

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Інженерних систем та екології

(факультет)

Теплотехніки

(назва випускової кафедри)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬО-НАУКОВОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР**

на тему:

«Аналіз ефективності роботи систем забезпечення необхідних параметрів
повітря в житлових приміщеннях»

Горбунова Богдана Тарасовича

(прізвище, ім'я та по батькові здобувача повністю)

Київ 2025

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Інженерних систем та екології

(факультет)

Теплотехніки

(назва випускової кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

„___” _____ 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬО-НАУКОВОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР**

«Аналіз ефективності роботи систем забезпечення необхідних параметрів
повітря в житлових приміщеннях»

Виконав: Горбунов Богдан Тарасович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(спеціальність)

Теплогазопостачання та вентиляція
(освітня програма)

Група ТВмН-23

Керівник: Чепурна Н.В.
(прізвище та ініціали)

доцент, канд. техн. наук (вчене звання, науковий ступінь)

Ідентичність підтверджую

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Інженерних систем та екології

Випускова кафедра: Теплотехніки

Освітній ступінь: Магістр

Спеціальність: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Освітня програма: Теплогазопостачання та вентиляція

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____” _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА
ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬО-НАУКОВОГО СТУПЕНЯ
МАГІСТРА**

ГОРБУНОВА Богдана Тарасовича

1. Тема роботи «Аналіз ефективності роботи систем забезпечення необхідних параметрів повітря в житлових приміщеннях», затверджена наказом ректора КНУБА № 759/2 від «10» травня 2025 року.
2. Керівник роботи Чепурна Наталія Володимирівна, доц., к. т. н.
3. Строк подання здобувачем роботи до захисту 29.05.25 р.
4. Зміст пояснювальної записки за розділами:
 - Р. 1. Вступ.
 - Р. 2. Класифікація систем вентиляції.
 - Р. 3. Основи якості повітря.
 - Р. 4. Порівняльний аналіз розрахунків вентиляції за ДБН та за концентрацією CO₂ у житлових будинках; Шлях до оптимізації мікроклімату та енергоефективності.
 - Р. 5. Математичне моделювання та CFD-аналіз повітряного середовища в житлових будівлях: оптимізація та валідація.
 - Р. 6. Інтеграція системи вентиляції зі змінною

витратою , опалення на базі ТН, кондиціонування,
для досягнення необхідних параметрів в житловому
приміщенні.


Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1. Вступ	травень 2025
Розділ 2. Класифікація систем вентиляції	травень 2025
Розділ 3 Основи якості повітря	травень 2025
Розділ 4. Порівняльний аналіз розрахунків вентиляції за ДБН та за концентрацією CO ₂ у житлових будинках; Шлях до оптимізації мікроклімату та енергоефективності	травень 2025
Розділ 5 Математичне моделювання та CFD-аналіз повітряного середовища в житлових будівлях: Оптимізація та Валідація	травень 2025
Розділ 6. Інтеграція системи вентиляції зі змінною витратою , опалення на базі ТН, кондиціонування, для досягнення необхідних параметрів в житловому приміщенні	травень 2025
Направлення роботи для перевірки на плагіат	травень 2025
Попередній захист роботи на випусковій кафедрі	травень 2025
Направлення роботи на рецензування	травень 2025

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 5.			
Розділ 6.			

Дата видачі завдання _____

Зав. кафедри	_____	<u>Кириченко М.А.</u>
	(підпис)	(прізвище, ініціали)
Керівник	_____	<u>Чепурна Н.В.</u>
	(підпис)	(прізвище, ініціали)
Здобувач	_____ 	<u>Горбунов Б.Т.</u>
	(підпис)	(прізвище, ініціали)

„___” _____ 20__ р.

Зміст

Вступ	9
РОЗДІЛ 2.Класифікація систем вентиляції	74
РОЗДІЛ 3.Основи якості повітря	16
РОЗДІЛ 4.Порівняльний аналіз розрахунків вентиляції за ДБН та за концентрацією CO ₂ у житлових будинках; шлях до оптимізації мікроклімату та енергоефективності.	20
4.1. Розрахунок Вентиляції за Державними Будівельними Нормами (ДБН)	20
4.2. Переваги та обмеження ДБН-підходу	21
4.3. Розрахунок Вентиляції за Концентрацією CO ₂	23
4.4. Переваги та обмеження CO ₂ -орієнтованого підходу	25
4.5. Порівняльний Аналіз Методів Розрахунку Вентиляції	27
4.6. Вплив на енергоспоживання	29
4.7. Вплив на якість внутрішнього повітря та комфорт мешканців	30
4.8. Практичні Рекомендації та Оптимізація Систем Вентиляції	31
4.7. Вплив на якість внутрішнього повітря та комфорт мешканців	30
РОЗДІЛ 5.Математичне моделювання та CFD-аналіз повітряного середовища в житлових будівлях: оптимізація та валідація	34
5.1. Ключові параметри внутрішнього повітря та нормативні ліміти для житлових будівель	34
5.1.1 Фактори, що впливають на якість внутрішнього повітря та ефективність вентиляції	38
5.2. Основи математичного моделювання внутрішнього повітряного середовища	
5.2.1. Рівняння масового балансу для концентрації забруднювачів (наприклад, CO ₂)	39
5.2.2 Моделювання тепло- та вологопереносу	40
5.2.3. Динаміка повітряних потоків та розрахунок швидкості вентиляції	42
5.3. Обчислювальна гідродинаміка (CFD) для аналізу внутрішнього	

повітряного середовища	44
5.3.1. Основні принципи CFD: Керуючі рівняння та числові методи	44
5.3.2. Застосування CFD для симуляції розподілу температури, CO ₂ та швидкості повітря	45
5.4. Розширені метрики CFD: Середній вік повітря (MAA) та ефективність повітрообміну (ACE)	47
5.5. Провідне програмне забезпечення для моделювання та симуляції ЯВП у житлових будівлях	52
5.6.. Валідація симуляційних моделей за допомогою реальних даних	56
5.6.1. Важливість валідації для надійності моделі	56
5.6.2. Поширені методи та метрики валідації	58
5.6.3. Приклади валідації та практичні кейси	59
5.7. Проміжні висновки та рекомендації	60
РОЗДІЛ 6.Інтеграція системи вентиляції зі змінною витратою , опалення на базі ТН, кондиціонування, для досягнення необхідних параметрів в житловому приміщенні	62
6.1.Характеристика об'єкту будівництва та географічний пункт будівництва	63
6.2. Обґрунтування інженерних рішень для котеджу: опалення, вентиляція та кондиціонування	70
6.2.1. Система опалення: Ефективність та комфорт	70
6.2.1. Система вентиляція, розрахунок та підбір обладнання	74
Список літератури	81

ВСТУП

Забезпечення здорового мікроклімату в житлових приміщеннях є одним із ключових факторів комфортного проживання людини. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, міський житель проводить понад 90% свого часу в закритих приміщеннях — вдома, на роботі, у транспорті. Водночас, саме у внутрішньому повітряному середовищі можуть накопичуватись шкідливі домішки, які впливають на фізичний та психологічний стан людини.

З розвитком енергоефективного будівництва й підвищенням теплозахисту огорожувальних конструкцій житлових будівель спостерігається істотне зниження інфільтрації повітря ззовні. Сучасні вікна, двері та фасадні системи мінімізують тепловтрати, але водночас перешкоджають природному повітрообміну. Це призводить до погіршення якості повітря у приміщеннях, зростання рівня CO₂, надлишкової вологості, розвитку плісняви та збільшення концентрації алергенів і летких органічних сполук (VOC).

Підтримання нормативних параметрів повітря — таких як температура, відносна вологість, вміст CO₂ та чистота — стало неможливим без використання спеціальних інженерних рішень. Традиційна природна вентиляція через фрамуги, витяжки або провітрювання більше не може забезпечити належної якості повітря, особливо в умовах щільної урбаністичної забудови, поганої екології та низької якості зовнішнього повітря. У зв'язку з цим на перший план виходять примусові системи вентиляції з автоматичним керуванням, рекуперацією тепла, зонуванням подачі та інтелектуальними алгоритмами регулювання.

Окрім медико-гігієнічних аспектів, питання якості повітря є важливим з точки зору енергоспоживання. Неєфективна або неправильно підібрана система вентиляції може спричинити надмірні втрати тепла або, навпаки, надмірне використання енергії для підігріву/охолодження свіжого повітря. Енергетична ефективність інженерних систем сьогодні є не лише стандартом, а й економічною необхідністю — як для інвестора, так і для кінцевого споживача.

Таким чином, аналіз ефективності роботи сучасних систем вентиляції та кондиціонування у житлових приміщеннях є вкрай актуальним і має велике

практичне значення для архітекторів, інженерів, забудовників, енергоаудиторів та кінцевих користувачів.

Мета і задачі дослідження

Метою даної дипломної роботи є проведення комплексного аналізу ефективності роботи систем забезпечення необхідних параметрів повітря в житлових приміщеннях на основі оцінки їх здатності підтримувати комфортні умови проживання при оптимальному енергоспоживанні.

Особлива увага приділяється автоматизованим системам, що регулюють мікроклімат за допомогою сенсорів CO₂, температури, вологості та інших параметрів, а також використовують сучасні алгоритми управління для підвищення ефективності.

Об'єкт дослідження – сучасні інженерні системи вентиляції та методи розрахунку, регулювання параметрів повітря у житлових приміщеннях.

Предмет дослідження – ефективність цих систем з точки зору забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища, комфорту мешканців та енергоспоживання.

2.Класифікація систем вентиляції

Класифікація вентиляційних систем допомагає визначити найбільш підходящий тип для конкретного приміщення, забезпечуючи комфортні умови для людей та ефективну роботу обладнання. Ось основні категорії систем вентиляції, залежно від їхніх характеристик:

1. За принципом переміщення повітря

Природна вентиляція: Використовує природні явища, такі як вітер та різниця температур, для забезпечення повітрообміну.

Організована: Передбачає спеціально обладнані отвори (вентиляційні канали, дифузори) для керованого руху повітря. Не потребує енерговитрат, але її ефективність може бути обмеженою залежно від зовнішніх умов.

Неорганізована: Відбувається через відкриті вікна, двері та існуючі щілини, забезпечуючи нерегульоване провітрювання.

Механічна (штучна) вентиляція: Застосовує вентилятори та інші механічні пристрої для примусового переміщення повітря. Забезпечує високу ефективність у будь-яких умовах, але вимагає енерговитрат.

Змішана вентиляція: Комбінує елементи природної та механічної вентиляції для досягнення оптимального балансу.

2. За напрямком повітряного потоку

Припливна вентиляція: Відповідає за подачу свіжого повітря всередину приміщення, покращуючи його якість.

Витяжна вентиляція: Призначена для видалення забрудненого, відпрацьованого або надмірно теплого повітря, ефективно усуваючи шкідливі гази, пил та неприємні запахи.

Припливно-витяжна вентиляція: Об'єднує функції припливу та витяжки, забезпечуючи комплексний повітрообмін та підтримуючи баланс між подачею свіжого та видаленням забрудненого повітря.

6. За зоною дії

Загальнообмінна вентиляція: Забезпечує рівномірний розподіл повітря по всьому приміщенню. Широко застосовується в офісах, житлових та громадських будівлях.

Місцева вентиляція: Здійснює повітрообмін у конкретних, обмежених зонах приміщення. Прикладами є витяжні зонти над кухонними плитами або локальні витяжки в лабораторіях.

Комбінована вентиляція: Поєднує переваги загальнообмінної та місцевої вентиляції.

4. За способом організації повітроводів

Канальна вентиляція: Повітря переміщується через систему повітроводів (каналів). Ідеально підходить для великих приміщень, де необхідно розподілити повітря по декількох зонах.

Безканальна вентиляція: Повітря подається та видаляється через пристрої, встановлені безпосередньо у стінах, стелях або вікнах. Часто використовується у невеликих приміщеннях або для точкової вентиляції.

5. За функціональним призначенням

Виробнича вентиляція: Видаляє шкідливі речовини, надлишкове тепло та вологу, що утворюються в процесі виробництва.

Санітарно-технічна вентиляція: Усуває запахи та вологу з санітарних приміщень.

Протипожежна вентиляція: Активується під час пожежі для видалення диму та продуктів горіння, забезпечуючи евакуацію людей.

Аварійна вентиляція: Призначена для швидкого видалення небезпечних речовин у разі виникнення аварійних ситуацій.

Комунальна вентиляція: Забезпечує комфортні умови для перебування людей у громадських будівлях та житлових приміщеннях.

6. За режимом функціонування

Постійна вентиляція: Працює безперервно, підтримуючи стабільний повітрообмін. Застосовується у приміщеннях з постійною присутністю людей або обладнання, що виділяє тепло.

Періодична вентиляція: Функціонує у певний час або активується за певних умов (наприклад, при підвищенні рівня CO₂).

Сприяє економії енергії.

7. За рівнем обробки повітря

Вентиляція з підігрівом повітря: Підтримує комфортну температуру у холодний період за допомогою калориферів або теплових насосів.

Вентиляція з охолодженням повітря: Забезпечує охолодження повітря у теплий період за допомогою кондиціонерів або охолоджувачів повітря.

Вентиляція зі зволоженням/осушенням повітря: Підтримує оптимальний рівень вологості, використовуючи зволожувачі або осушувачі.

8. За архітектурою системи

Централізовані системи вентиляції: Мають один центральний вентилятор, що обслуговує все приміщення.

Децентралізовані системи вентиляції: Включають кілька вентиляторів, розташованих у різних частинах приміщення.

Вибір оптимального типу системи вентиляції — це комплексне завдання, що вимагає врахування таких факторів:

- Призначення та тип приміщення.
- Санітарно-гігієнічні вимоги.
- Характер технологічних процесів.
- Кліматичні умови.
- Бюджетні обмеження.

Кожен із зазначених типів систем вентиляції має свої унікальні переваги та недоліки, що визначає їх доцільність застосування в конкретних умовах. Раціональний вибір конфігурації системи вентиляції, заснований на ретельному аналізі класифікації та взаємної сумісності елементів, є запорукою її ефективної роботи, комфорту та безпеки для користувачів.

3.Основи якості повітря

Для забезпечення навіть мінімально допустимих параметрів мікроклімату за відсутності системи вентиляції виникає необхідність у регулярному провітрюванні приміщень. Проте такий підхід призводить до додаткових тепловтрат, що збільшує навантаження на систему опалення через необхідність підігріву холодного припливного повітря. До того ж, відкривання вікон часто спричиняє утворення протягів, що негативно впливає на самопочуття та здоров'я людей.

Ігнорування вимог до нормативної кратності повітрообміну призводить до накопичення вуглекислого газу (CO_2) у приміщеннях до рівнів, які можуть негативно впливати на стан людини. Тривале перебування у такому середовищі здатне викликати погіршення концентрації уваги, головний біль, втому, зниження працездатності, а за тривалого впливу — порушення загального стану здоров'я. Цей вплив ілюструється на рисунку 1.



Рисунок 3.1 – Вплив концентрації CO_2 у повітрі на самопочуття людини

На відкритому повітрі, зокрема в лісовій зоні чи біля моря, концентрація CO_2 зазвичай становить 0,03–0,04% — це природний рівень, сприятливий для дихання людини. Водночас у закритих приміщеннях часто виникає відчуття задухи, яке супроводжується втомою, сонливістю та дратівливістю. Ці симптоми спричинені не лише нестачею кисню, як часто вважається, а саме перевищенням допустимого рівня вуглекислого газу.

Чим ближче концентрація CO_2 у приміщенні до природного зовнішнього рівня (0,04%), тим комфортніше почувається людина. Гранично допустимі концентрації CO_2 у повітрі житлових та робочих приміщень становлять 0,1–0,15% (тобто 1000–1500 ppm). Нормальним вважається рівень CO_2 у межах 800–1000 ppm — саме такі показники є допустимими в офісах, навчальних закладах і житлових приміщеннях. При перевищенні цих значень необхідне обов'язкове провітрювання або активація системи вентиляції.

У разі перевищення концентрації CO_2 понад 1500 ppm повітря у приміщенні вважається низькоякісним і потребує негайного провітрювання або активації системи вентиляції. Такий рівень може викликати помітне погіршення самопочуття та вплинути на працездатність людей.

Особливу увагу також слід приділяти вмісту чадного газу (CO), гранично допустима концентрація якого становить 20 мг/м³. Перевищення цього показника є небезпечним для здоров'я, а тому за можливості слід негайно провітрити приміщення або покинути його до моменту зниження концентрації до безпечного рівня.

У замкнених об'ємах головним джерелом вуглекислого газу виступає людина, яка в процесі спокійного дихання щогодини споживає приблизно 20–30 літрів кисню та виділяє 24–27 літрів CO_2 . Відповідно, із збільшенням кількості людей у приміщенні процес насичення повітря вуглекислим газом відбувається швидше, що підвищує потребу в організованому повітрообміні.

До основних фізіологічних симптомів перевищення рівня CO_2 належать:

- погіршення концентрації уваги;
- швидка втомлюваність;
- сонливість;

- головний біль;
- сльозоточивість
- часте зівання;
- загальне зниження працездатності.

Варто зазначити, що навіть при концентраціях, які не перевищують допустимі межі (наприклад, 1000–1500 ppm), вже спостерігаються зміни у стані людини. Зі зростанням вмісту CO₂ в повітрі корелює погіршення як суб'єктивного самопочуття, так і когнітивної продуктивності. Це підкреслює необхідність використання систем автоматичного моніторингу концентрації CO₂ у приміщеннях з постійним перебуванням людей, таких як офіси, школи, лікарні тощо.

**4.Порівняльний аналіз розрахунків вентиляції за
ДБН та за концентрацією CO₂ у житлових будинках;
Шлях до оптимізації мікроклімату та
енергоефективності**

4.1. Розрахунок Вентиляції за Державними Будівельними Нормами (ДБН)

Огляд ключових ДБН, що регулюють вентиляцію житлових приміщень в Україні основним нормативним документом, що регулює проектування систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, є ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування". Цей документ встановлює вимоги до забезпечення нормованих санітарно-епідеміологічних параметрів мікроклімату приміщень та раціонального використання енергетичних ресурсів під час експлуатації. Додаткові вимоги до мікроклімату та повітрообміну в житлових будівлях містяться в ДБН В.2.2-15:2019 "Житлові будинки. Основні положення". Цей документ деталізує вимоги до інсоляції, освітлення, хімічного забруднення повітря, вентиляції та мікрокліматичних параметрів. Також згадуються стандарти ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 та ДСТУ Б EN 15251:2011 "Розрахункові параметри мікроклімату приміщень", які використовуються для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель, зокрема щодо якості повітря та теплового комфорту.

Принципи нормативного розрахунку

ДБН традиційно визначають мінімальний обсяг вентиляційного повітря (ступінь вентиляції) у м³/год або як кратність повітрообміну (об/год). Розрахунок може базуватися на об'ємі приміщення ($V_{пом}$) та мінімальній кратності повітрообміну (K_p), використовуючи формулу: $L = V_{пом} * K_p$. Інший підхід – розрахунок на основі кількості людей у приміщенні та їх рівня активності: $L = L_1 * NL$.

ДБН В.2.2-15:2019 (Таблиця 2) встановлює мінімальні норми повітрообміну для різних типів житлових приміщень, диференціюючи їх для здорових людей та осіб з інвалідністю/похилого віку. Наприклад, для житлових кімнат мінімальна кратність повітрообміну для розрахунку тепловтрат становить 0.5 год⁻¹, а для вибору обладнання – 0.6 (механічна) або 0.7 (природна). Для кухонь з газовими плитами вказано 72 м³/год, для кухонь з електроплитами – 60 м³/год. Важливо, що ці значення є "мінімально допустимими", а достатність повітрообміну має перевірятися згідно з

ДСТУ Б EN 15242. Ці значення стосуються внутрішнього об'єму приміщення; при використанні зовнішніх розмірів кімнати їх слід множити на 0.8.

