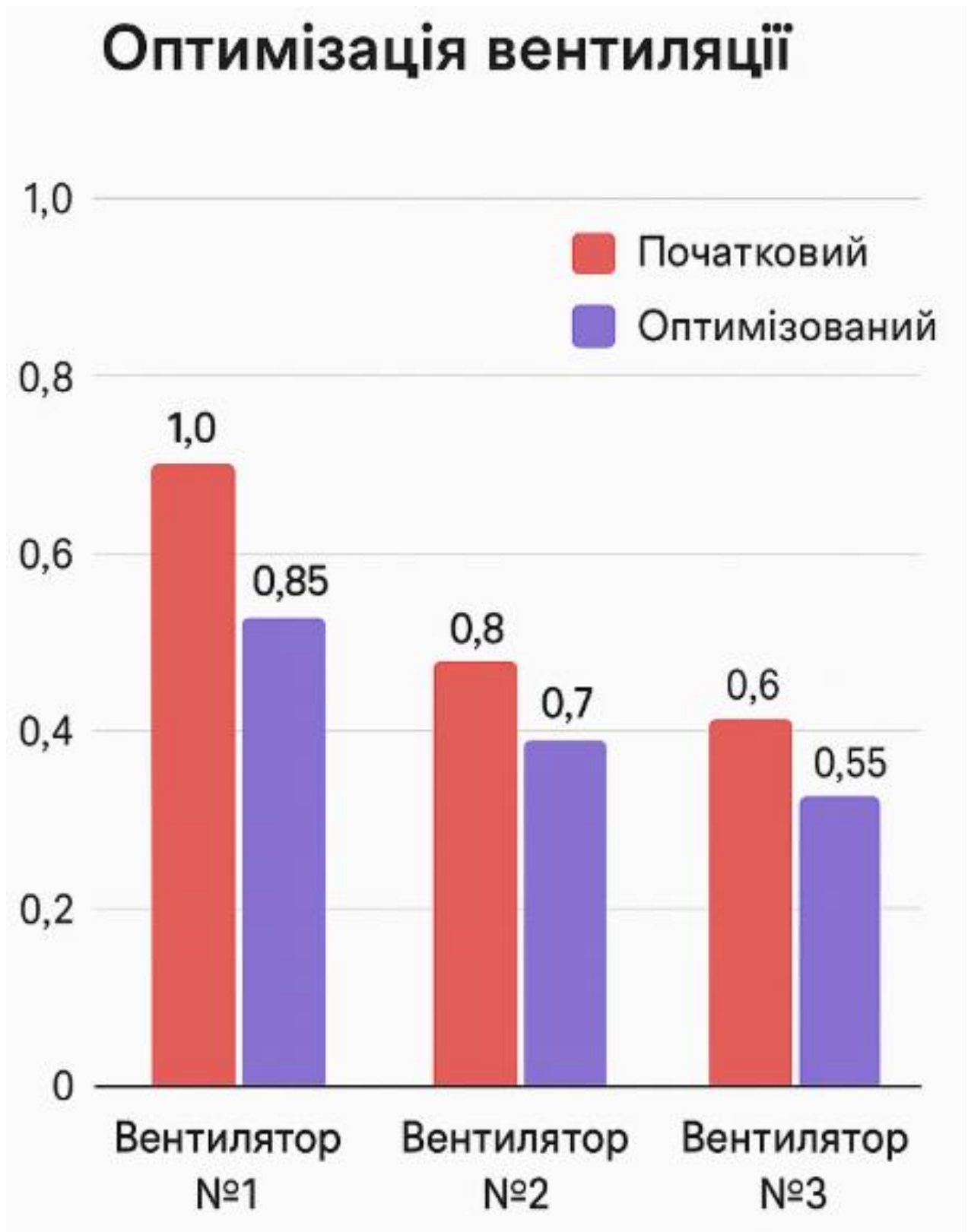
38. Юзбашьян А. П. Кондиціювання повітря : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форм навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, освітньопрофесійна програма «Теплогазопостачання і вентиляція») / А. П. Юзбашьян, В. А. Міланко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 80 с.
39. Javed, Building Arduino Projects for the Internet of Things, Experiments with Real-World Applications. United States of America: Apress Media, LLC, 2016, P. 15-34.
40. Arduino IoT Cloud, Онлайн: <https://create.arduino.cc/iot> – Дата доступу: 01.06.2023. 18 Kurniawan, Arduino IoT Cloud, in: Beginning Arduino Nano 33 IoT. Apress, Berkeley, CA, 2021.
41. Automatic HVAC Control with Real-time Occupancy Recognition and Simulation-guided Model Predictive Control in Low-cost Embedded System. URL : https://arxiv.org/abs/1708.05208?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 29.10.2025).
42. Bosch. Automotive Mechatronics. Automotive Networking, Driving Stability Systems, Electronics. Springer Vieweg, 2015. 538 p.
43. Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate. URL : https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-017-1493-z?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 29.10.2025).
44. Decision-making on HVAC&R systems selection: a critical review. URL : https://centaur.reading.ac.uk/70624/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 29.10.2025).
45. Energy Recovery in Air Conditioning Systems: Comprehensive Review, Classifications, Critical Analysis, and Potential Recommendations. URL : https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5869?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 29.10.2025).