Тип приміщення	Розрахункова температура, °C (для здорових / для маломобільних груп)	Мінімальна кратність повітрообміну для розрахунку тепловтрат, h ⁻¹	Мінімальна витрата повітря та кратність повітрообміну для вибору обладнання (механічна / природна)
Житлова кімната (загальна, спальня, дитяча, кабінет)	22 ± 2 / 22 ± 1	0.5	0.6 (механічна) / 0.7 (природна)
Кухня, кухня-їдальня	19.5 ± 3	1.5	72 м³/год (механічна) або 60 м³/год (для об'ємів ≤ 20 м³), 0.5 (для об'ємів > 20 м³)
Ванна кімната	25 ± 1.5 / 25 ± 0.5	0.5	54 м³/год (механічна)
Туалет	22 ± 2 / 22 ± 1	0.5	36 м³/год (механічна)
Суміщений санвузол	25 ± 1.5 / 25 ± 0.5	0.5	90 м³/год (механічна)

Таблиця 4.1.: *Норми повітрообміну для типових житлових приміщень згідно з ДБН В.2.2-15:2019*

Ця таблиця є центральним елементом ДБН-підходу, надаючи конкретні, нормативно встановлені значення, які є обов'язковими для проектування. Вона дозволяє швидко оцінити базові вимоги до вентиляції для різних функціональних зон житла, що є відправною точкою для будь-якого проекту. Її цінність полягає в тому, що вона показує, що ДБН – це не просто "загальні правила", а конкретні кількісні вимоги. Це дозволяє інженерам і проектувальникам швидко визначити мінімальні обсяги повітрообміну, необхідні для отримання дозволу на будівництво та забезпечення базового рівня санітарно-гігієнічних умов. Без цих даних, порівняння з CO2-методом було б абстрактним.

Дані щодо витрати повітря та кратності повітрообміну вказані для приміщень без обладнання, де відбувається спалювання з використанням повітря приміщення (камін, котел, газовий водонагрівач).

4.2. Переваги та обмеження ДБН-підходу

Переваги:

Простота та універсальність застосування: Норми є чітко визначеними та легко застосовуються на етапі проектування, не вимагаючи складного динамічного моніторингу чи аналізу. Це робить їх зручними для масового будівництва.

Регуляторна відповідність: Дотримання ДБН є обов'язковою вимогою для всіх будівельних проєктів в Україні, забезпечуючи правову основу для проектування та експлуатації.

Забезпечення мінімального санітарного рівня: Гарантує базовий, гігієнічний рівень повітрообміну, що є важливим для запобігання накопиченню основних забруднювачів та підтримки санітарних умов.

Обмеження:

Потенційна надмірність або недостатність: Фіксовані норми не враховують реальну динаміку завантаженості приміщення (кількість людей, їх активність) або наявність специфічних джерел забруднення (приготування їжі, використання хімікатів). Це може призводити до надмірної вентиляції, коли приміщення порожнє або мало завантажене, або, навпаки, до недостатнього повітрообміну в періоди пікового навантаження.

Відсутність адаптивності: Підхід є статичним і не дозволяє системі вентиляції адаптуватися до змінних умов, що обмежує її ефективність у реальних сценаріях експлуатації.

Енергетична неефективність: Постійний повітрообмін за фіксованими нормами, незалежно від фактичної потреби, може призводити до значних, необґрунтованих втрат тепла взимку та холоду влітку. Це суперечить сучасним принципам енергозбереження та підвищує експлуатаційні витрати, якщо не застосовуються системи рекуперації тепла.

Недостатній контроль над оптимальною IAQ: Хоча ДБН забезпечує мінімальні вимоги, він не гарантує оптимальної якості повітря чи комфорту, оскільки не реагує на фактичні рівні забруднювачів у реальному часі.

ДБН є регуляторним інструментом для забезпечення відповідності, а не інструментом для оптимізації. Це створює простір для впровадження більш динамічних та інтелектуальних систем, таких як CO₂-контроль, які можуть виходити за межі мінімальних вимог для досягнення вищого рівня комфорту та ефективності.

4.3 Розрахунок Вентиляції за Концентрацією CO₂

CO₂ як індикатор якості внутрішнього повітря: джерела та вплив на людину

Діоксид вуглецю (CO₂) є основним продуктом життєдіяльності людини (видихання) і, отже, є чудовим індикатором рівня антропогенного забруднення та ефективності вентиляції у приміщеннях. Підвищені рівні CO₂ можуть викликати втому, головний біль, зниження концентрації, задуху, нудоту та прискорене серцебиття. Навіть невелике підвищення концентрації CO₂ може мати значний вплив на когнітивні функції, оскільки дослідження показують, що в середовищах з покращеною якістю повітря когнітивні показники можуть бути на 61% вищими.

Оптимальні та допустимі рівні CO₂ у житлових приміщеннях згідно з міжнародними рекомендаціями та ДБН

Нормальний рівень CO₂ на вулиці становить приблизно 400 ppm (частин на мільйон).

Оптимальні рівні для житлових приміщень:

Згідно з ДБН, нормативний вміст CO₂ у житлових приміщеннях становить 600-800 ppm.

Загальні рекомендації для хорошої якості повітря в приміщеннях вказують на рівні нижче 800 ppm.

ASHRAE рекомендує підтримувати рівні CO₂ не більше ніж на 700 ppm вище зовнішнього рівня.

Допустимі/граничні рівні:

До 1000 ppm: Вважається прийнятним для більшості внутрішніх середовищ, забезпечуючи адекватну вентиляцію.

1000-2000 ppm: Можливі скарги на сонливість або погану якість повітря. Рівні вище 1200 ppm вказують на потенційні проблеми з повітрообміном.

Вище 2000 ppm: Можуть викликати серйозніші симптоми, такі як головний біль, втома, зниження концентрації.

Важливо зазначити, що ВООЗ та інші організації встановлюють граничні значення для інших забруднювачів (наприклад, PM2.5, ЛОС, формальдегід), але CO₂ розглядається переважно як індикатор ефективності вентиляції, а не як прямий токсикант на цих рівнях.

Діапазон CO ₂ (ppm)	Опис якості повітря	Потенційний вплив на здоров'я/комфорт	Рекомендації
<400	Нормальне зовнішнє повітря	Відсутній негативний вплив	Базовий рівень, орієнтир для внутрішніх приміщень
400-800	Дуже хороша / Оптимальна IAQ	Відсутній негативний вплив, високий рівень комфорту та когнітивні функції	Ідеальний рівень для житлових приміщень
800-1000	Прийнятна IAQ	Мінімальний вплив, можливі скарги на "задуху" у чутливих осіб	Прийнятний максимум для підтримки хорошої вентиляції
1000-2000	Помірно забруднене повітря	Скарги на сонливість, головний біль, зниження концентрації, відчуття "спертого" повітря	Вказує на недостатню вентиляцію, потребує збільшення повітрообміну
2000-5000	Сильно забруднене повітря	Головний біль, втома, нудота, прискорене серцебиття, значне зниження концентрації	Небезпечний рівень, потребує негайного інтенсивного провітрювання
>5000	Небезпечний рівень	Токсичність через кисневе голодування, серйозні фізіологічні ефекти, небезпека для життя	Аварійна ситуація, негайна евакуація

Таблиця 4.2: Рекомендовані рівні CO₂ у приміщеннях та їх вплив на комфорт/здоров'я

Ця таблиця візуалізує зв'язок між концентрацією CO₂ та її впливом на людину, що є ключовим для розуміння переваг CO₂-орієнтованої вентиляції. Вона надає чіткі орієнтири для налаштування систем моніторингу та управління, дозволяючи користувачам швидко оцінювати стан повітря та приймати рішення щодо вентиляції. Таблиця допомагає демістифікувати показники CO₂ для неспеціалістів і надає чіткі

"порогові значення" для автоматизації. Вона підкреслює, що CO₂ – це не просто число, а прямий індикатор якості повітря та потенційного впливу на здоров'я.

Методика розрахунку необхідного повітрообміну на основі виділення CO₂ людиною та цільової концентрації

Розрахунок базується на кількості CO₂, що виділяється людьми, та бажаній цільовій концентрації CO₂ у приміщенні. Формула для розрахунку необхідної витрати повітря (L) для підтримки цільової концентрації CO₂: $L = G_{CO_2} / (C_{цільова} - C_{зовнішня})$,

де:

G_{CO_2} – об'єм виділення CO₂ однією людиною (л/год або м³/год).

$C_{цільова}$ – бажана (цільова) концентрація CO₂ у приміщенні (л/м³ або ppm).

$C_{зовнішня}$ – концентрація CO₂ у зовнішньому повітрі (зазвичай приймається 400 ppm або 0.04% = 0.4 л/м³).

Виділення CO₂ людиною залежить від рівня метаболічної активності, віку та статі. Наприклад, під час сну людина виділяє близько 11 л/год CO₂, у сидячому положенні – близько 19.6 л/год, а при легкій фізичній активності – до 46.9 л/год.

Рівень активності	Типове виділення CO ₂ (л/год на людину)
Сон	~11.0
Сидяча робота / спокій	~19.6
Легка фізична активність	~46.9
Помірна фізична активність	~70-80
Важка фізична активність	~115.4

Таблиця 4.3: Типові показники виділення CO₂ людиною залежно від рівня активності

Ця таблиця є критично важливою для практичного застосування CO₂-орієнтованого розрахунку. Вона показує, що потреба у вентиляції не є статичною, а залежить від поведінки та кількості людей. Це дозволяє проектувальникам та системам автоматизації динамічно адаптувати повітрообмін. Таблиця є основою для розрахунку потреби у свіжому повітрі, коли використовується CO₂-метод. Вона демонструє, що вентиляція, керована CO₂, є адаптивною, на відміну від фіксованих норм ДБН. Це підкреслює її потенційну енергоефективність, оскільки система не буде працювати на повну потужність, якщо люди сплять або їх немає вдома.

4.4 Переваги та обмеження CO₂-орієнтованого підходу

Переваги:

Адаптивність та реактивність: Система автоматично реагує на фактичну кількість людей та їхню активність, забезпечуючи необхідний повітрообмін лише тоді, коли це потрібно.

Потенційна енергоефективність: Оптимізація повітрообміну дозволяє зменшити витрати на підігрів або охолодження надмірного обсягу зовнішнього повітря, особливо у будівлях з високою герметичністю. Це узгоджується з принципами енергозбереження та підвищення енергоефективності ОВК.

Прямий контроль IAQ(Indoor Air Quality) (за CO₂): Забезпечує підтримку комфортних та здорових рівнів CO₂, що корелює з кращим комфортом та когнітивними функціями.

Покращений комфорт: Запобігає відчуттю задухи та "спертого" повітря, що є поширеною проблемою при недостатній вентиляції.

Обмеження:

Потреба в моніторингу: Вимагає встановлення та калібрування датчиків CO₂, що збільшує початкові витрати та складність системи.

Складність імплементації: Потребує інтеграції датчиків з автоматизованими системами управління вентиляцією.

CO₂ як індикатор, а не універсальний показник: Контроль лише за CO₂ не враховує інші важливі забруднювачі, такі як леткі органічні сполуки (ЛОС), дрібнодисперсний пил (PM_{2.5}/PM₁₀), радон, формальдегід або пліснява, які можуть мати інші джерела. Для комплексного контролю IAQ потрібні додаткові датчики, наприклад, для вимірювання PM, ЛОС, температури та вологості.

Залежність від зовнішньої якості повітря: Якщо зовнішнє повітря забруднене (наприклад, смогом), просте збільшення повітрообміну може не вирішити проблему, а вимагати додаткової фільтрації.

CO₂-контроль є рушієм "розумної" та "здорової" вентиляції. Він дозволяє економити енергію, покращує комфорт і безпосередньо впливає на когнітивні функції, перетворюючи вентиляцію з пасивної інженерної мережі на активну, інтелектуальну систему управління мікрокліматом. Це відповідає глобальним трендам "розумних будинків" та "здорових будівель". Водночас, хоча CO₂-контроль є значним кроком вперед порівняно з фіксованими нормами, він має бути частиною багатофакторної стратегії управління IAQ, оскільки CO₂ не є універсальним індикатором для всіх забруднювачів. Це підкреслює важливість системних рішень, а не точкових покращень.

4.5. Порівняльний аналіз методів розрахунку вентиляції

Пряме порівняння ДБН-норм та розрахунків за CO₂ для типових сценаріїв житлових приміщень

Для кращого розуміння відмінностей між двома підходами розглянемо їх застосування на прикладі типових сценаріїв у житлових приміщеннях. Припустимо висоту стелі 2.8 м та зовнішню концентрацію CO₂ 400 ppm.

РОЗРАХУНОК

Сценарій 1: Спальня (15 м²).

Об'єм приміщення: $15 \text{ м}^2 \times 2.8 \text{ м} = 42 \text{ м}^3$.

ДБН : Мінімальна кратність повітрообміну для житлових кімнат становить 0.6 год^{-1} . Отже, необхідний повітрообмін:

$$42 \text{ м}^3 \times 0.6 \text{ год}^{-1} = 25.2 \text{ м}^3/\text{год}.$$

СО₂-метод (ціль 800 ppm, зовнішній 400 ppm):

Для 1 людини (сон, 11 л/год СО₂) : $L = 11 \text{ л/год} / (0.8 - 0.4) \text{ л/м}^3 = 27.5 \text{ м}^3/\text{год}$.

Для 2 людей (сон, $2 \times 11 = 22 \text{ л/год СО}_2$):

$$L = 22 \text{ л/год} / (0.8 - 0.4) \text{ л/м}^3 = 55 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Висновок:

Для однієї сплячої людини ДБН-норма (25.2 м³/год) є близькою до СО₂-розрахунку (27.5 м³/год). Однак для двох сплячих людей ДБН-норма (25.2 м³/год) є значно недостатньою порівняно з СО₂-розрахунком (55 м³/год), що може призвести до підвищення рівня СО₂ та дискомфорту.

Сценарій 2: Вітальня (25 м²).

Об'єм приміщення: $25 \text{ м}^2 \times 2.8 \text{ м} = 70 \text{ м}^3$.

ДБН :

Мінімальна кратність повітрообміну для житлових кімнат становить 0.6 год^{-1} .

Отже, необхідний повітрообмін: $70 \text{ м}^3 \times 0.6 \text{ год}^{-1} = 42 \text{ м}^3/\text{год}$.

СО₂-метод (ціль 800 ppm, зовнішній 400 ppm):

Для 3 людей (сидяча активність, ~19.6 л/год СО₂ на людину) :

$$L = (3 \times 19.6) \text{ л/год} / (0.8 - 0.4) \text{ л/м}^3 = 58.8 / 0.4 = 147 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Для 4 людей (сидяча активність):

$$L = (4 \times 19.6) \text{ л/год} / (0.8 - 0.4) \text{ л/м}^3 = 78.4 / 0.4 = 196 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Висновок: ДБН-норма (42 м³/год) є значно заниженою для вітальні з кількома людьми, що може призвести до швидкого зростання СО₂ та погіршення комфорту та когнітивних функцій. СО₂-метод пропонує набагато вищі, більш реалістичні значення, що відповідають фактичній завантаженості.

Сценарій 3: Кухня (10 м²).

ДБН :

Для кухні з газовою плитою – 72 м³/год, з електричною – 60 м³/год.

СО₂-метод:

Вентиляція на кухні в першу чергу спрямована на видалення запахів, пари, ЛОС та продуктів горіння, а не лише СО₂ від дихання людей.

Виділення СО₂ від приготування їжі також є фактором, але для кухонь часто використовуються локальні витяжки з високою продуктивністю (наприклад, ASHRAE 62.2 рекомендує мінімум 100 CFM або 5 ACH для витяжних шаф), що значно перевищує потреби, розраховані лише за СО₂ від дихання.

Висновок:

Для кухонь СО₂-метод, заснований лише на диханні, може бути недостатнім, оскільки основні забруднювачі тут – не СО₂ від людей, а інші продукти життєдіяльності та приготування їжі. ДБН тут надає фіксовану норму, яка враховує специфіку приміщення та потребу у видаленні цих забруднювачів.

Критерій	ДБН (Україна)	CO2-орієнтований метод
Основа розрахунку	Фіксовані норми (кратність, м ³ /год на м ² , м ³ /год на приміщення)	Динамічний розрахунок на основі виділення CO2 людиною та цільової концентрації
Адаптивність до реальних умов	Низька (фіксовані значення, не враховують змінну завантаженість)	Висока (реагує на фактичну кількість людей та їх активність)
Енергоефективність	Потенційно низька (ризик надмірної вентиляції при низькій завантаженості)	Висока (вентиляція "за потребою", економія енергії на підігрів/охолодження)
Вимоги до обладнання	Простіші системи (можуть бути природні або механічні з постійною продуктивністю)	Складніші системи (потребують датчиків CO2, автоматизованого управління, систем зі змінною витратою повітря)
Вплив на IAQ (загалом)	Забезпечує мінімальний рівень, але може бути недостатнім для оптимального комфорту та здоров'я при високій завантаженості	Забезпечує оптимальний рівень CO2, що корелює з кращим комфортом та когнітивними функціями; однак не контролює інші забруднювачі без додаткових датчиків
Первинна мета	Забезпечення санітарно-гігієнічних мінімумів та безпеки	Оптимізація якості повітря та енергоспоживання
Нормативна база (Україна)	ДБН В.2.2-15:2019, ДБН В.2.5-67:2013	ДБН В.2.2-15:2019 встановлює норму CO2, але детальна методика розрахунку вентиляції за CO2 не є первинною. Міжнародні стандарти (ASHRAE 62.2) є релевантними.

Таблиця 4.4: Порівняння ДБН та CO2-орієнтованих методів

Ця таблиця є серцем порівняльного аналізу, надаючи чіткий, структурований огляд відмінностей між двома підходами. Вона дозволяє читачеві швидко зрозуміти ключові переваги та недоліки кожного методу за важливими критеріями, що є основою для прийняття обґрунтованих рішень у проектуванні. Таблиця не просто перелічує факти, а синтезує інформацію, дозволяючи провести швидкий аналіз кожного підходу. Це допомагає експерту швидко оцінити, який метод краще відповідає конкретним цілям (наприклад, мінімальна відповідність нормам проти максимальної енергоефективності та комфорту).

4.6. Вплив на енергоспоживання

Системи вентиляції є значним споживачем енергії, особливо в опалювальний та охолоджувальний періоди, оскільки вони обробляють зовнішнє повітря. Фіксовані норми ДБН можуть призводити до надмірної вентиляції, коли це не потрібно (наприклад, вночі або коли приміщення порожнє), що спричиняє невиправдані втрати тепла або холоду. Це суперечить сучасним принципам енергозбереження та підвищує експлуатаційні витрати, якщо не застосовуються системи рекуперації тепла.

CO₂-контрольована вентиляція дозволяє зменшити обсяг повітрообміну до мінімально необхідного, коли рівень CO₂ низький, тим самим значно економлячи енергію. Це особливо ефективно у поєднанні з рекуператорами тепла, які забезпечують підігрів свіжого повітря у холодну пору року, зменшуючи втрати тепла у квартирі взимку. Енергоефективність систем ОВК є ключовим аспектом проектування будівель.

4.7. Вплив на якість внутрішнього повітря та комфорт мешканців

ДБН забезпечує базовий рівень IAQ, але, як показано в сценаріях, може не гарантувати оптимального комфорту, особливо при динамічних змінах завантаженості приміщення. CO₂-контроль, підтримуючи низькі рівні CO₂, сприяє кращому самопочуттю, зниженню втоми та підвищенню когнітивних функцій. Однак для повної картини IAQ та комфорту, крім CO₂, важливо враховувати температуру, вологість, рівень пилу (PM2.5/PM10), ЛОС та інших забруднювачів.

Ефективність будь-якої вентиляційної стратегії, чи то за ДБН, чи то за CO₂-контролем, сильно залежить від належного монтажу, обслуговування та загальної герметичності та теплових характеристик будівельної оболонки. Наприклад, погана ізоляція або забиті повітроводи можуть звести нанівець переваги навіть найбільш теоретично обґрунтованого методу розрахунку. Сучасні будівлі, що проектуються з високою герметичністю для мінімізації тепловтрат, вимагають контрольованої вентиляції, оскільки природна інфільтрація вже не є достатньою для забезпечення якісного повітрообміну. Таким чином, обговорення методів розрахунку вентиляції має бути контекстуалізоване в рамках цілісного проектування будівлі та експлуатаційних практик.

4.8. Практичні Рекомендації та Оптимізація Систем Вентиляції

Можливості інтеграції ДБН-вимог з CO₂-моніторингом для створення "розумних" та ефективних систем

Найкращий підхід полягає у поєднанні нормативних вимог ДБН як базового мінімуму з гнучкістю CO₂-контрольованої вентиляції. Системи можуть бути розроблені таким чином, щоб забезпечувати мінімальний повітрообмін згідно з ДБН, а потім збільшувати його на основі показань датчиків CO₂, коли це необхідно. Ця синергія нормативного та адаптивного підходів є оптимальним рішенням. Жоден підхід сам по собі не є ідеальним: ДБН може бути неефективним, CO₂-контроль може бути дорогим у впровадженні та неповним. Оптимальним рішенням є гібридна стратегія, де ДБН виступає як базовий "захист" (не дозволяючи занижувати вентиляцію нижче певного рівня), а CO₂-контроль дозволяє динамічно збільшувати повітрообмін понад цей мінімум або зменшувати його, коли це дозволено (наприклад, коли нікого немає вдома), для економії енергії. Це відображає еволюцію будівельних норм від чистої "безпеки" до "продуктивності та сталого розвитку".

Використання систем з рекуперацією тепла (HRV/ERV) є критично важливим для енергоефективності, особливо при адаптивній вентиляції, оскільки вони дозволяють повертати до 80% тепла від витяжного повітря, значно зменшуючи втрати тепла взимку.

Роль датчиків якості повітря та автоматизованих систем управління

Датчики CO₂ є ключовим елементом таких систем, дозволяючи моніторинг у реальному часі та автоматичне регулювання вентиляції. Сучасні системи можуть інтегрувати датчики CO₂ з датчиками PM2.5, ЛОС, температури та вологості для комплексного контролю IAQ, надаючи повну картину стану повітря в приміщенні. "Розумні" термостати та системи управління будівлею (BMS) дозволяють автоматизувати процеси вентиляції, оптимізуючи комфорт та енергоспоживання. Дослідження показують, що візуалізація даних IAQ та цифрові втручання (наприклад,

нагадування про провітрювання) значно підвищують обізнаність мешканців та змінюють їхню поведінку, що призводить до покращення IAQ.

Рекомендації щодо проектування, вибору обладнання та експлуатації вентиляційних систем у житлових будинках

Проектування:

Проводити детальні розрахунки повітрообміну, враховуючи як нормативні вимоги ДБН, так і потенційні пікові навантаження за CO₂. Це забезпечить відповідність мінімальним нормам та можливість оптимізації.

Передбачати можливість встановлення систем зі змінною витратою повітря (VAV-клапани) та інтеграції з датчиками CO₂, що дозволить системі адаптуватися до реальних потреб.

Забезпечити належне зонування та розподіл повітря для уникнення застійних зон, що може призвести до накопичення забруднювачів та дискомфорту.

Вибір обладнання:

Віддавати перевагу енергоефективному обладнанню (клас А, високий SEER/EER/COP), яке мінімізує експлуатаційні витрати.

Розглядати припливно-витяжні установки з рекуперацією тепла для мінімізації енерговитрат на підігрів або охолодження припливного повітря.

Використовувати якісні фільтри для очищення припливного повітря від зовнішніх забруднень, що є особливо важливим у містах з високим рівнем забруднення.

Встановлювати надійні датчики CO₂ та, за можливості, інших забруднювачів (PM_{2.5}, ЛОС) для комплексного моніторингу IAQ.

Експлуатація та обслуговування:

Регулярно чистити та замінювати повітряні фільтри, оскільки забруднені фільтри знижують ефективність системи та погіршують якість повітря.

Проводити періодичні професійні перевірки та обслуговування системи вентиляції, щоб забезпечити її безперебійну та ефективну роботу.

Освічувати мешканців щодо важливості провітрювання та використання систем вентиляції, оскільки їхня поведінка має значний вплив на IAQ.

Забезпечити належне очищення повітроводів, особливо у старих будинках, де накопичення пилу та бруду може суттєво знижувати пропускну здатність.

**5.Математичне моделювання та CFD-аналіз
повітряного середовища в житлових будівлях:
оптимізація та валідація**

5.1. Ключові параметри внутрішнього повітря та нормативні ліміти для житлових будівель

Моніторинг основних показників є життєво важливим для підтримки здорового внутрішнього середовища та запобігання потенційним ризикам для здоров'я. Ці параметри включають:

- **Температура:** Оптимальні температури в житлових приміщеннях України зазвичай становлять 20-22°C, з варіаціями для окремих кімнат, таких як ванні кімнати (24-26°C) та дитячі кімнати (24-25°C). Взимку мінімальні показники встановлені на рівні +20°C для кутових кімнат та +18°C для інших. Влітку комфортною вважається температура 25-26°C. Відхилення нижче 18°C можуть викликати дискомфорт та збільшити ризик респіраторних захворювань.
- **Відносна вологість:** Ідеальна вологість для комфорту становить 40-60%. Існують специфічні оптимальні діапазони для різних сезонів та приміщень: 30-45% взимку (максимум 60%) та 30-60% влітку (не більше 70%). Для дитячих кімнат рекомендується 50-60%. Висока вологість (понад 60%) сприяє росту цвілі та грибків, тоді як низька вологість (менше 30%) викликає сухість шкіри та подразнення дихальних шляхів.
- **Рівень вуглекислого газу (CO₂):** CO₂ є основним показником ефективності вентиляції та присутності людей. Нормальний рівень CO₂ на відкритому повітрі становить близько 400 ppm (частин на мільйон). Прийнятні рівні в приміщеннях зазвичай коливаються від 400 до 1000 ppm. Рівні, що перевищують 1000 ppm, можуть призвести до сонливості, головного болю, зниження концентрації та відчуття поганої якості повітря. ASHRAE рекомендує підтримувати рівень CO₂ нижче 800 ppm в офісах та 1000 ppm у школах. Деякі рекомендації пропонують підтримувати рівень CO₂ не більше ніж на 700 ppm вище зовнішнього рівня.

- **Тверді частинки (PM2.5 та PM10):** Дрібні частинки можуть проникати глибоко в легені, викликаючи респіраторні проблеми та загострюючи такі стани, як астма. Рекомендації ВООЗ щодо PM2.5 становлять 5 мкг/м³ (середньорічне значення) та 15 мкг/м³ (середнє за 24 години).

- **Інші забруднювачі:** Леткі органічні сполуки (ЛОС), що виділяються з таких продуктів, як фарби та чистячі засоби, можуть погіршувати якість повітря. Інші небезпечні речовини включають бензол, чадний газ (CO), формальдегід, діоксид азоту (NO₂), нафталін, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) та радон. ВООЗ надає конкретні гранично допустимі значення для цих речовин.

Існує певна варіативність у визначенні "прийнятної" ЯВП та її регуляторних рамках. Численні джерела надають "оптимальні" та "прийнятні" діапазони для параметрів ЯВП, але ці діапазони іноді перетинаються або дещо відрізняються. Це свідчить про те, що не існує єдиної універсальної "норми", а скоріше спектр рекомендацій від різних органів, таких як ВООЗ, ASHRAE та українські ДБН.

Ця варіативність вказує на те, що "прийнятна" ЯВП є не лише науковою константою, але й залежить від цілей охорони здоров'я, енергетичних міркувань та регіональних регуляторних рамок. Наприклад, рекомендації ВООЗ є науково обґрунтованими інструментами, але не є юридично обов'язковими. Українські ДБН встановлюють конкретні вимоги.

Це означає, що проектувальники та політики повинні орієнтуватися в складному ландшафті рекомендацій та обов'язкових стандартів, часто потребуючи пріоритезації між досягненням максимальних переваг для здоров'я та практичною доцільністю.

При моделюванні вибір "цільових" або "прийнятних" рівнів для таких параметрів, як CO₂ або температура, повинен бути чітко визначений на основі конкретних вимог відповідності проекту (наприклад, ASHRAE 62.1/62.2, ДБН) або бажаних критеріїв продуктивності (наприклад, оптимальна когнітивна функція). Це безпосередньо впливає на цілі симуляції та оцінку її результатів.

Ключові параметри якості внутрішнього повітря та нормативні ліміти для житлових будівель (Українські та міжнародні стандарти)

Параметр	Оптимальний/Рекомендований діапазон	Українські нормативні ліміти (ДБН)	Міжнародні рекомендації (ВООЗ, ASHRAE)	Вплив відхилення
Температура повітря	Оптимальна : 20-22°C (загальні кімнати), 24-26°C (ванна), 24-25°C (дитяча)	Мін. опалювальний сезон: +20°C (кутова), +18°C (інші)	Комфорт: 20-22°C	Дискомфорт, ризик респіраторних захворювань (<18°C)
Відносна вологість	Оптимальна: 40-60%	Зима: 30-45% (макс. 60%) Літо: 30-60% (не більше 70%)	Зима: 30-50% Літо: 30-40%	Цвіль, грибок (>60%), сухість шкіри, подразнення дихальних шляхів (<30%)
Вуглекислий газ (CO ₂)	Оптимальна : 400-800 ppm	ДБН В.2.2-15:2019 (не вказано конкретних ppm, але регулюється повітрообміном)	Загальні: 400-1000 ppm ¹¹ ASHRAE: <800 ppm (офіси), <1000 ppm (школи)	Сонливість, головний біль, зниження концентрації, відчуття "задухи" (>1000 ppm)
Тверді частинки (PM _{2.5})	-	-	ВООЗ 2021: Річний середній: 5 мкг/м ³ , 24-годинний середній: 15 мкг/м ³	Респіраторні проблеми, астма
Тверді частинки (PM ₁₀)	-	-	ВООЗ 2021: 24-годинний середній: 45 мкг/м ³ , Річний середній: 15 мкг/м ³	Респіраторні проблеми, астма

Бензол	-	-	ВООЗ 2010: Немає безпечного рівня (канцероген). Рекомендовано знижувати до мінімуму. ¹⁵	Канцерогенний ризик
Чадний газ (CO)	-	-	ВООЗ 2010: 100 мг/м ³ (15 хв), 35 мг/м ³ (1 год), 10 мг/м ³ (8 год), 7 мг/м ³ (24 год)	Серйозні проблеми зі здоров'ям, летальний наслідок при високих концентраціях
Формальдегід	-	-	ВООЗ 2010: 0.1 мг/м ³ (30-хвилинне середнє) ¹⁵	Подразнення, потенційний канцероген ¹⁴
Діоксид азоту (NO₂)	-	-	ВООЗ 2010: 200 мкг/м ³ (1 год), 40 мкг/м ³ (річний середній)	Респіраторні захворювання
Нафталін	-	-	ВООЗ 2010: 0.01 мг/м ³ (річний середній)	Канцерогенний ризик
Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ)	-	-	ВООЗ 2010: Немає порогового значення (канцероген). Рекомендовано знижувати до мінімуму.	Канцерогенний ризик
Радон	-	-	ВООЗ 2010: Референтний рівень 100 Бк/м ³ (не більше 300 Бк/м ³)	Ризик раку легень
Трихлоретилен	-	-	ВООЗ 2010: 2.3 мкг/м ³ (для ризику раку 1/1,000,000)	Канцерогенність
Тетрахлоретилен	-	-	ВООЗ 2010: 0.25 мг/м ³ (річний середній)	Нейроповедінкові та ниркові ефекти

5.1.1 Фактори, що впливають на якість внутрішнього повітря та ефективність вентиляції

Якість внутрішнього повітря залежить від складної взаємодії внутрішніх та зовнішніх факторів. Ключові внутрішні джерела включають присутність людини (видихання CO₂, вироблення вологи), приготування їжі, куріння, домашніх тварин, будівельні матеріали, оздоблення, меблі та побутову техніку. Зовнішні фактори, такі як промислові викиди, вихлопи транспорту та зовнішній пил, також значно впливають на ЯВП, особливо в міських районах.

Ефективність вентиляції є вирішальною для зменшення цих забруднювачів. Недостатня вентиляція може призвести до утворення цвілі, неприємних запахів та дискомфорту.⁸ Поширені проблеми включають засмічені вентиляційні канали, неправильне проектування системи або навіть часткове перекриття внаслідок ремонту.²³ Герметичність будівлі, хоча й корисна для енергоефективності, вимагає належної механічної вентиляції для запобігання накопиченню забруднювачів.

Зусилля з підвищення енергоефективності сучасних будівель призвели до їх значної герметизації. Це, у свою чергу, зменшує природну інфільтрацію повітря. Хоча це дозволяє економити енергію, така герметичність може призвести до накопичення внутрішніх забруднювачів, таких як CO₂, ЛОС та волога, і спричинити симптоми "синдрому хворої будівлі" (СХБ).

Це створює парадокс: заходи, спрямовані на покращення енергетичних характеристик, ненавмисно погіршують ЯВП, якщо це не компенсується ефективною механічною вентиляцією. Це підкреслює критичний перехід від неконтрольованої природної вентиляції до контрольованих механічних або гібридних систем, часто керованих інтелектуальними технологіями. Такий розвиток вимагає цілісного підходу до проектування, де енергоефективність та ЯВП розглядаються не як окремі цілі, а як взаємозалежні аспекти здорової та стійкої будівлі.

5.2. Основи математичного моделювання внутрішнього повітряного середовища

5.2.1. Рівняння масового балансу для концентрації забруднювачів (наприклад, CO₂)

Математичні моделі, зокрема рівняння масового балансу, є фундаментальними для симуляції концентрацій забруднювачів у внутрішніх середовищах. Ці моделі відстежують генерацію, транспортування та видалення забруднювачів. Для добре перемішаного приміщення концентрація $C(t)$ у момент часу t залежить від фонові концентрації (C_b), початкової концентрації ($C(0)$), швидкості викидів (G), об'єму перемішування (V) та загальної швидкості розпаду ($\lambda+k$) через вентиляцію, осадження та коагуляцію.

Концентрація CO₂ є ключовим показником, оскільки люди постійно видихають передбачувані кількості CO₂. Швидкість викидів CO₂ (CER) залежить від швидкості метаболізму, статі, віку та рівня активності. Наприклад, сидяча людина може виробляти близько 11 л/год CO₂, тоді як фізична активність значно збільшує цю швидкість.

Рівняння масового балансу для CO₂ може бути спрощено для оцінки необхідної швидкості вентиляції (L) на основі кількості виділення CO₂ (G_{CO_2}), максимально допустимої концентрації (UPDK) та концентрації газу в припливному повітрі (UP) за формулою: $L = G_{CO_2} / (UPDK - UP)$.

Здатність прогнозувати рівні CO₂ на основі зайнятості та активності мешканців дозволяє проектувальникам точніше розраховувати розміри систем вентиляції та впроваджувати стратегії вентиляції, керованої за потребою (DCV). Замість надмірної вентиляції, заснованої на піковій зайнятості, DCV може регулювати потік повітря в реальному часі, що призводить до значної економії енергії при збереженні прийнятної ЯВП. Це переводить проектування від статичного, найгіршого сценарію до динамічної, оптимізованої експлуатації.

5.2.2 Моделювання тепло- та вологопереносу

Моделювання тепло- та вологопереносу є невід'ємною частиною аналізу внутрішнього повітряного середовища, оскільки ці процеси безпосередньо впливають на тепловий комфорт та потенційне виникнення проблем, таких як ріст цвілі.

Моделі враховують кондуктивний, конвективний та радіаційний теплообмін. Відносна вологість є критично важливим параметром, оскільки високі рівні призводять до вогкості та цвілі, а низькі – до дискомфорту.

Інструменти симуляції енергії будівель (BES), такі як EnergyPlus, інтегрують комбіновані моделі тепло- та масопереносу, що враховують рух повітря між зонами. Ці моделі також враховують такі фактори, як властивості огорожувальних конструкцій будівлі (U-значення), скління, затінення та внутрішні теплонадходження.

Тепловий комфорт та якість внутрішнього повітря є взаємопов'язаними. Температура, вологість та швидкість повітряного потоку є ключовими параметрами ЯВП. Тепловий комфорт безпосередньо залежить від температури, вологості та швидкості повітря. Висока вологість може призвести до утворення цвілі, що є прямою проблемою ЯВП.

Це означає, що досягнення оптимального теплового комфорту стосується не лише температури, а й управління вологістю та рухом повітря, які нерозривно пов'язані з ЯВП. Система, розроблена виключно для теплового комфорту, може ненавмисно погіршити ЯВП (наприклад, шляхом утримання забруднювачів у герметичному, контрольованому за температурою просторі). І навпаки, агресивна вентиляція для ЯВП може призвести до теплового дискомфорту або надмірного споживання енергії, якщо її не керувати належним чином. Тому комплексне моделювання повинно враховувати взаємозв'язок теплового комфорту та ЯВП, забезпечуючи одночасну оптимізацію обох. Саме тут стають незамінними передові інструменти, які інтегрують тепло, вологу та перенос забруднювачів повітря.

5.2.3. Динаміка повітряних потоків та розрахунок швидкості вентиляції

Системи вентиляції призначені для запобігання проникненню забруднювачів або їх видалення з внутрішніх джерел шляхом заміни застоюваного повітря свіжим зовнішнім повітрям. Динаміка повітряних потоків є вирішальною для ефективного розведення та розподілу забруднювачів.

Швидкість вентиляції може бути визначена різними способами: за кількістю людей (л/с на особу), за площею (л/с м²), за об'ємом (кратність повітрообміну, АСН) або на основі бажаної якості повітря.

Українські стандарти (ДБН В.2.2-15:2019) надають конкретні мінімальні норми повітрообміну для різних житлових приміщень. Наприклад, для загальної кімнати/спальні потрібно 0.6-0.7 АСН, тоді як для кухні – 1.5 АСН.

Стандарт ASHRAE 62.2 також встановлює мінімальні норми вентиляції, розраховані на основі площі підлоги та кількості спалень, а також визначає вимоги до місцевої витяжки для ванних кімнат (мінімум 50 CFM періодично або 20 CFM безперервно) та кухонь (мінімум 100 CFM періодично або 5 АСН безперервно). Розрахунки швидкості вентиляції також можуть враховувати видалення тепла або вологи.

Традиційні норми вентиляції часто базуються на фіксованій кратності повітрообміну (АСН) або кубічних футах на хвилину (CFM) на особу/площу. Ці фіксовані показники можуть призводити до надмірної вентиляції під час низької зайнятості або недостатньої вентиляції під час пікової активності, що спричиняє марнування енергії або низьку ЯВП.

Поява систем вентиляції, керованих за потребою (DCV), що працюють на основі даних датчиків у реальному часі (наприклад, рівнів CO₂), являє собою зміну парадигми до динамічної, оптимізованої вентиляції.

Це дозволяє системам регулювати потік повітря відповідно до фактичної потреби, виходячи за межі статичних проектних значень для досягнення як енергоефективності, так і сталої ЯВП. Це є критично важливою тенденцією в сучасному проектуванні будівель.

Мінімальні норми повітрообміну для житлових приміщень (ДБН В.2.2-15:2019 та ASHRAE 62.2)

Тип приміщення	ДБН В.2.2-15:2019 (Україна)	ASHRAE 62.2 (США)
Загальна кімната/Спальня/Дитяча/Кабінет	Мінімальна кратність повітрообміну для розрахунку тепловтрат: 0.5 год ⁻¹ Мінімальна витрата повітря для вибору обладнання: 0.6 (механічна), 0.7 (природна) год ⁻¹	Розрахунок для всієї будівлі: (площа підлоги / 100) + ((кількість спалень + 1) × 7.5 CFM)
Кухня/Кухня-їдальня	Мінімальна кратність повітрообміну для розрахунку тепловтрат: 1.5 год ⁻¹ Мінімальна витрата повітря для вибору обладнання: 72 м ³ /год (або 60 м ³ /год для об'ємів до 20 м ³), 0.5 год ⁻¹ (для об'ємів понад 20 м ³)	Мінімальна витяжка: 100 CFM (періодична) або 5 ACH (безперервна)
Ванна кімната	Мінімальна кратність повітрообміну для розрахунку тепловтрат: 0.5 год ⁻¹ Мінімальна витрата повітря для вибору обладнання: 54 м ³ /год	Мінімальна витяжка: 50 CFM (періодична) або 20 CFM (безперервна)
Туалет	Мінімальна кратність повітрообміну для розрахунку тепловтрат: 0.5 год ⁻¹ Мінімальна витрата повітря для вибору обладнання: 36 м ³ /год	-
Суміщений санвузол	Мінімальна кратність повітрообміну для розрахунку тепловтрат: 0.5 год ⁻¹ Мінімальна витрата повітря для вибору обладнання: 90 м ³ /год	-

5.3. Обчислювальна гідродинаміка (CFD) для аналізу внутрішнього повітряного середовища

5.3.1. Основні принципи CFD: Керуючі рівняння та числові методи

Обчислювальна гідродинаміка (CFD) є потужним комп'ютерним методом симуляції, що використовується для прогнозування руху повітря та забруднювачів у будівлі. Вона передбачає вирішення фундаментальних принципів механіки рідин та керуючих рівнянь, таких як рівняння Нав'є-Стокса, у поєднанні з рівняннями енергії та дифузії. Ці рівняння описують збереження маси, імпульсу та енергії для потоків рідин, а також перенос хімічних речовин (забруднювачів).

Моделі CFD можуть симулювати складні сценарії, включаючи турбулентні повітряні потоки, та надавати детальні термічні дані та дані про забруднювачі. Числові методи передбачають дискретизацію обчислювальної області на сітку (наприклад, неструктуровану тетраедричну сітку) та ітераційне розв'язання рівнянь.

CFD є важливим інструментом для подолання розриву між макро- та мікроаналізом ЯВП. У той час як інструменти симуляції енергії будівель (BES), такі як EnergyPlus, моделюють енергію всієї будівлі та об'ємні повітряні потоки, CFD зосереджується на детальному русі повітря та розподілі забруднювачів у конкретних просторах.

Це означає, що BES надає загальну енергетичну продуктивність та середню ЯВП, тоді як CFD пропонує детальнішу інформацію про локалізовані умови. Такий взаємодоповнюючий зв'язок є надзвичайно цінним. CFD може уточнити розуміння ЯВП у критичних зонах, визначених BES, або аналізувати складні геометрії, де припущення про ідеальне перемішування (поширені в простіших моделях) є недійсними.

Підходи до ко-симуляції (наприклад, EnergyPlus з CONTAM) ілюструють це, де об'ємні повітряні потоки з одного інструменту використовуються для детального аналізу в іншому. Це дозволяє застосовувати багатомасштабний підхід до аналізу ЯВП, враховуючи як енергоефективність, так і локалізований комфорт/здоров'я.

5.3.2. Застосування CFD для симуляції розподілу температури, CO₂ та швидкості повітря

CFD широко використовується для аналізу розподілу повітряних потоків, температури та забруднювачів у різних внутрішніх середовищах. Для житлових будівель CFD може симулювати

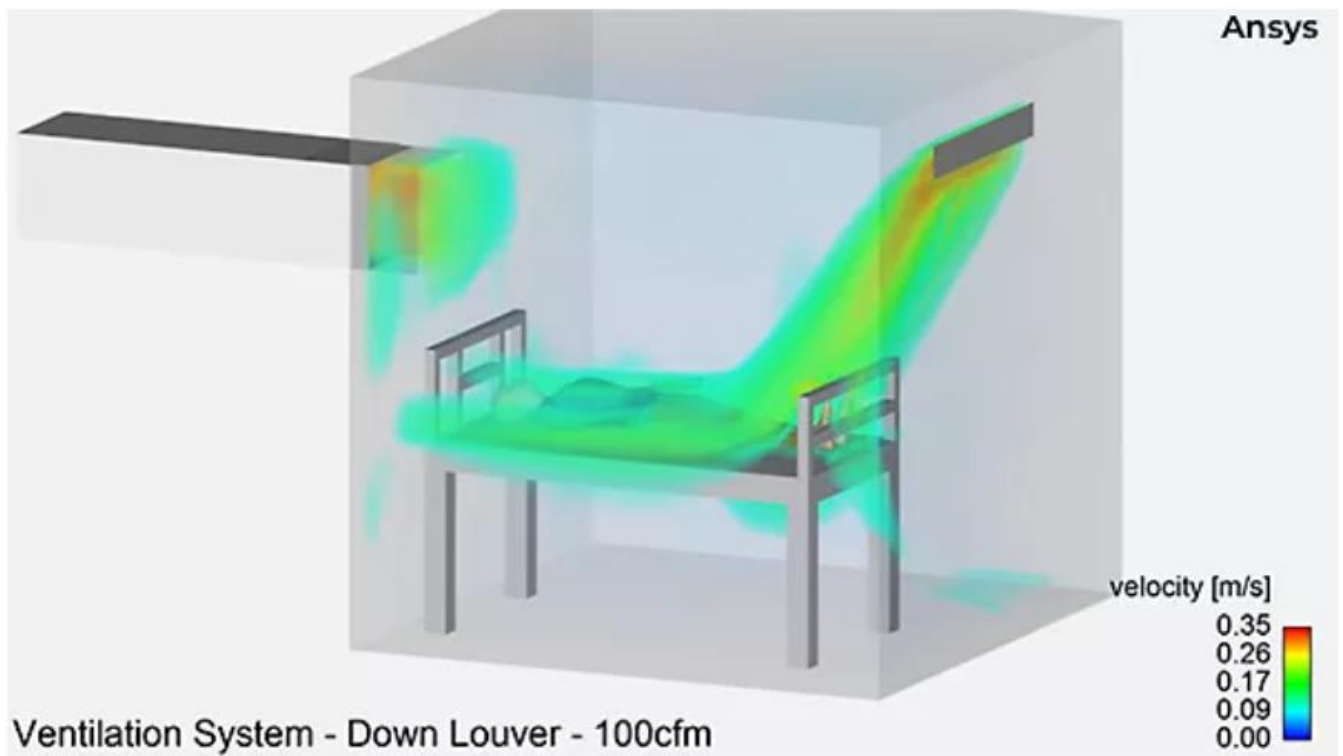


Рис. 5.1. Моделювання

- **Розподіл температури:** Може прогнозувати нестационарний розподіл температури, показуючи термічну стратифікацію (наприклад, підйом гарячого повітря) та теплообмін від джерел, таких як мешканці або нагрівальні елементи. Це має вирішальне значення для оцінки теплового комфорту та виявлення холодних/гарячих точок.

- **Розподіл CO₂:** Моделі CFD можуть симулювати дифузію та концентрацію CO₂, що виробляється мешканцями. Це допомагає візуалізувати, як CO₂ поширюється та накопичується, вказуючи на зони поганої вентиляції.

- **Швидкість повітряного потоку:** CFD надає детальні поля швидкості вітру та схеми повітряних потоків, показуючи, як повітря рухається по кімнатах, включаючи перехресну вентиляцію та ефект тяги. Це життєво важливо для оптимізації розташування вентиляційних отворів та забезпечення ефективного видалення забруднювачів.

CFD дозволяє швидко досліджувати альтернативні конструкції та краще розуміти елементи, які можуть покращити продуктивність.

Наприклад, він може оцінювати розташування вентиляційних отворів для зменшення поширення патогенів або оптимізувати конструкції приміщень з негативним тиском.

Прості моделі часто припускають "ідеальне перемішування" в кімнаті, надаючи середні концентрації забруднювачів.

Однак CFD забезпечує детальний просторовий розподіл температури, CO₂ та швидкості. Це означає, що CFD може виявляти "застійні зони" або "локальні зони без вентиляції", де забруднювачі накопичуються, навіть якщо загальний середній показник по кімнаті здається прийнятним.

Ця здатність є критичною для житлових приміщень, оскільки локалізовані гарячі точки забруднення (наприклад, біля газової плити або в погано

вентилюваному кутку) можуть непропорційно впливати на здоров'я та комфорт мешканців, навіть якщо середній рівень CO₂ у всьому приміщенні знаходиться в межах норми. CFD дозволяє проводити цілеспрямовані проектні втручання для вирішення цих конкретних проблемних зон, що призводить до дійсно оптимізованої ЯВП, а не просто до досягнення середніх порогових значень.

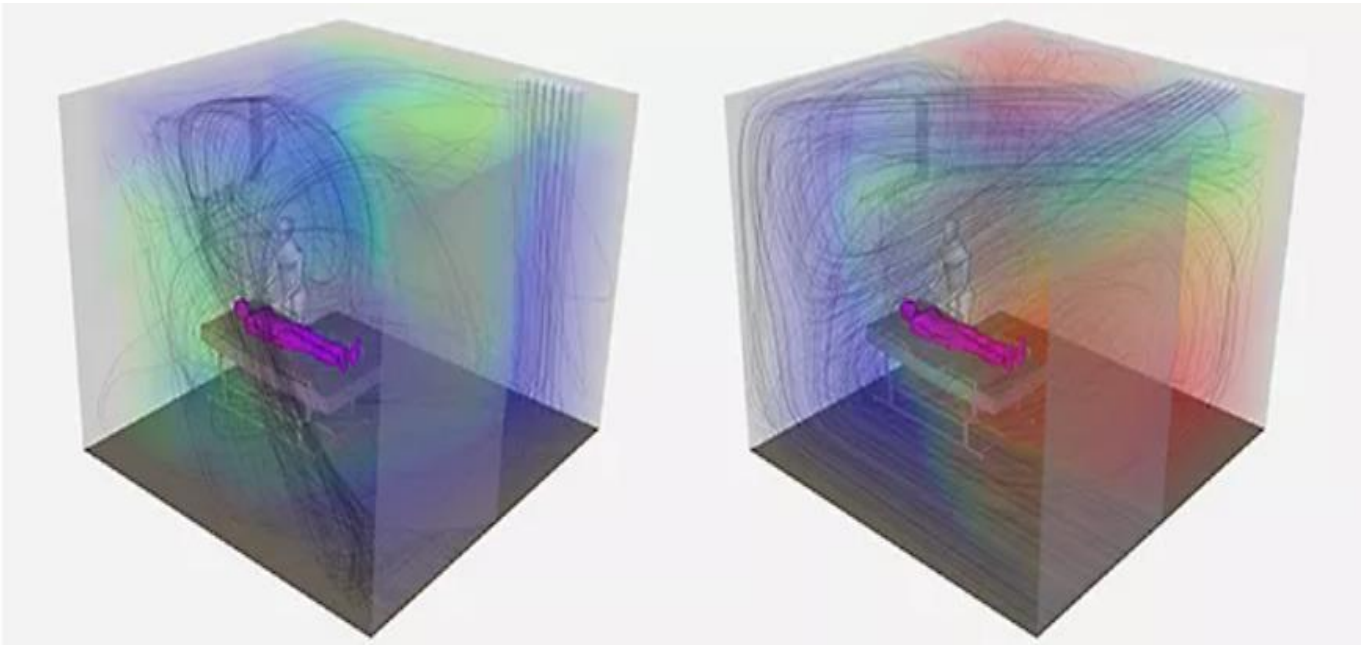


Рис. 5.2. Випадок 1 (ліворуч) є оптимальним варіантом вентиляції порівняно з випадком 2 (праворуч). Наявність жалюзі, що спрямовують потік повітря прямо вниз, зменшує час перебування повітря в повітрі, що показано червоним об'ємним зображенням.

**5.4. Розширені метрики CFD:
Середній вік повітря (MAA) та
ефективність повітрообміну (ACE)**

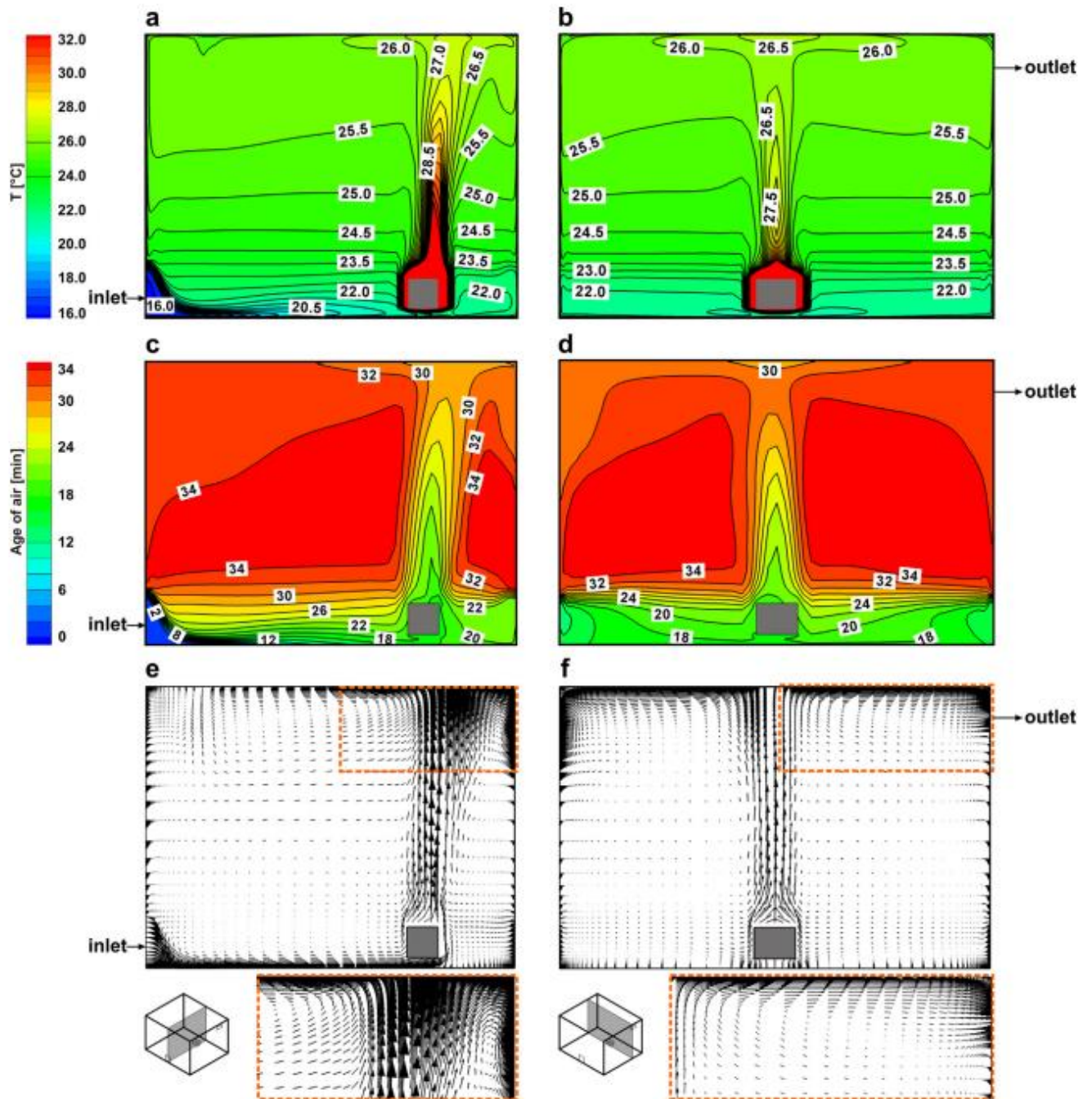


Рис 5.3. Розподіл температури повітря(а, б), повітря(с, д) та поле вектора швидкості по двох вертикальних площинах (е, ф)

Окрім базового розподілу параметрів, CFD може розраховувати розширені метрики, такі як середній вік повітря (MAA) та ефективність повітрообміну (ACE).

- **Середній вік повітря (MAA):**

Цей показник вказує на "свіжість" повітря в просторі, причому нижчі значення означають свіжіше повітря. Він допомагає ідентифікувати застійні або рециркуляційні зони.

- **Ефективність повітрообміну (ACE):**

Визначається як відношення номінальної постійної часу (об'єм приміщення, розділений на швидкість подачі зовнішнього повітря) до середнього віку повітря на референсній висоті (наприклад, на рівні дихання, 1 м над підлогою).

Значення ACE, близьке до одиниці (0.8-1.2), свідчить про ідеальне перемішування, тоді як значення більше 1.2 вказує на витяжну вентиляцію. ACE вимірює розподіл повітря на рівні дихання.

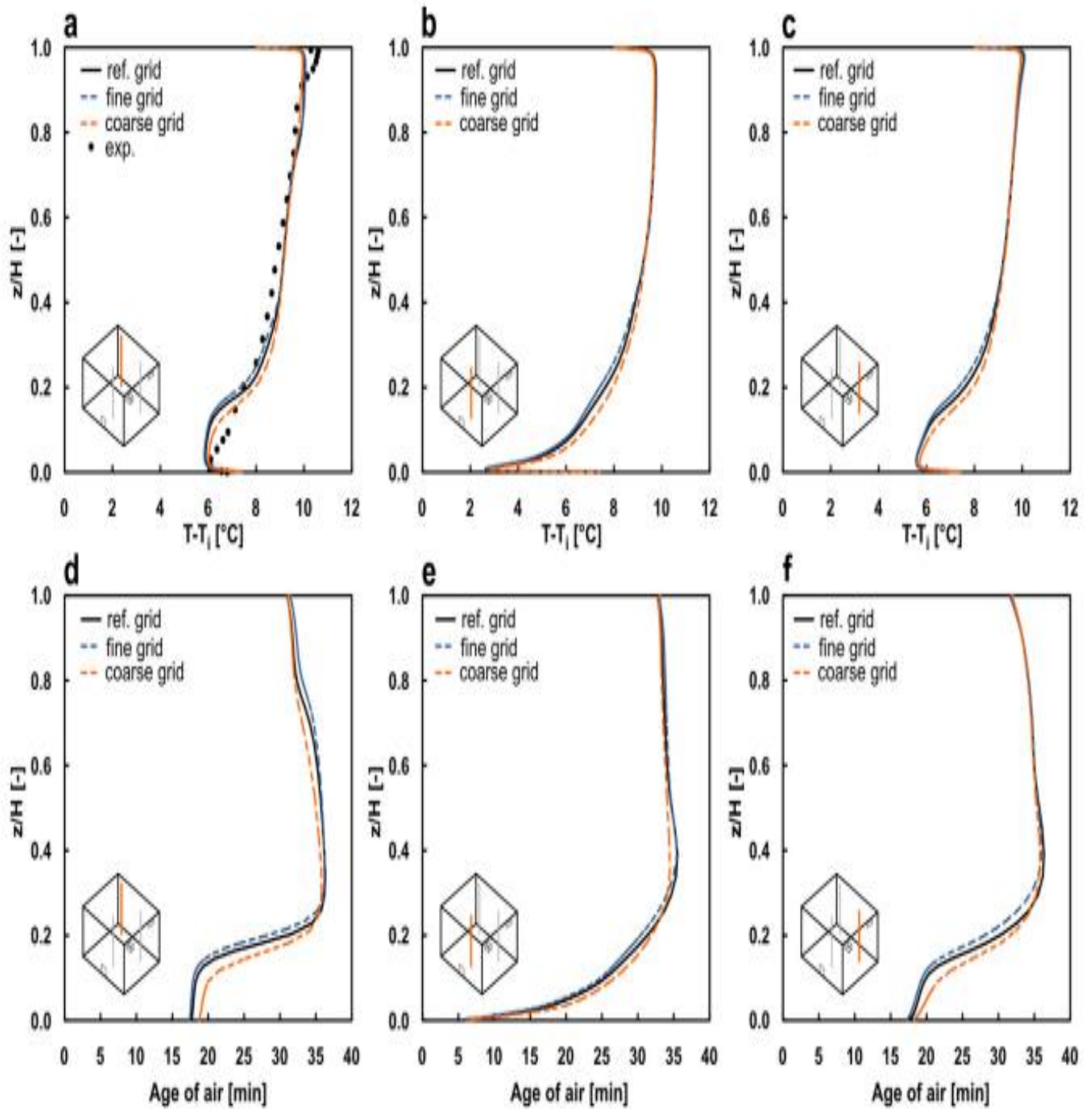


Рис 5.4. Вплив роздільної здатності сітки на: (аес) профіль температурної шкали та (def) повітря вздовж трьох вертикальних ліній