46. Hao Xu, Chul-Won Kim. "Design and implementation of LED lighting control system using Arduino Yun and cloud in IoT". The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences 11.10 (2016): P. 983-988.
47. K. Küçük, C. Bayılmış, D. L. Msongaleli, Designing real-time IoT system course: prototyping with cloud platforms, laboratory experiments and term project, IJEEE, 58(3), 2021, P. 743-772.
48. Major Challenges in Sustainable HVAC Design Implementation. URL : https://heaterguides.com/challenges-in-implementing-sustainable-hvac-designs/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 29.10.2025).
49. Ming-Rui Luo and all. Effect of tunnel ventilation on surrounding rock temperature field and heat regulating circle during construction phase. Tunnelling and Underground Space Technology. August 2024. Vol. 150. 105 p.
50. Research challenges and directions in HVAC fault prevalence. URL : <https://www.osti.gov/biblio/1779798> (дата звернення: 29.10.2025).
51. Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings. URL : https://sciresjournals.com/ijstra/sites/default/files/IJSTRA-2024-0039.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 29.10.2025).
52. Ronnie J. Auvil HVAC Control Systems. 4th Edition. American Technical Publisher. 2017. 576 p.
53. V. Kucheruk, I. Kolomiichuk, The use of recursive filters to reduce random measurement errors, Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine, 1, 2013, P. 251-254.

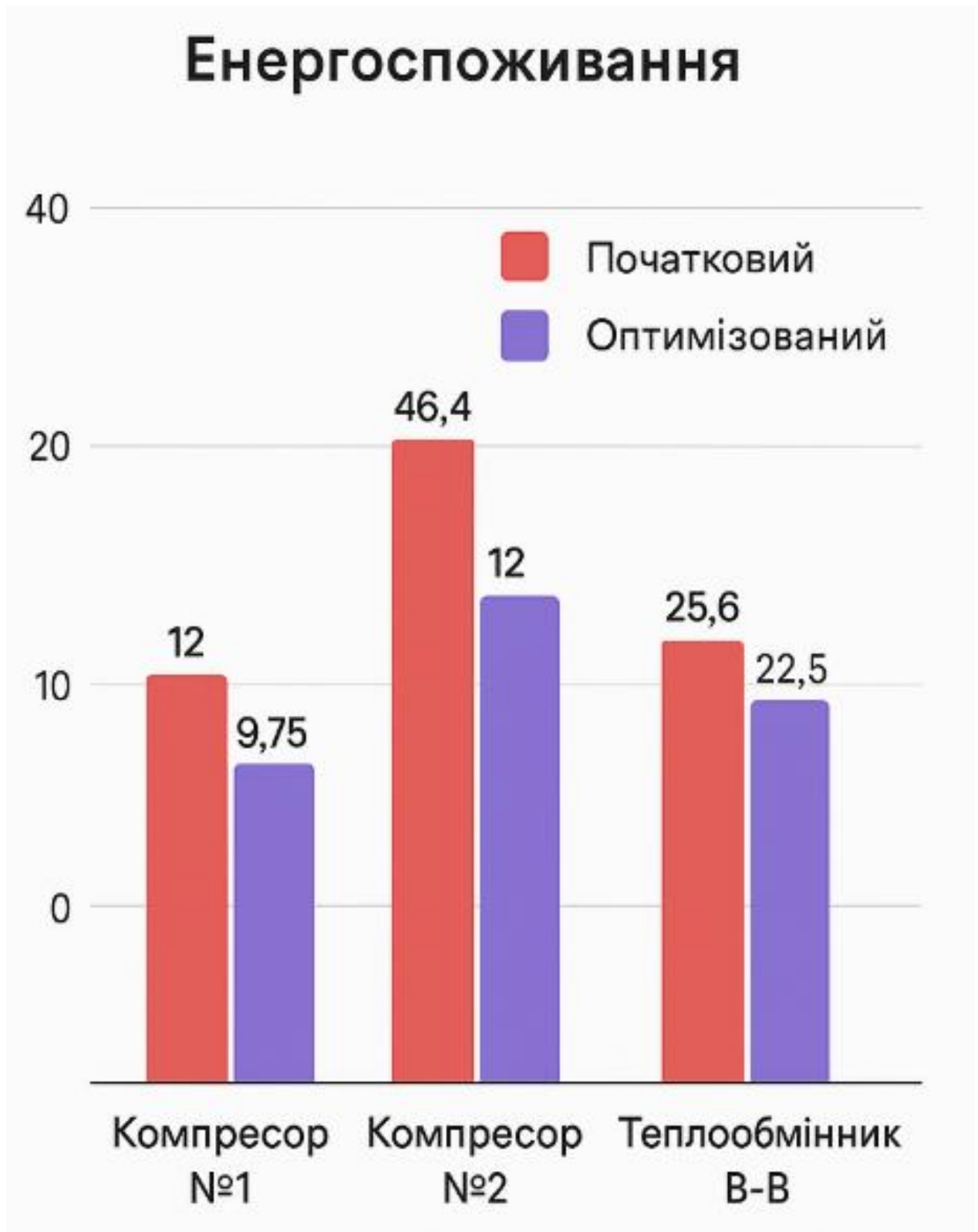
ДОДАТКИ

Додаток А

Оптимізація вентиляції



Оптимізація компресорів і теплообмінників



Оптимізація напрямку повітряного потоку

Оптимізація повітряного потоку та енергоспоживання
СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ