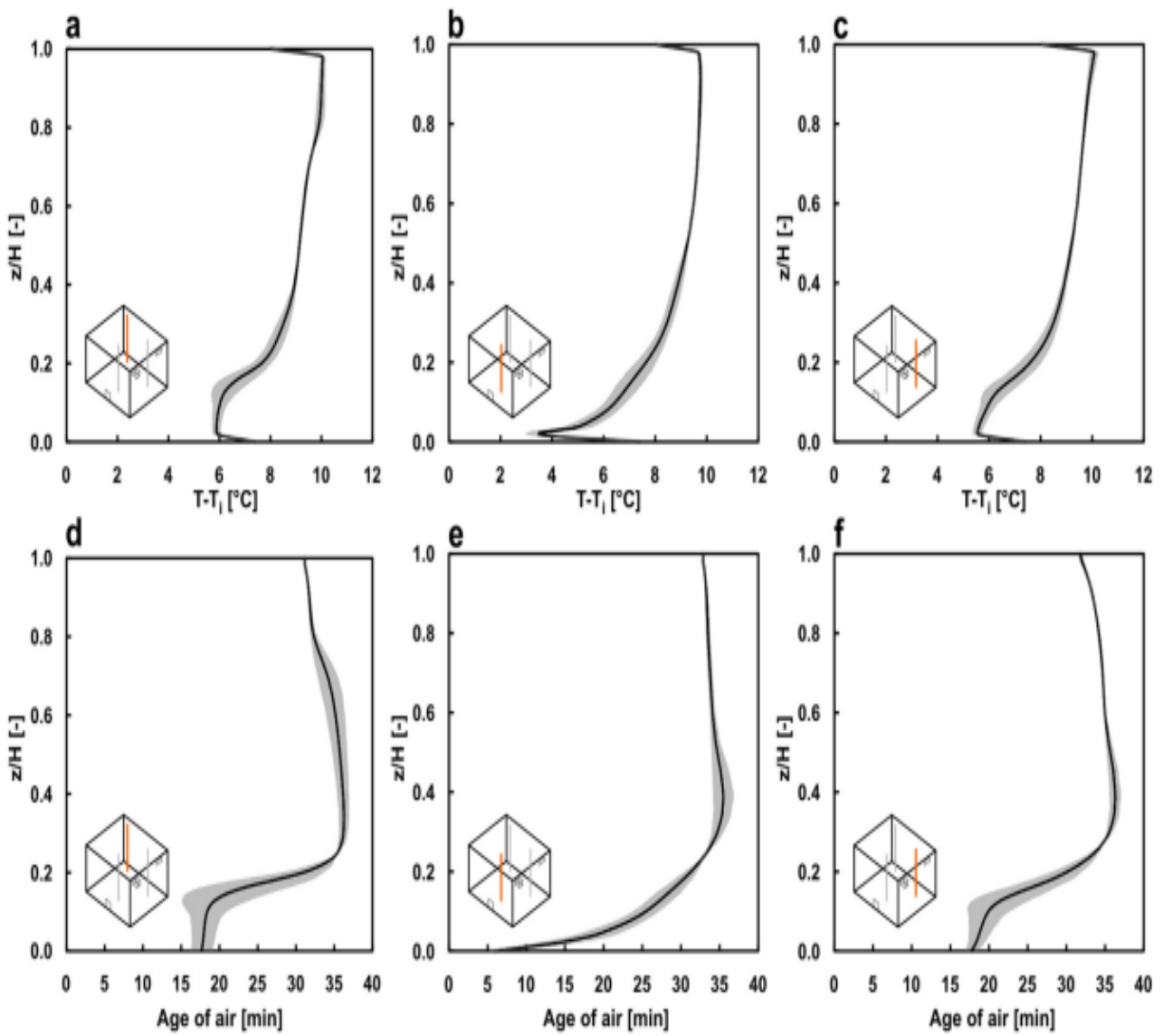


Рис 5.5. Вплив роздільної здатності сітки на: (аес) профіль температурної шкали та (def) повітря вздовж трьох вертикальних ліній.

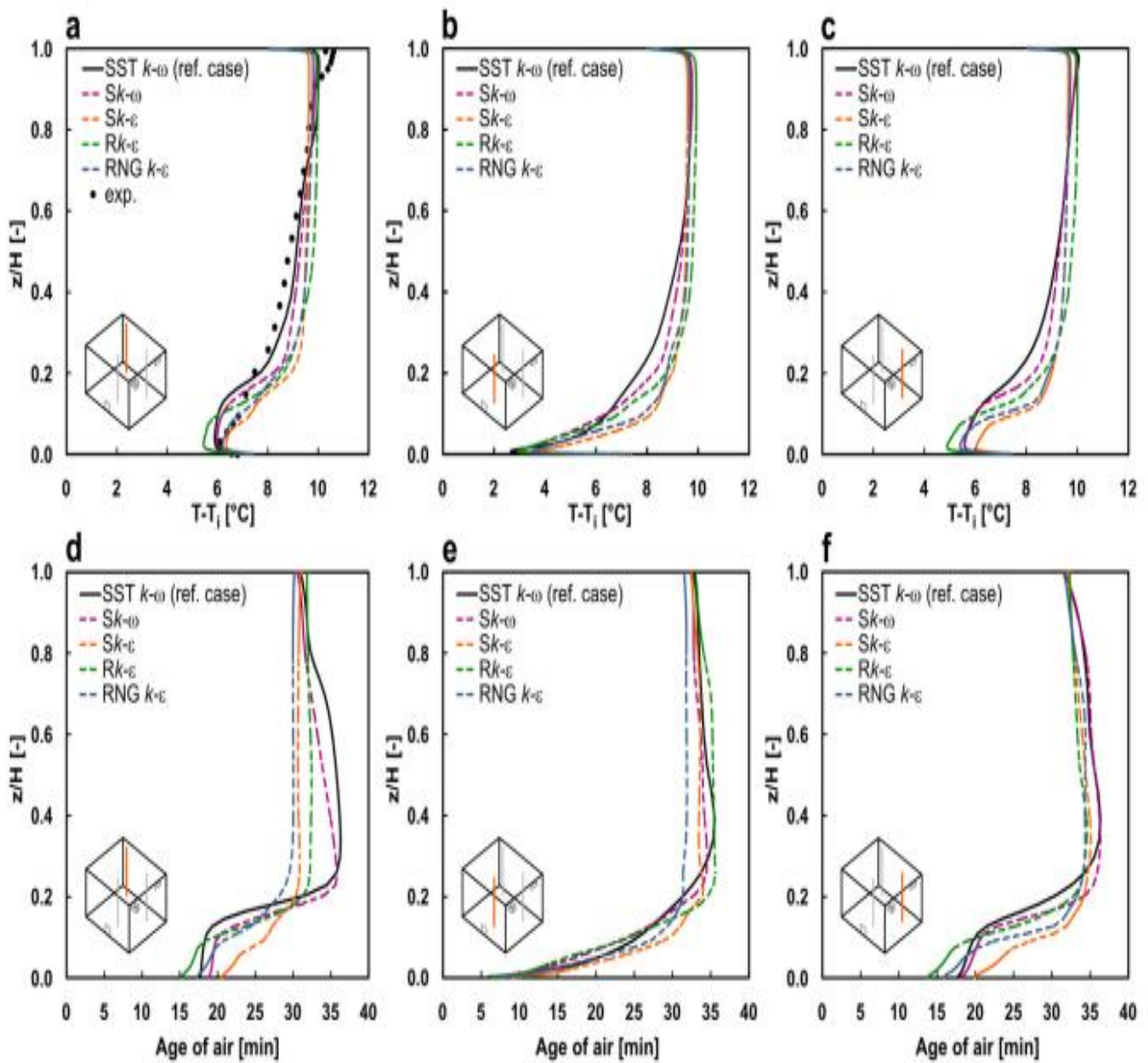


Рис 5.6. Вплив моделі турбулентності на: (аєс) профілі температурної шкали та (def) повітря вздовж трьох вертикальних ліній.

Кратність повітрообміну (ACH) є поширеною, простою метрикою для вентиляції. Однак МАА та АСЕ є більш складними метриками CFD.

ACH показує *загальний* повітрообмін, але не те, *наскільки ефективно* це повітря розподіляється або наскільки свіже повітря в зайнятих зонах.

МАА та АСЕ надають більш глибоке розуміння ефективності вентиляції.

Висока АСН може все ще призводити до низької ЯВП, якщо повітря коротко замикається або існують застійні зони.

Ці розширені метрики дозволяють інженерам дійсно оптимізувати розподіл повітря, забезпечуючи ефективне надходження свіжого повітря до мешканців та ефективне видалення забруднювачів із зони дихання, що є критично важливим для результатів у сфері здоров'я. Це виходить за межі простої кількості повітря до *якості* розподілу повітря.

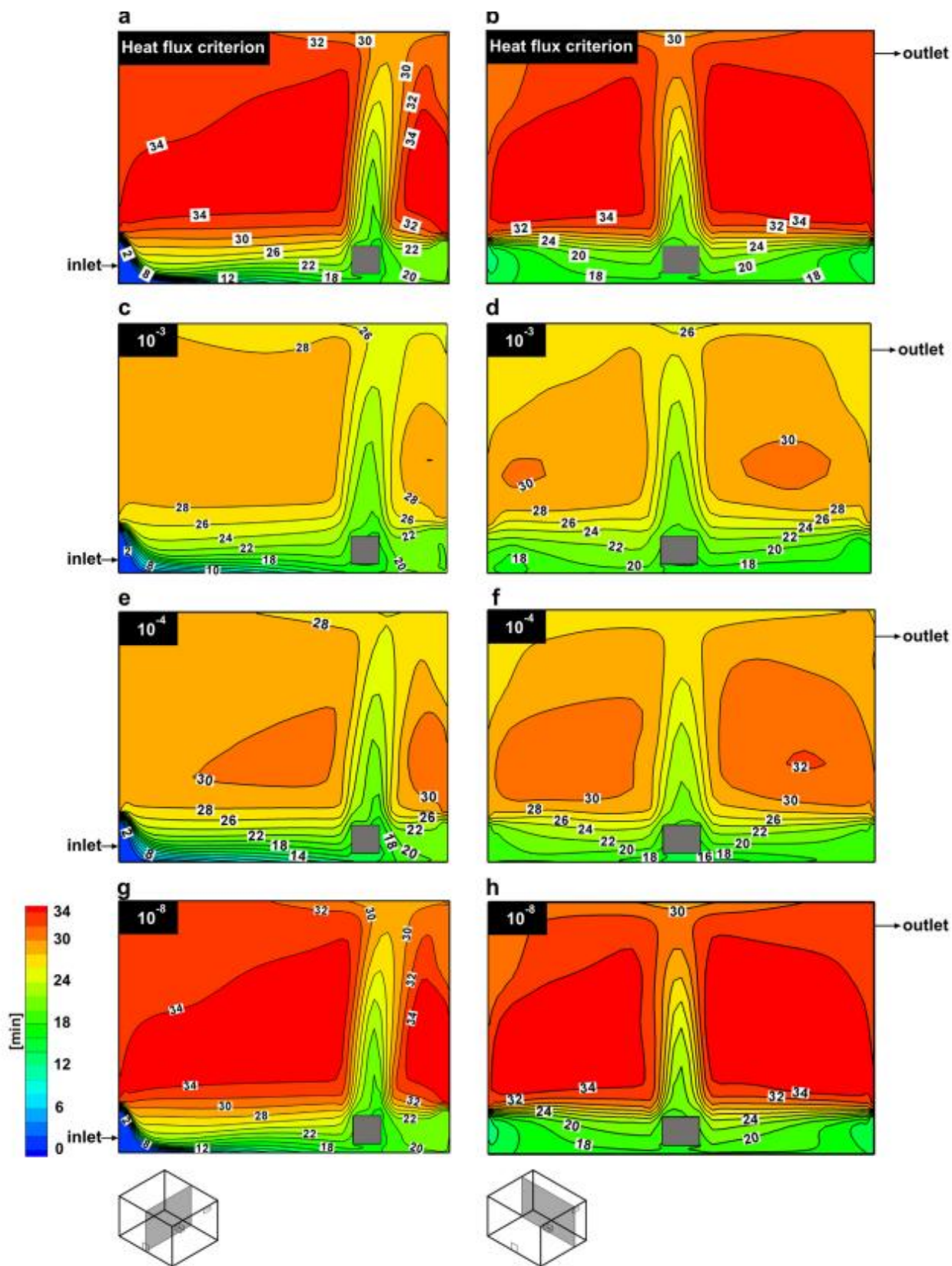


Рис 5.7. Вплив ітеративної межі збіжності на розподіл повітря по двох вертикальних площинах для: (а, б) еталонного випадку, (с, d) мінімальних порогів для масштабованих залишків 10^3 , (е, f) 10^4 та (g, h) 10^6

5.5. Провідне програмне забезпечення для моделювання та симуляції ЯВП у житлових будівлях

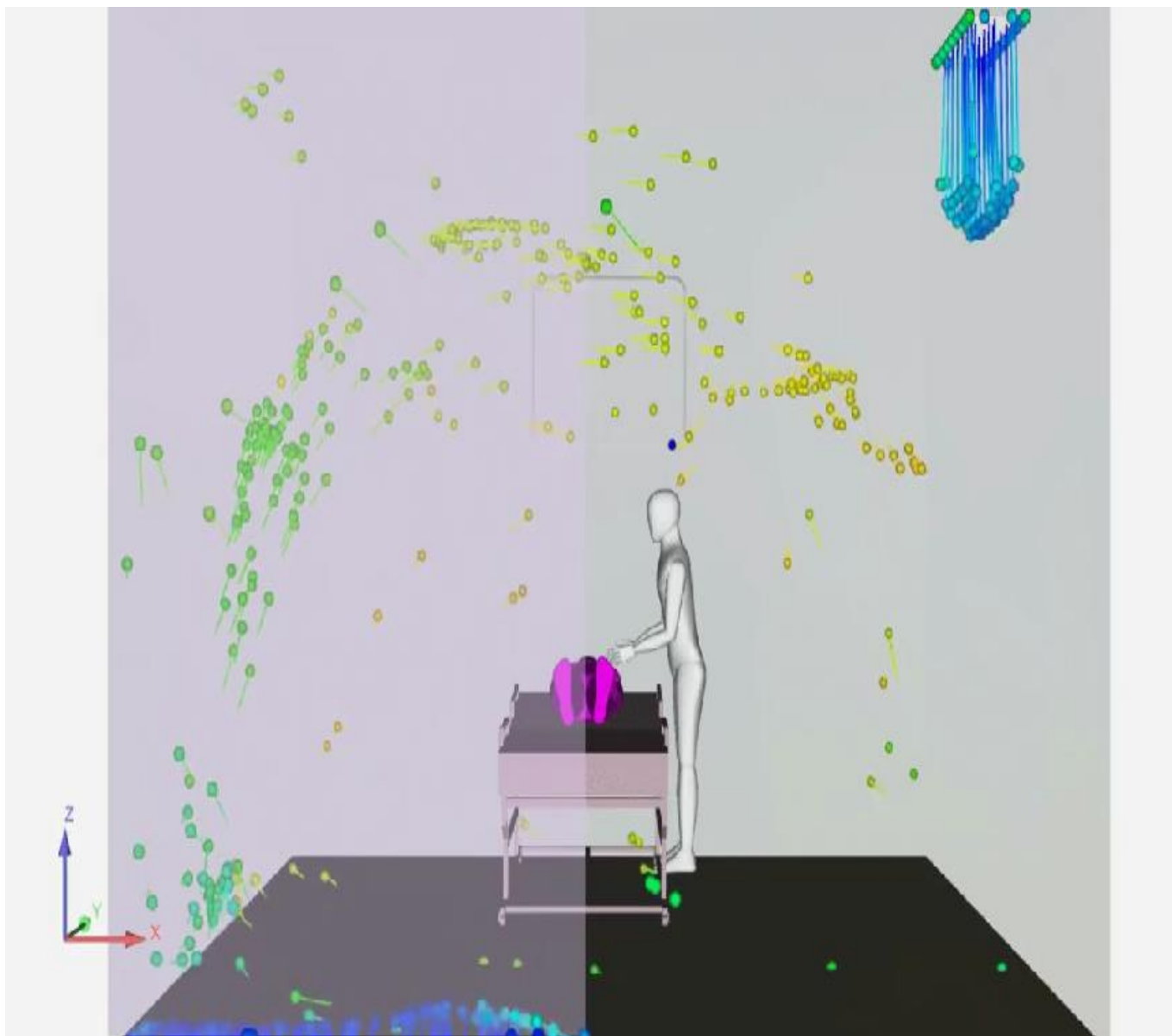


Рис 5.8. Моделювання систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря

5.5.1. ANSYS Fluent: Розширена CFD для детального просторового аналізу

ANSYS Fluent є програмним забезпеченням для обчислювальної гідродинаміки (CFD) загального призначення, відомим своїм передовим фізичним моделюванням та високою точністю.

Він широко використовується для моделювання потоків рідин, тепло- та масопереносу, а також хімічних реакцій.

Можливості для ЯВП у житлових приміщеннях:

- **Детальний просторовий аналіз:**

Fluent може симулювати схеми повітряних потоків, застійні зони та оптимізувати розташування вентиляційних отворів. Він може аналізувати міграцію та розсіювання забруднювачів, включаючи CO₂ і навіть газ радон.

- **Тепловий комфорт:**

Fluent може оцінювати тепловий комфорт, досліджуючи такі параметри, як температура повітря та радіаційні теплові навантаження. Він підтримує розрахунок прогнозованого середнього значення (PMV) та прогнозованого відсотка незадоволених (PPD) на основі стандартів ISO 7730 та ASHRAE 55.

- **Природна вентиляція:**

Він може симулювати природну вентиляцію, що керується різницею вітру та температури, показуючи перехресну вентиляцію та ефект тяги.

- **Зручний інтерфейс:**

Fluent пропонує сучасний, зручний інтерфейс, який спрощує процес CFD від попередньої до післяобробки в єдиному робочому вікні.

Fluent відрізняється деталізацією, високоточною симуляцією потоків рідин, тепла та переносу речовин. Він може виявляти конкретні застійні зони або шляхи поширення забруднювачів.

Цей рівень деталізації виходить за межі середніх умов у приміщенні, які надають простіші моделі. Для житлових будівель цей детальний аналіз є безцінним. Він дозволяє інженерам точно визначити проблемні ділянки (наприклад, де накопичується CO₂ у спальні або де виникають холодні протяги біля вікна).

Це дає змогу впроваджувати високоцільові проектні модифікації або рішення з модернізації, забезпечуючи ефективність та ресурсоефективність втручань, а не загальні зміни, які можуть не вирішити конкретні локалізовані проблеми ЯВП.

5.5.2. DesignBuilder: Інтегроване моделювання енергії будівель та CFD

DesignBuilder є потужним та досконалим стороннім інтерфейсом до EnergyPlus, який також інтегрується з CFD та іншими механізмами відповідності. Він широко використовується для аналізу продуктивності будівель, включаючи енергетичні та екологічні показники.

Можливості для ЯВП у житлових приміщеннях:

- **Комплексне енергетичне моделювання:**

DesignBuilder розраховує навантаження на опалення та охолодження за допомогою методу "Теплового балансу", затвердженого ASHRAE. Він може симулювати споживання енергії з розбивкою за видами палива та кінцевим використанням, а також оцінювати вплив альтернативних проектів на річне споживання енергії та викиди CO₂.

- **Природна вентиляція:**

Він підтримує як "заплановану" природну вентиляцію (явно визначені швидкості повітрообміну), так і "розрахункову" природну вентиляцію (на основі відкриття вікон, щілин, плавучості та різниці тисків, спричинених вітром). Він може модулювати розміри отворів для запобігання великим перепадам температури.

- **Симуляція CO₂:**

DesignBuilder може симулювати рівні концентрації CO₂, використовуючи типову зовнішню концентрацію CO₂ 400 ppm. Він автоматично включає звіти про концентрацію CO₂, коли вказано вентиляцію, керовану за потребою (DCV).

- **Тепловий комфорт:**

Він надає широкий спектр показників комфорту, включаючи температуру внутрішнього повітря, середню радіаційну та оперативну температури та вологість. Він може розраховувати PMV та PPD на основі умов навколишнього середовища.

- **Відповідність LEED та ASHRAE:**

DesignBuilder підтримує моделювання за стандартами ASHRAE 90.1 та LEED, включаючи процедуру розрахунку швидкості вентиляції (VRP) за стандартом ASHRAE 62.1.

DesignBuilder інтегрує кілька механізмів симуляції (EnergyPlus, CFD) в єдиному інтерфейсі. Він також автоматизує аспекти відповідності LEED. Ця інтеграція зменшує потребу в численних програмних засобах та ручному перенесенні даних між ними. Для проєктувальників житлових будівель та енергомодельовальників це означає значне спрощення робочого процесу.

Вони можуть швидко досліджувати альтернативні проєкти, оцінювати їхній вплив на споживання енергії, ЯВП та тепловий комфорт, а також генерувати звіти про відповідність з однієї моделі. Це прискорює процес проєктування, сприяє ітераційним покращенням та робить складні аналізи більш доступними, що в кінцевому підсумку призводить до створення будівель з кращими показниками та більшою відповідністю стандартам.

5.5.3. EnergyPlus: Моделювання енергії всієї будівлі та ЯВП з вентиляцією, керованою за потребою (DCV)

EnergyPlus – це програма для моделювання енергії всієї будівлі, розроблена Міністерством енергетики США (DOE). Вона моделює споживання енергії для опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та водокористування. Вона все частіше використовується в житлових проєктах завдяки своїй точності та здатності моделювати складні взаємодії.

Можливості для ЯВП у житлових приміщеннях:

- **Інтегроване рішення:** EnergyPlus забезпечує інтегроване, одночасне рішення для термічних умов зони та реакції системи ОВК. Вона включає комбіновані моделі тепло- та масопереносу, що враховують рух повітря між зонами.
- **Вентиляція, керована за потребою (DCV):** EnergyPlus може моделювати DCV на основі CO₂ за допомогою процедури розрахунку швидкості вентиляції (VRP) або процедури якості внутрішнього повітря (IAQP), визначених у стандарті ASHRAE 62.1. Вона динамічно регулює швидкість вентиляції зовнішнього повітря на основі зайнятості та рівнів CO₂.
- **Моделювання забруднювачів:** Хоча CO₂ є насамперед індикатором, EnergyPlus використовує IAQP для контролю вуглекислого газу, а також може вводити загальні забруднювачі.
- **Ко-симуляція:** EnergyPlus підтримує ко-симуляцію з іншими програмами, такими як CONTAM (для детального транспортування забруднювачів) через функціональний макетний інтерфейс (FMI) або API віртуального випробувального стенду систем управління будівлями (BCVTB).
- **Тепловий комфорт:** Він реалізує детальну фізику будівлі для перенесення повітря, вологи та тепла, підтримуючи розрахунок показників теплового комфорту.

EnergyPlus є надійною, відкритою платформою з потужними можливостями для DCV та моделювання забруднювачів. Вона також підтримує ко-симуляцію. Це дозволяє використовувати складні стратегії управління, що виходять за межі фіксованих швидкостей вентиляції.

Здатність EnergyPlus моделювати динамічні реакції систем ОВК та DCV на основі рівнів CO₂ робить її фундаментальним інструментом для проектування "розумних" або "чутливих" житлових будівель. Ці будівлі можуть адаптувати свою вентиляцію та споживання енергії в реальному часі до фактичних умов, оптимізуючи як ЯВП, так і енергоефективність. Ця можливість є критично важливою для досягнення цілей щодо нульового споживання енергії при забезпеченні здорового внутрішнього середовища.

Функція ко-симуляції з такими інструментами, як CONTAM, ще більше розширює ці можливості, дозволяючи глибше зануритися в складні взаємодії забруднювачів та розподіл повітря, переходячи від простого CO₂ як індикатора до стратегії контролю кількох забруднювачів, що є передовим напрямком у вдосконаленому управлінні ЯВП.

5.6.. Валідація симуляційних моделей за допомогою реальних даних



Рис 5.9: План поверху квартири

5.6.1. Важливість валідації для надійності моделі

Валідація є вирішальним кроком у процесі моделювання, оскільки вона забезпечує точність та надійність прогнозів, отриманих за допомогою симуляційних інструментів. Вона має важливе значення для:

- **Забезпечення точності:**

Валідація підтверджує, що модель точно відображає реальні фізичні процеси та умови. Без валідації результати симуляції можуть бути оманливими та призвести до неправильних проектних рішень.

- **Підвищення довіри:**

Порівняння симуляційних результатів з емпіричними даними підвищує довіру до моделі та її застосовності на практиці.

- **Покращення продуктивності симуляції:**

Процес валідації допомагає виявити слабкі сторони моделі, такі як невідповідність турбулентних моделей або недостатня роздільна здатність сітки, що дозволяє інженерам вдосконалити свої симуляції.

- **Усунення розриву між теорією та практикою:**

Валідація є мостом між теоретичними рамками та практичним застосуванням, забезпечуючи, що моделі можуть надавати надійні прогнози, які узгоджуються з фактичними вимірами.

Невалідні моделі можуть призвести до значної невизначеності в оцінках енергоспоживання та якості повітря, що може мати серйозні наслідки для проектування та експлуатації будівель.

Model	Period	\bar{C}_s (ppm)	\bar{C}_p (ppm)	R ²	m	b	b/ \bar{C}_0 (%)	NMSE	FB	FS
1. REG	Training	613.87	637.80	0.94	1.03	8.34	0.01	0.02	0.04	0.11
	Checking 01	559.27	459.72	0.98	1.02	-111.65	-0.20	0.05	-0.20	0.03
	Checking 02	627.72	601.93	0.94	1.09	-79.31	-0.13	0.02	-0.04	0.11
2. REG + E+	Training	613.87	668.77	0.72	0.76	201.99	0.33	0.08	0.09	-0.22
	Checking 01	559.27	569.78	0.98	1.02	0.97	0.00	0.01	0.02	0.03
	Checking 02	627.72	676.30	0.88	1.02	33.21	0.05	0.03	0.07	0.09
3. BWD + REG	Training	613.87	638.70	0.94	1.02	13.22	0.02	0.02	0.04	0.10
	Checking 01	559.27	494.17	0.99	1.03	-80.02	-0.14	0.02	-0.12	0.03
	Checking 02	627.72	626.86	0.94	1.07	-45.22	-0.07	0.02	0.00	0.10
4. BWD + E+	Training	613.87	82.31	0.29	0.35	-130.42	-0.21	7.00	-1.53	-0.84
	Checking 01	559.27	54.92	0.37	0.31	-116.11	-0.21	11.25	-1.64	-0.66
	Checking 02	627.72	82.36	0.40	0.47	-212.45	-0.34	6.66	-1.54	-0.30
5. BWD + DOE-2	Training	613.87	946.25	0.69	0.87	409.46	0.67	0.25	0.43	0.10
	Checking 01	559.27	1091.05	0.73	0.63	738.79	1.32	0.53	0.64	-0.31
	Checking 02	627.72	1017.33	0.61	0.68	591.00	0.94	0.28	0.47	-0.14
6. BWD + BLAST	Training	613.87	167.82	0.46	0.59	-192.73	-0.31	2.49	-1.14	-0.29
	Checking 01	559.27	83.45	0.49	0.43	-157.44	-0.28	6.43	-1.48	-0.47
	Checking 02	627.72	134.67	0.54	0.68	-290.47	-0.46	3.32	-1.29	-0.08

Таблиця 5.3: Результати моделювання DesignFlowRate відповідають стандарту ASTM D5157 на основі різних коефіцієнтів. (Червоним кольором позначені значення, що не відповідають стандарту.)

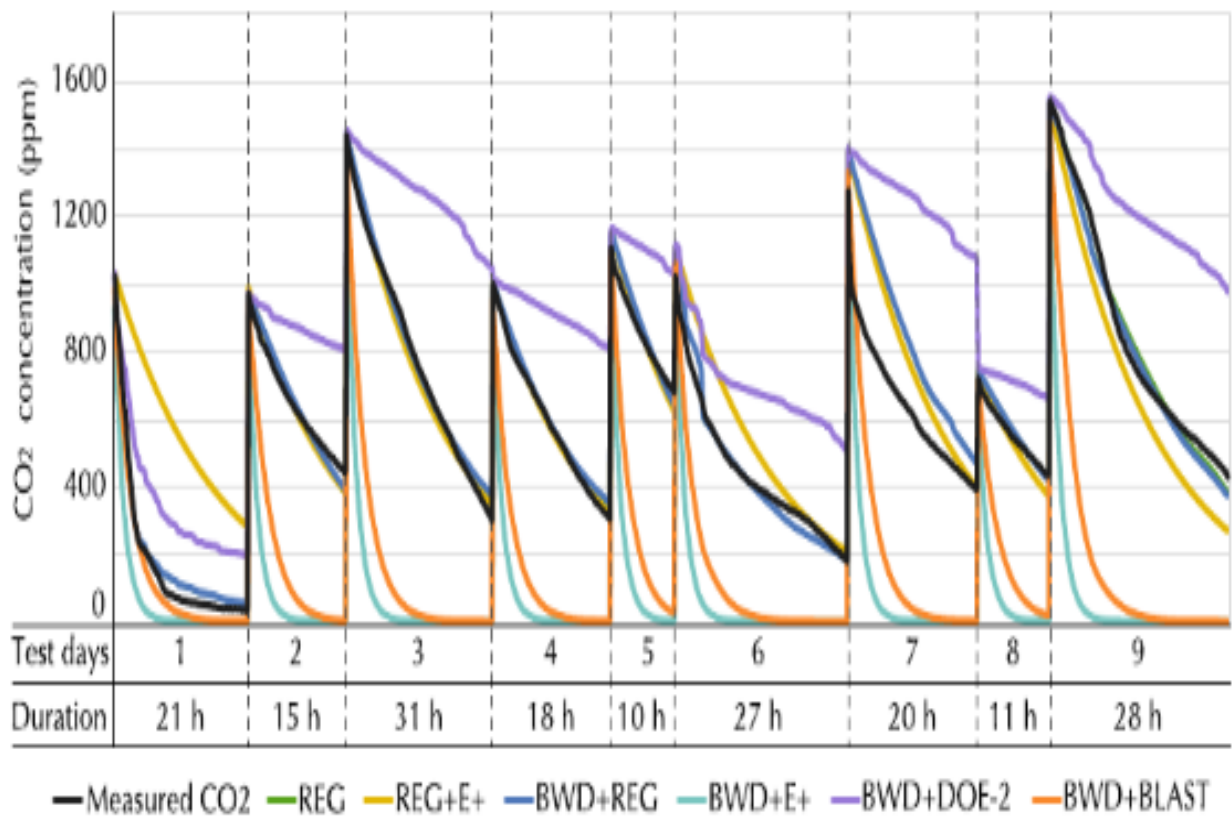


Рис 5.10. Моделі DesignFlowRate: Виміряні та прогнозовані концентрації CO₂ у період (літо). Тривалість кожного тестового дня виражена в годинах (год)

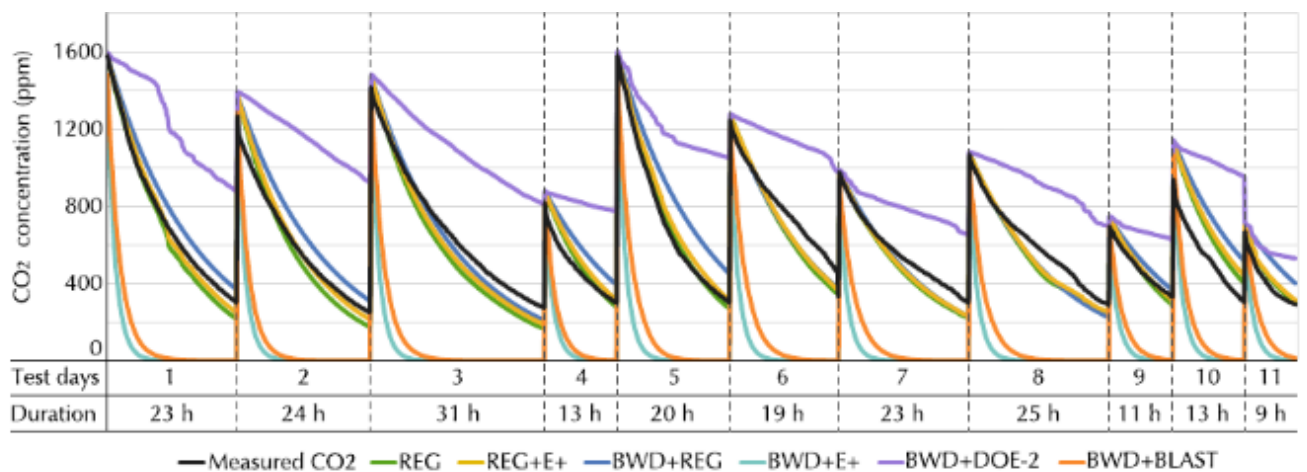


Рис 5.11: Моделі DesignFlowRate:

Виміряні та прогнозовані концентрації CO₂ у контрольний період O2 (весна).

Тривалість кожного випробувального дня виражається в годинах

Таблиця 5.12

Ранжування моделей за кольоровою шкалою. Від найкращої (зелений колір) до найгіршої (червоний колір)

		1. REG	2. REG +E+	3. BWD +REG	4. BWD +E+	5. BWD +DOE-2	6. BWD +BLAST
R ²	Training	0.94	0.72	0.94	0.29	0.69	0.46
	Checking 01	0.98	0.98	0.99	0.37	0.73	0.49
	Checking 02	0.94	0.88	0.94	0.40	0.61	0.54
NMSE	Training	0.02	0.08	0.02	7.00	0.25	2.49
	Checking 01	0.05	0.01	0.02	11.25	0.53	6.43
	Checking 02	0.02	0.03	0.02	6.66	0.28	3.32

5.6.2. Поширені методи та метрики валідації

Для валідації симуляційних моделей використовуються різноманітні методи та метрики:

- **Емпірична валідація:**

Цей метод передбачає порівняння симульованих даних з даними, отриманими шляхом моніторингу реальних будівель або експериментів.⁶²

Поширені методи включають:

- **Тести з використанням трасерних газів:** Застосовується для вимірювання швидкості інфільтрації повітря та повітрообміну. Метод розпаду концентрації CO₂ передбачає введення CO₂ (наприклад, за допомогою вогнегасника) у незайнятий простір та моніторинг його розпаду з часом.

- **Тести "blower door":** Використовуються для вимірювання герметичності будівель та визначення ефективної площі витoku повітря.

- **Аналітична верифікація:** Порівняння симульованих даних з перевіреними числовими моделями або аналітичними розв'язками, які мають закриту форму.

- **Порівняльне тестування:** Порівняння результатів, отриманих моделлю, з нею самою або з іншими енергетичними моделями тієї ж будівлі.

Метрики валідації:

- **Середньоквадратична похибка (RMSE):** Вимірює середню величину похибок, що є різницями між прогнозованими та фактичними значеннями.

- **Коефіцієнт варіації RMSE (CV(RMSE)):** Вимірює відносну мінливість похибок прогнозування, вказуючи на точність моделі.

- **Чиста середня похибка зміщення (NMBE):** Оцінює зміщення або систематичну похибку моделі.

- **R-квадрат (R²):** Показує, наскільки добре модель пояснює мінливість залежної змінної. Значення, близькі до 1, вказують на високу точність.

- **Середня абсолютна похибка (MAE) та середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE):** Вимірюють середню абсолютну різницю між прогнозованими та фактичними значеннями.

Прийнятні межі похибки можуть відрізнитися залежно від застосування; наприклад, для CFD-симуляцій у будівельній фізиці похибка менше 5% для швидкості та температури вважається дуже хорошою.

5.6.3. Приклади валідації та практичні кейси

- **ANSYS Fluent:** Проведено численні дослідження з валідації Fluent для моделювання внутрішнього повітряного середовища. Це включає валідацію для розподілу температури, швидкості повітря та віку повітря. Також існують дослідження, які підтверджують точність Fluent у моделюванні розсіювання CO₂ та навіть динаміки газу радону в житлових приміщеннях. Ці дослідження часто порівнюють результати симуляції з повномасштабними вимірами температури та концентрації забруднювачів.
- **DesignBuilder:** Симуляції DesignBuilder були валідовані за допомогою польових вимірювань температури та вологості в реальних житлових будинках. Дослідження підтверджують, що DesignBuilder є надійним інструментом для моделювання перехресної вентиляції та оцінки теплового комфорту.
- **EnergyPlus:** Валідація моделей інфільтрації EnergyPlus проводилася за допомогою тестів з використанням трасерних газів (методу розпаду CO₂) та тестів "blower door" у висотних житлових будинках. Точність моделей оцінювалася за метриками R² та NMSE, демонструючи високу кореляцію між симульованими та виміряними даними. Також проводилася валідація енергоспоживання за допомогою вимірних даних.

Послідовна валідація різних програмних комплексів та параметрів підкреслює зростаючу довіру до інструментів симуляції. Однак це також вказує на постійну потребу в ретельному емпіричному тестуванні для уточнення моделей та забезпечення їх застосовності до різноманітних реальних умов.

5.7. Проміжні висновки та рекомендації

Аналіз математичного моделювання та CFD-аналізу повітряного середовища в житлових будівлях виявляє їхню незамінну роль у сучасному проектуванні та експлуатації. Ці інструменти дозволяють глибоко розуміти складні взаємодії між температурою, концентрацією CO₂, швидкістю повітряних потоків та загальною якістю внутрішнього повітря.

Ключові висновки:

- **Цілісний підхід до ЯВП:** Якість внутрішнього повітря, тепловий комфорт та енергоефективність є взаємозалежними. Оптимізація одного аспекту без врахування інших може призвести до небажаних наслідків, таких як "синдром хворої будівлі" у герметичних, енергоефективних спорудах. Комплексне моделювання, що інтегрує тепло- та масоперенос, є вирішальним для досягнення збалансованих та здорових житлових середовищ.

- **Перехід до динамічної вентиляції:** Традиційні статичні норми вентиляції часто призводять до надмірного або недостатнього повітрообміну. Впровадження систем вентиляції, керованих за потребою (DCV), на основі даних датчиків CO₂ та інших забруднювачів, дозволяє динамічно регулювати потік повітря відповідно до фактичної зайнятості та потреб. Це не тільки покращує ЯВП, але й забезпечує значну економію енергії, що є критично важливим для досягнення цілей щодо нульового споживання енергії.

- **Значення детального моделювання:** У той час як загальні моделі енергії будівель надають макроскопічні оцінки, CFD-аналіз дозволяє отримати мікроскопічні деталі розподілу повітряних потоків, температури та забруднювачів усередині приміщень. Ця деталізація є життєво важливою для виявлення застійних зон, локальних гарячих точок забруднення та оптимізації розташування вентиляційних отворів, що забезпечує доставку свіжого повітря безпосередньо до зони дихання мешканців. Такі метрики, як середній вік повітря та ефективність повітрообміну, надають більш глибоке розуміння ефективності вентиляції, ніж проста кратність повітрообміну.

- **Роль провідного програмного забезпечення:** ANSYS Fluent, DesignBuilder та EnergyPlus є потужними інструментами, кожен з яких пропонує унікальні можливості для моделювання ЯВП. Fluent є лідером у детальному CFD-аналізі, DesignBuilder спрощує інтегроване моделювання енергії та ЯВП для відповідності стандартам, а EnergyPlus є основою для розробки розумних, адаптивних систем вентиляції, включаючи DCV та ко-симуляцію для комплексного аналізу забруднювачів.

- **Критична необхідність валідації:** Надійність симуляційних моделей безпосередньо залежить від їхньої валідації за допомогою реальних даних. Емпіричні методи, такі як тести з трасерними газами та "blower door", разом з числовими метриками (RMSE, R²), є незамінними для підтвердження точності моделей. Постійна валідація гарантує, що симуляційні інструменти надають надійні прогнози, які можуть бути використані для прийняття обґрунтованих проектних рішень.

Рекомендації:

1. Інтеграція моделювання на всіх етапах проектування:

Заохочувати архітекторів, інженерів та забудовників до використання передових інструментів моделювання (таких як ANSYS Fluent, DesignBuilder, EnergyPlus) на ранніх етапах проектування житлових будівель. Це дозволить ідентифікувати та усунути потенційні проблеми з ЯВП та енергоефективністю до початку будівництва.

2. Пріоритезація систем вентиляції, керованих за потребою (DCV):

Активно впроваджувати DCV-системи з датчиками CO₂ та інших забруднювачів у нових житлових будівлях та при модернізації існуючих. Це забезпечить динамічну оптимізацію повітрообміну, покращить ЯВП та значно зменшить споживання енергії.

3. Постійна валідація та моніторинг:

Розробити протоколи для регулярної валідації симуляційних моделей за допомогою даних моніторингу в реальному часі в експлуатованих будівлях. Це дозволить уточнювати моделі, підвищувати їхню точність та адаптувати стратегії вентиляції до фактичних умов.

4. Сприяння міждисциплінарній співпраці:

Заохочувати співпрацю між спеціалістами з будівельної фізики, інженерами ОВК, фахівцями з ЯВП та розробниками програмного забезпечення для створення більш комплексних та зручних рішень для моделювання.

5. Розробка регіональних баз даних:

Створити та підтримувати відкриті бази даних з емпіричними даними про ЯВП та енергоспоживання в житлових будівлях України. Це сприятиме валідації моделей та розробці специфічних для регіону рекомендацій та стандартів.

Застосування математичного моделювання та CFD-аналізу є не просто технічним інструментом, а стратегічним підходом до створення здорових, комфортних та стійких житлових просторів, що відповідають викликам сучасного енергоспоживання та екологічної безпеки.

**6. Інтеграція системи вентиляції зі змінною витратою , опалення на базі ТН,
кондиціонування, для досягнення необхідних параметрів в житловому
приміщенні**

6.1. Характеристика об'єкту будівництва та географічний пункт будівництва

Об'єктом проектування є двоповерховий будинок розташований у селі Чабани Київської області.

Географічна широта: 50° 24'

Барометричний тиск: 101,08 кПа

Характеристика	Значення
Загальна площа, м ²	601
Об'єм будівлі, м ³	1755

Таблиця 6.1. Основні характеристики будинку.

Розрахункові параметри зовнішнього повітря

Розрахункові параметри приймаємо згідно ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010 «Будівельна кліматологія» .

Період року	Температура t, °C	Ентальпія I, кДж/кг	Вологовміст d, г/кг	Відносна вологість φ, %
Теплий	28	70	16,45	69
Холодний	-22	-21	0,4	83

Розрахункові параметри внутрішнього повітря

Система кондиціонування підтримує оптимальні(допустимі) параметри повітря в приміщенні згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Температури внутрішнього повітря в приміщеннях будівлі прийняті згідно з ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» та ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення.» та наведені в експлікаційних таблицях приміщень далі в пояснювальній записці.

Розрахункові температури повітря у основних приміщеннях складають:

житлові приміщення – 20 °С ;

ванна кімната – 25 °С;

санвузол – 20 °С;

гараж – 5 °С;

бібліотека – 20 °С;

спортивна зала – 20 °С;

коридор – 16 °С;

кухня-їдальня – 20°С;

кабінет – 20°С.

Розрахунок системи опалення

Розрахунок тепловтрат

Розрахункові теплові втрати приміщення за рахунок теплопередачі через будівельні огороження $\Phi_{T,i}$, Вт, слід обчислювати за формулою, що наведена нижче і включає основні можливі варіанти влаштування приміщення

$$\Phi_{T,i} = (N_{T,ie} + N_{T,iue} + N_{T,ig} + N_{T,ij}) \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e), \text{ Вт} \quad (6.1)$$

де: HT_i – характеристика трансмісійних тепловтрат через огорожувальні конструкції приміщення назовні, Вт/°С; HT_{iue} – характеристика трансмісійних тепловтрат опалювального приміщення через неопалювальне приміщення назовні, Вт/°С; HT_{ig} – характеристика трансмісійних тепловтрат через огорожувальні конструкції приміщення у землю (грунт), Вт/°С; HT_{ij} – характеристика трансмісійних тепловтрат опалювального приміщення через огорожувальну конструкцію до суміжного опалювального приміщення із іншою розрахунковою температурою, Вт/°С.

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} + \Phi_{RH,i}, \text{ Вт} \quad (6.2)$$

де: $\Phi_{T,i}$ – трансмісійні тепловтрати через огорожувальні конструкції приміщення, Вт; $\Phi_{V,i}$ – вентиляційні тепловтрати на нагрівання інфільтраційного повітря, що надходить до приміщення, Вт; $\Phi_{RH,i}$ – додаткова компенсаційна теплова потужність для системи періодичного опалення, яка враховує ефект тимчасовості обігріву приміщення, Вт.

Таблиця 6.4.

Кліматологічні дані для холодного періоду року

Місто	Середня температура за рік $t_{зovн.р}$, С	Зона вологості	Температура <u>найхолоднішої доби</u> $t_{зovн.1}$, С	Температура <u>найхолоднішої п'ятиденки</u> $t_{зovн.5}$, С	Опалювальний сезон		Кількість градусо-днів $So.c$, гр.-днів	Кліматична зона
					Середня температура $t_{o.c}$, С	<u>Тривалість</u> $Zo.c$, днів		
Київ	8	Н	-26	-22	-0,1	176	3538	I

Напрямок і швидкість руху в січні

	Пн	ПнС	С	ПдС	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ
Повторюваність вітру, %	11,2	4,6	5,8	11,9	14,1	14,0	23,5	14,9
Швидкість вітру V, м/с	3,2	2,0	1,7	2,0	2,7	3,0	3,0	2,9
Коефіцієнт β_v	0	0	0	0	0	0	0	0

Розрахунок надходжень теплоти

Загальні тепло надходження складаються з :

$$\sum Q_{\text{над}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{со}} + Q_{\text{ог}} + Q_{\text{с.р.}}, \text{Вт} \quad (6.3)$$

Теплонадходження від людей:

$$Q_{\text{л, hf}} = \sum q_{\text{hfi}} \cdot n, \text{Вт} \quad (6.4)$$

де q_{hfi} – питома виділення однією людиною теплоти, Вт/люд;

n – число людей у приміщенні з даною інтенсивністю навантаження, люд.

Для кімнати домашнього відео кінотеатру:

$$\text{ТП: } Q_{\text{л, hf}} = 148 \cdot 10 = 1480 \text{ Вт};$$

$$\text{ХП: } Q_{\text{л, hf}} = 150 \cdot 10 = 1500 \text{ Вт}.$$

Теплонадходження від освітлення:

$$Q_{\text{осв}} = F \cdot E \cdot q_{\text{осв}} \cdot \eta_{\text{осв}}, \text{Вт} \quad (6.5)$$

E – освітленість, лк;

F – площа підлоги приміщення, яка освітлюється, м²;

$q_{\text{осв}}$ – питомі виділення теплоти, Вт/м² на 1лк освітленості, приймаємо для люмінесцентних ламп $q_{\text{осв}}=0,06$ Вт/м²;

$\eta_{\text{осв}}$ – коефіцієнт, який враховує надходження теплоти у робочу зону приміщення, $\eta_{\text{осв}}=0,55$.

Для кімнати домашнього відео кінотеатру:

$$Q_{\text{осв}} = 45,8 \cdot 200 \cdot 0,06 \cdot 0,55 = 302 \text{ Вт};$$

Теплонадходження від опалювальних приладів в режимі кондиціонування :

$$Q_{\text{со}} = Q_{\text{втр}} \frac{t_{\text{ср.оп}} - t_{\text{опт}}}{t_{\text{ср.оп}} - t_{\text{в.оп.}}}, \text{ Вт} \quad (6.6)$$

$Q_{\text{втр}}$ – тепловтрати в приміщенні, Вт;

$t_{\text{ср.оп}}$ – середня температура опалювального приладу:

$$t_{\text{ср.оп}} = \frac{t_{\text{п}} + t_{\text{з}}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (6.7)$$

$t_{\text{опт}}$ – температура повітря прийнята при кондиціонуванні повітря, $^\circ\text{C}$;

$t_{\text{в.оп.}}$ – розрахункова температура повітря в приміщенні, при розрахунку опалення, $^\circ\text{C}$;

$$t_{\text{ср.оп}} = \frac{90+70}{2} = 80^\circ\text{C};$$

Для кімнати домашнього відео кінотеатру:

$$Q_{\text{со}} = 2281 \frac{80-21}{80-20} = 2200 \text{ Вт};$$

Тепло надходження від огороджувальних конструкцій:

$$Q_o = k \cdot A \cdot (t_p - t_{\text{ext}}) \cdot n, \text{ Вт} \quad (6.8)$$
$$Q_o = A / R_{\text{пр}} \cdot (t_p - t_{\text{ext}}) \cdot n = K A \cdot (t_p - t_{\text{ext}}) \cdot n, \text{ Вт} \quad (6.9)$$

де A - розрахункова площа огороджувальних конструкцій, м²;

$R_{\text{пр}}$ – приведений опір теплопередачі огороджувальних конструкцій, м²· $^\circ\text{C}$ /Вт,

K – коефіцієнт теплопередачі огороджувальних конструкцій,

t_p - розрахункова температура повітря, °С, у приміщенні з урахуванням її підвищення по висоті;

t_{ext} - розрахункова температура зовнішнього повітря, °С;

Для кімнати домашнього відео кінотеатру:

$$Q_o = 0,3 \cdot 7,1 \cdot (26,7 - 21) = 10 \text{ Вт.}$$

Тепло надходження від сонячної радіації:

Якщо вся площа опромінюється прямою радіацією:

$$Q_o = q' \cdot F_o \cdot c + \frac{t_{ext} - t_b}{R_o} \cdot F_o, \text{ Вт} \quad (6.10)$$

$$q' = (q_{в.п.} + q_{в.р}) k_1 k_2 \quad (6.11)$$

$q_{в.п.}, q_{в.р}$ – тепло надходження відповідно від прямої і розсіяної сонячної радіації в липні через вертикальне застосування світлового прорізу, ккал/м²·год ;

k_1 - коефіцієнт, який враховує затінення світлового прорізу переплетами і забруднення навколишнього середовища;

k_2 – коефіцієнт, який враховує забруднення скла;

R_o - опір теплопередачі заповнення світлового прорізу, м²·год·°С/ккал;

c - коефіцієнт сонцезахисту;

F_o – площа світлових прорізів, м²;

t_{ext}, t_b - розрахункові температури відповідно зовнішнього і внутрішнього повітря, °С.

Для кімнати домашнього відео кінотеатру:

$$Q_o = \left((0 + 52) \cdot 0,68 \cdot 0,42 \cdot 0,9 + \frac{26,7 - 21}{0,4} \cdot 0,42 \right) \cdot 2 \cdot 1,163 = 40 \text{ Вт};$$

Розрахунок тепло надходжень для приміщень робимо у табличному вигляді.

Період року				ТП			ХП		
№ прим	Найменування	Кі лк лю дей, чол.	Пл о ща пр им ,м ²	Теп лон ад. від люд ей Q _л , Вт	Тепл онад чер ез огор .кон стр. Q _{ог} , Вт	Тепло над. від соняч ної радіац ії Q _{с.р.} , Вт	Тепло над. від штуч. освітл. Q _{осв.} , Вт	Тепло над. від оп.пр. в режим і кондиц і Q _{со} , Вт	Тепл онад ход. від люде й Q _л , Вт
002	Кімната дом. <u>відеокінотеатру</u>	10	45, 8	1480	10	40	300	2200	1500
003	Спортивна зала	5	50	1000	40	70	330	3410	1030
004	Кімната відпочинку	3	26, 3	450	20	460	180	1730	450
104	Вітальня	5	80, 9	740	90	310	540	5930	750
108	Кухня-їдальня	3	26, 3	450	40	560	180	2270	450
110	Сауна	5	25, 6	740	220	180	170	4180	750
201	Кабінет	2	33, 1	300	70	1540	220	2400	300
204	Житлова кімната	2	26, 2	300	30	500	180	1540	300
205	Бібліотека	2	32, 4	300	140	270	220	2340	300
206	Житлова кімната	2	23, 4	300	140	290	150	2100	300
210	Оранжерея	2	9,4	300	50	510	60	1380	300
301	Кабінет	2	33, 1	300	120	580	220	2320	300

Таблиця 6.6. Теплонадходження приміщень.

Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$\Delta Q = Q_{\text{над}} - Q_{\text{втр}}; \quad (6.12)$$

Для кожного приміщення складаємо рівняння теплового балансу для теплого і холодного періоду року.

$$\Delta Q^{\text{ТП}} = 1530 \text{ Вт};$$

$$\Delta Q^{\text{ХП}} = 4000 - 2280 = 1720 \text{ Вт};$$

6.2. Обґрунтування інженерних рішень для котеджу: Опалення, Вентиляція та Кондиціонування

6.2.1. Система опалення: Ефективність та комфорт

У цьому котеджі застосовано двотрубну горизонтальну тупикову систему водяного опалення з попутним рухом теплоносія та нижнім розведенням магістральних трубопроводів. Параметри теплоносія встановлені на рівні 90-70 °С. Система підключається до котла за допомогою циркуляційних насосів.

Вибір горизонтальної поквартирної системи опалення для нового будівництва обґрунтований кількома ключовими перевагами:

Естетика та простір: Горизонтальні ділянки трубопроводів можна прокладати в підлозі або використовувати плінтусний варіант, що забезпечує естетичний вигляд та кращі санітарно-гігієнічні умови.

Індивідуальне регулювання: Система дозволяє регулювати кількість тепла, що надходить до кожного приміщення, за допомогою термостатичних клапанів, забезпечуючи максимальний комфорт та енергозбереження.

Економічна ефективність: Двотрубна система вигідно відрізняється від однокотрубних за економічними показниками, зменшуючи річну витрату теплоти на 10-15%. Постійний перепад температур води в кожному опалювальному приладі та однакова середня температура води в двотрубному стояку сприяють оптимальній роботі.

Технічні переваги: Обмежене число проходів через перекриття, повне використання тепловіддачі трубопроводів (що зменшує необхідний об'єм опалювальних приладів), більша кількість можливих для встановлення опалювальних приладів порівняно з однотрубними системами. Значно нижчі втрати тиску порівняно з однотрубними системами. Спрощена схема гідравлічного розрахунку при попутному русі теплоносія. Можливість відключення окремих приладових гілок для обслуговування або ремонту.

Техніко-економічні показники прийнятої схеми опалення забезпечують:

Максимальне енергозбереження: Досягається до 25% економії енергії порівняно з нерегульованими системами завдяки кращому тепловому регулюванню за допомогою радіаторних термостатів.

Високий температурний напір: Перепад температур води в 90-70°C забезпечує ефективний тепловий потік від опалювальних приладів.

Простота обслуговування: Можливість відключення приладових гілок спрощує регламентні, ремонтні та експлуатаційні роботи.

Гнучке регулювання: Можливість контролю та гнучкого регулювання температури, особливо при відсутності використання приміщення.

Опалювальні прилади: Надійність та універсальність

Для системи опалення обрані сталеві панельні радіатори "RADIK VENTIL КОМПАКТ" виробництва "KORADO". Ці радіатори ідеально підходять для житлових, громадських та адміністративних будівель із закритими системами опалення. Вони можуть використовуватися як з вертикальним, так і з горизонтальним розміщенням приладових гілок, а також у насосних, елеваторних та гравітаційних системах. Радіатори витримують робочий тиск до 1,35 МПа. Підводка трубопроводів до опалювальних приладів здійснюється знизу, за допомогою модифікації з вбудованим вентилем "RADIK VK".

Запірна та регулююча арматура: Автоматизація та безпека

Для автоматичного регулювання системи опалення та відключення окремих її частин у випадку аварії або ремонту передбачена спеціальна арматура:

Автоматичні регулятори перепаду тиску: ASV-PV+MSV-F та STAP F40-160.

Терморегулятори: Вбудовані в радіатори для автоматичного підтримання заданої температури в приміщеннях.

Термостатичні головки: "Danfoss" RAW-K5030, встановлені в горизонтальній площині на підводках до опалювальних приладів.

Крани Маєвського: Передбачені на кожному опалювальному приладі для видалення повітря. Трубопроводи системи опалення та їх прокладання: Оптимальні матеріали. Приладові гілки: Для горизонтальної прокладки в заливних підлогах використовуються поліетиленові трубопроводи LPET-ZAC з антидифузійним шаром фірми "KAN". Магістральні трубопроводи: Використовуються сталеві електрозварні труби (ГОСТ 10704-76).

Теплові подовження: Компенсація теплових подовжень трубопроводів, прокладених у підлозі, здійснюється за рахунок кутів повороту.

Прокладання: Трубопроводи в коридорах прокладаються у підвісній стелі, а магістральні вертикальні трубопроводи зашиваються гіпсокартоном у формі декоративних колон.

Тепла підлога: Для системи підлогового опалення застосовуються поліетиленові труби фірми "KAN" LPE-SR.

Джерело теплової енергії: Газовий котел. У приміщенні котельні на цокольному поверсі встановлюється газовий котел, який забезпечує необхідні параметри для систем опалення та вентиляції.

Циркуляційні насоси: Енергоефективність. Використання циркуляційних насосів фірми Wilo зі змінною кількістю обертів дозволяє реалізувати кількісне та якісне регулювання системи опалення. Насоси змінної частоти обертання підтримують стабільні перепади тиску, забезпечуючи гідравлічну та теплову стійкість системи, а також заощаджуючи до 70% електричної та 40% теплової енергії.

6.2.1. Система вентиляція, розрахунок та підбір обладнання

VAV-система																		
№	Назва приміщення	Кількість людей в приміщенні	L _{max} , м ³ /h	L _{max} , м ³ /h	Кількість клапанів на приміщення		Швидкість в VAV клапані, м/с (L _{max})		Швидкість в повітропроводі та в-ть підключення, м/с (L _{max})				Площа живого перерізу, F м ² для 20 на 1 м =	v _{min} , м/с	v _{max} , м/с	Довжина l, мм	Trox /Look	
					n	L _{max} , м ³ /h	d, м	v _{max}	d, м	n	v _{min} , м/с	v _{max} , м/с						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
104	Спортзал	2	18	120	2	60	0,09	2,62	0,0633	3	0,54	3,53	0,0135	0,38	2,47	1000	LOOK20	
105	Кухня-вітальня	7	37	240	4	60	0,09	2,62	0,0633	6	0,54	3,53	0,0135	0,38	2,47	2000	LOOK20	
106	Спальня	1,5	9	60	1	60	0,09	2,62	0,0633	2	0,41	2,65	0,0135	0,38	2,47	500	LOOK20	
111	Зеройна кімната	1	9	60	1	60	0,09	2,62	0,0633	2	0,41	2,65	0,0135	0,38	2,47	500	LOOK20	
Σ			74	480	8	15				13						4000		
211	Кухня-вітальня	4	80	240	4	60	0,09	2,62	0,0633	6	1,18	3,53	0,03	0,67	2,02	1100	TROX ALS25P-2	
208	Гостьова кімната	1,5	20	90	1	90	0,09	3,93	0,0633	2	0,88	3,97	0,0135	0,55	2,47	750	LOOK20	
207	Кабінет-бібліотека	1	20	60	1	60	0,09	2,62	0,0633	2	0,88	2,65	0,0135	0,82	2,47	500	LOOK20	
Σ			120	390	6	20,00				10						2350		
302	Спальня дорослих	2	28	150	3	50	0,09	2,18	0,0633	4	0,61	3,31	0,0135	0,44	2,37	1300	LOOK40	
306	Дитяча №2	1,5	9	90	1	90	0,09	3,93	0,0633	2	0,41	3,97	0,0223	0,26	2,49	450	LOOK40	
307	Дитяча №1	1,5	9	90	1	90	0,09	3,93	0,0633	2	0,41	3,97	0,0135	0,24	2,31	800	LOOK20	
Σ			46	330	5					8						2550		
Futura L1			120	390	6	20,00				10								
Futura L2			120	810	13	9,23				21								

№	Назва приміщення	Площа прим.	Висота прим.	Об'єм прим.	Розрахункова витрата	L _{max} , м ³ /h	Приблизна витрата L _{max} , м ³ /h	Кількість клапанів на приміщення		Швидкість в VAV клапані, м/с (L _{max})		Швидкість в повітропроводі та в-ть підключення, м/с (L _{max})				Площа живого перерізу, F м ² для 20 на 1 м = 0,0135	v _{min} , м/с	v _{max} , м/с	Довжина l, мм	Trox /Look
								n	L _{max} , м ³ /h	d, м	v _{max}	d, м	n	v _{min} , м/с	v _{max} , м/с					
1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
104	Спортзал	18,3	3,1	57,3	171,97	30,0	160	2	80	0,09	3,49	0,0633	4	0,66	3,53	0,0135	0,47	2,53	1300	
105	Кухня-вітальня	25,2	3,1	78,9	118,32	30,0	100	2	50	0,09	2,18	0,0633	3	0,88	2,94	0,0135	0,62	2,06	1000	
Σ					60,0	260	4	30					7					2300		
211	Кухня-вітальня	62,22	3	186,66	279,99	28	140	3	47	0,09	2,04	0,1	3	0,33	1,65	0,03	0,43	2,16	600	
102	Санузел	5,2	3,2	16,4	-	9,2	55	1	55	0,09	2,40	0,0633	2	0,41	2,43	0,0135	0,38	2,26	500	
103	Кладова	7,3	3,1	22,9	34,31	9,2	35	1	35	0,09	1,53	0,0633	1	0,82	3,09	0,0135	0,63	2,40	300	
107	Кладова	17,2	3,1	54,2	27,10	9,2	25	1	25	0,09	1,09	0,0633	1	0,82	2,21	0,0135	0,76	2,06	250	
108	Електрошитова	3,2	3,1	10,1	5,07	9,2	15	1	15	0,09	0,66	0,0633	1	0,82	1,32	0,0135	1,27	2,06	150	
112	Розділочна	4,4	3,1	13,8	20,77	9,2	25	1	25	0,09	1,09	0,0633	1	0,82	2,21	0,0135	0,76	2,06	250	
110	Пральня	9,2	3,1	29,0	14,51	9,2	20	1	20	0,09	0,87	0,0633	1	0,82	1,77	0,0135	0,95	2,06	200	
205	Гардероб	6,9	3	20,7	31,05	9	35	1	35	0,09	1,53	0,0633	1	0,82	3,09	0,0135	0,63	2,40	300	
203	Санузел гостьовий	6,12	3	18,36	27,54	9	65	1	65	0,09	2,84	0,0633	2	0,41	2,87	0,0135	0,32	2,23	600	
210	Купонна кладова	3,11	3	9,33	14,00	9	15	1	15	0,09	0,66	0,0633	1	0,82	1,32	0,0135	1,27	2,06	150	
209	Гардероб гостьовий	4,24	3	12,72	19,08	9	20	1	20	0,09	0,87	0,0633	1	0,82	1,77	0,0135	0,95	2,06	200	
Σ					120	450	13						15					3300		
303	Ванна кімната	12,6	3,0	37,9	56,88	15,0	65	1	65	0,09	2,84	0,0633	2	0,66	2,87	0,0135	0,51	2,23	600	
304	Гардероб	15,9	3,0	47,6	71,37	15,0	50	1	50	0,09	2,18	0,0633	2	0,66	2,21	0,0135	0,62	2,06	500	
305	Санузел дитячий	6,2	3,0	18,7	28,04	15,0	55	1	55	0,09	2,40	0,0633	2	0,66	2,43	0,0135	0,56	2,06	550	
308	Гардероб	4,4	3,0	13,2	19,85	15,0	20	1	20	0,09	0,87	0,0633	1	1,32	1,77	0,0135	1,54	2,06	200	

Таблиця 6.6. Аеродинамічний розрахнок VAV системи

Будівлю також обслуговують 2 припливно-витяжні системи разом з охолодженням припливного повітря в теплий період року та й за допомогою компресорно-конденсаторних блоків (рис.4.1., рис.4.2., рис. 4.3.) 1 припливна система та 10 витяжних систем, що обслуговують наші санітарні вузли.[18]

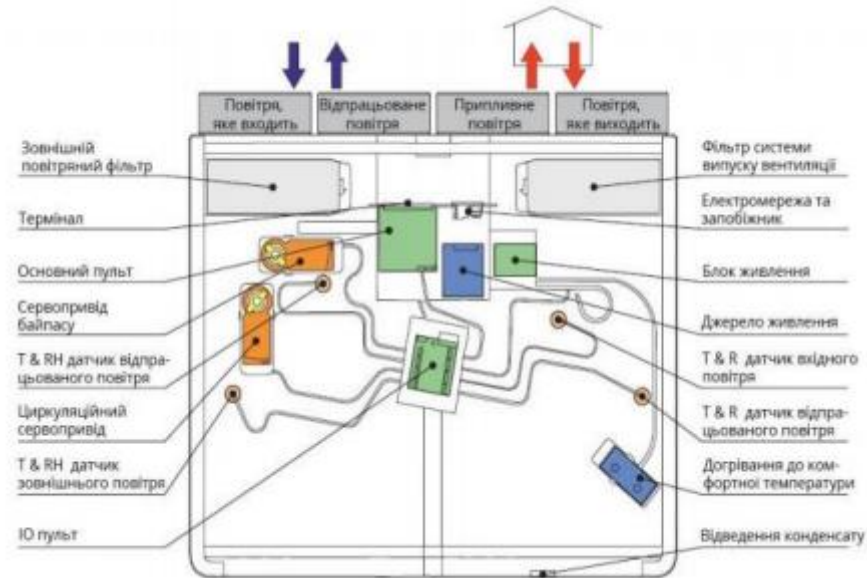


Рис. 6.1. Припливно-витяжна установка типу Jablotron

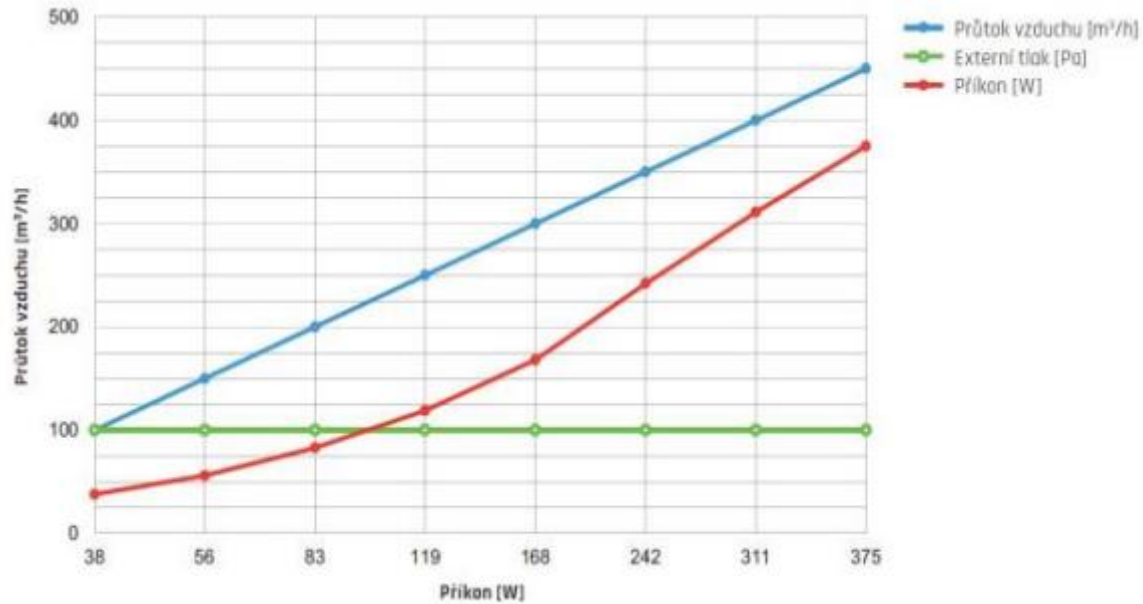


Рис. 6.2. Процес обробки повітря в ПВУ Jablotron



Рис. 6.3. Припливно-витяжна установка Jablotron Futura L

Основні розміри, включаючи внутрішній блок CoolBreeze

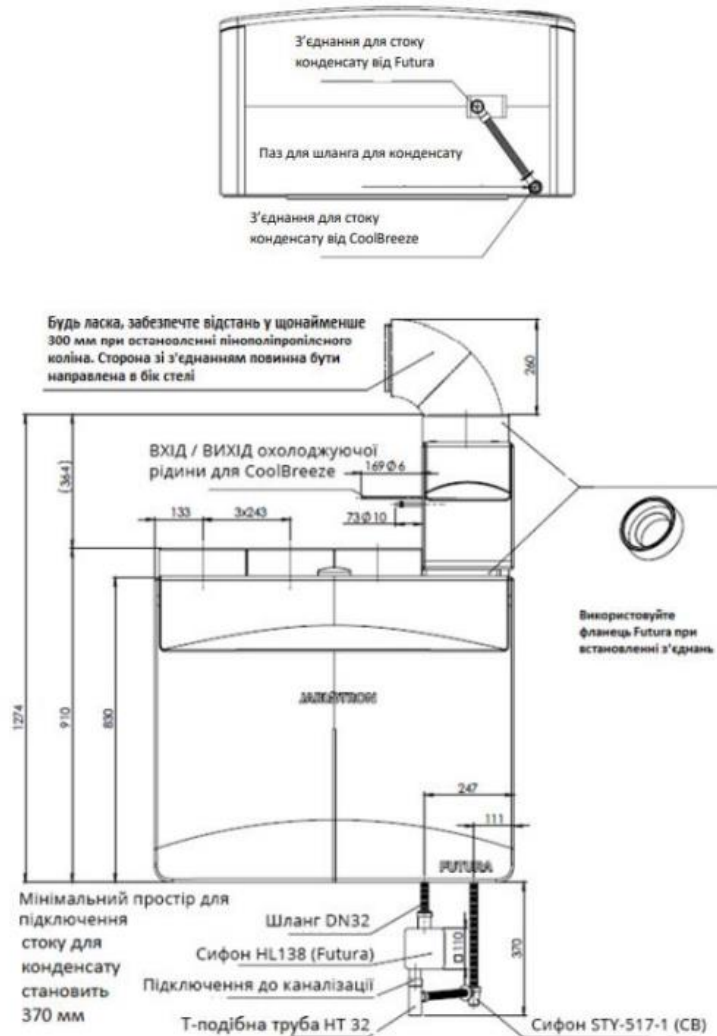
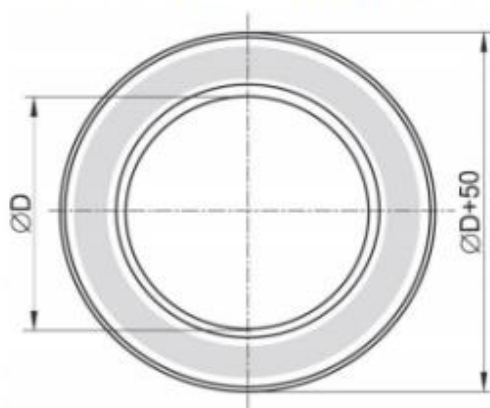


Рис. 6.5 Габаритні розміри ПВУJablotron

Для того аби захиститись від шуму усі системи також обладнані шумогасниками. Повітропроводи прокладені в ізоляції. Після теплообмінника йдуть припливні повітропроводи які ізолюються ізоляцією з спіненого каучуку товщиною приблизно 10 мм, а в свою чергу забір повітря до установки ізолюється матеріалами марки k-Flex 10 мм та Ізовером 50 мм, викид повітря після ізолюється матеріалами марки: k-Flex 10 мм й Ізовером 100 мм.

Характеристика

Гнучкий, утеплений шланг, що складається з декількох шарів поліпропіленової тканини, із теплоізолювальною та звукоізолювальною скляною ватою, із зовнішньою алюмінієвою ламінованою обгорткою. SONOTEX можна підключити до овальних і круглих з'єднань і використовувати у вентиляції, а також в системах кондиціонування та вентиляції.



Технічні параметри

Товщина ізоляції 25 мм $R = 0,65$ [м²К / Вт]

Мінімальна температура -30°C

Максимальна температура +140 °C

Робочий тиск -188 до +2500 Па

Робоча швидкість макс. 25 м / с

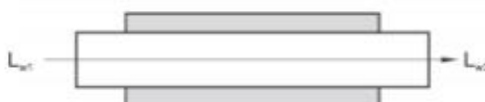
Радіус вигину 82 - 406 мм

Стандартний діаметр D Ø 150 мм

Стандартна довжина 10 м

Ослаблення шуму в трубопроводах [дБ] для трубопроводів 1м і 3м. Точність вимірювання в діапазонах нижчих октав становить 2 дБ, у діапазонах вищих октав - 1 дБ.

$L_{вх} - L_{вс}$ (дБ)



Діаметр (мм)	Довжина (м)	Частота (Гц)	125	250	500	1000	2000	4000
150	1		10,9	29,7	30,1	29,0	38,3	34,6
180	3		29,0	36,8	32,6	32,7	40,6	43,4

Рис. 6.6 Характеристика Sonotex

Фреоноводи, що з'єднують ККБ й припливні установки прокладаються в ізоляції приблизно 9 мм. Відведення дренажу від даних установок разом з охолодженням здійснюється з ухилом два см на один м до системи водовідведення разом з розривом струмини. За погодженням в службі нагляду замовника також можливе виведення дренажу до даної зливової каналізації. Усі проходки труб крізь несучі конструкції нашої будівлі мають здійснюватися у гільзах.

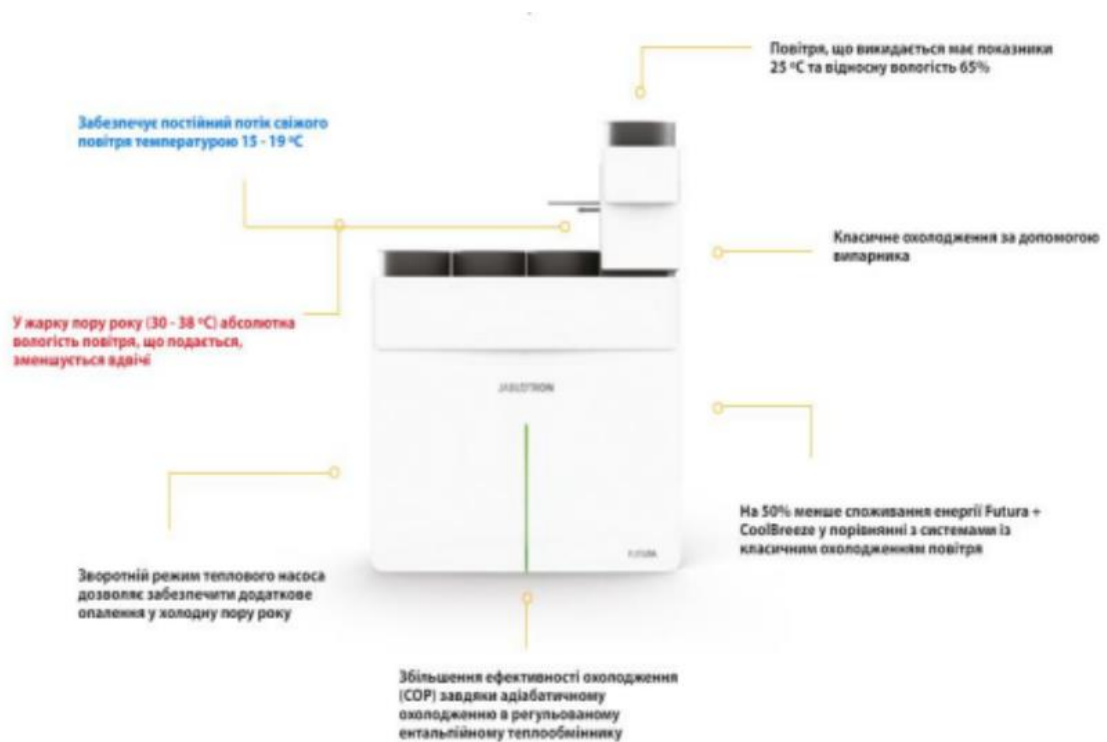


Рис. 6.7. Структура Модулю для охолодження та обігріву CoolBreeze

Модуль CoolBreeze має складатися із теплового насоса разом з теплообмінником та й розташованим у вентиляційній системі. Він повинен забезпечувати нагрівання або охолодження свіжого повітря, яке подається до цього приміщення.

Під час літньої спеки модуль CoolBreeze разом із вентиляційною установкою разом з рекуперацією тепла Jablotron Futura забезпечать те що:

1. Відчутне охолодження й зниження рівня вологості свіжого повітря, яке запобігає теплопритокам через дану систему вентиляції й підтримує

комфортну температуру в приміщенні.

2. Низьке енергоспоживання модуля разом із урахуванням ефективності охолодження й осушення свіжого повітря яке подається.

Наше технічно унікальне рішення використовує таку комбінацію (I) звичайного охолодження випарником й (II) адіабатичного охолодження таким шляхом випаровування конденсату у контрольованому ентальпійному теплообміннику.

Енергоефективному нашого будинку. Це буде дуже ефективний спосіб для обігріву, а особливо в поєднанні разом із додатковим електричним променевим нагріванням (гаряча вода або прямий нагрів).

Саме тому комбінація марок Futura і CoolBreeze дозволяє нам досягти аналогічних показників, як і звичайновживані охолоджуючі пристрої, однак при цьому наш пристрій набагато менший й тихіший та доступніший за ціною.

Саме такі наші дані доводять до того, що CoolBreeze може практично повністю нам замінити потребу у кондиціонуванні повітря у будинках із низьким енергоспоживанням.

У зворотному же режимі CoolBreeze має змогу покрити приблизно 50-70% потреби в опаленні.

Установки мають бути розташовані на цокольному й першому та п'ятому поверхах відповідно до існуючого технічного завдання замовника.

Компресорно-конденсаторні блоки які розташовані з північно-західного боку будівлі на спеціальних підставках які розробляються генпідрядником з урахуванням до вимог нашого виробника.

Список літератури

1. ASHRAE. (2022). *ANSI/ASHRAE Standards 62.1 and 62.2: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
2. ДБН В.2.2-15:2019. (2019). *Житлові будинки. Основні положення*. (https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2019/08/DBN_V-2-2-15-2019.pdf)
3. ДБН В.2.5-67:2013. (2013). *Опалення, вентиляція та кондиціонування*. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074971619479783152
4. ДСТУ Б EN 15251:2011. (2011). *Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики*. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50154
5. WHO. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/260127/9789289002134-eng.pdf>
6. WHO. (2021). *WHO Air Quality Guidelines*. (https://www.c40knowledgehub.org/s/article/WHO-Air-Quality-Guidelines?language=en_US)
7. Chen, J., et al. (2024). *Humans are the primary sources of CO₂ and NH₃ indoors. Their emission rates may be influenced by human physiological and psychological status*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10832055/>
8. Giraldo-Soto, C., et al. (2023). *What were the findings of the case studies on indoor air quality improvement using IoT and behavioral change, specifically regarding changes in PM_{2.5} and PM₁₀ levels and window opening hours?*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10098860/>
9. Li, Y., et al. (2021). *Emission rate of carbon dioxide while sleeping*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34337798/>

10. Liu, Y., et al. (2016). *Computational fluid dynamics simulation of carbon dioxide dispersion in a complex environment*. https://www.researchgate.net/publication/291422874_Computational_fluid_dynamics_simulation_of_carbon_dioxide_dispersion_in_a_complex_environment
11. NREL. (2020). *Demand control ventilation (DCV) can save energy by reducing the rate at which outdoor air is delivered during periods of less-than-design occupancy*. <https://docs.nrel.gov/docs/fy20osti/76087.pdf>
12. PNNL. (2011). *The results from detailed simulation analysis show significant energy (24% to 35%) and cost savings (38%) from fan, cooling and heating energy consumption when packaged units are retrofitted with advanced control packages*. https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-20955.pdf
13. Rosén, L., et al. (2004). *Demand controlled ventilation: A case study for existing Swedish multifamily buildings*. (https://www.researchgate.net/publication/223177365_Demand_controlled_ventilation_A_case_study_for_existing_Swedish_multifamily_buildings)
14. Söderström, M., et al. (2023). *DCV systems can be based on detected levels of i.e., relative humidity (RH), carbon dioxide (CO₂), and volatile organic compounds (VOC) and it is valuable to understand what parameters that are most significant for the control*. (<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1792575/FULLTEXT01.pdf>)
15. Yagüe, J., et al. (2023). *A Case Study of Empirical Validation of EnergyPlus Infiltration Models Based on Different Wind Data*. (https://www.researchgate.net/publication/368521864_A_Case_Study_of_Empirical_Validation_of_EnergyPlus_Infiltration_Models_Based_on_Different_Wind_Data)
16. A Bioclimática. (n.d.). *Thermal Comfort: Understanding Metrics and Tools*. <https://abioclimatica.com/en/thermal-comfort-understanding-metrics-and-tools/>
17. Air King. (n.d.). *ASHRAE 62.2 residential ventilation calculation examples*. <https://www.airkinglimited.com/ashrae-62-2/>
18. Alter Air. (n.d.). *Мікроклімат приміщень*. <https://alterair.ua/stati/mikroklimat-pomeshcheniy/>

19. ANSYS. (n.d.). *Ansys Fluent Helps Make Better, Faster Decisions Through Innovation*. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
20. Atmotube. (n.d.). *Indoor Air Quality Index - IAQI*. <https://atmotube.com/blog/indoor-air-quality-index-iaqi>
21. CO2Meter.com. (n.d.). *Carbon Dioxide Indoor Levels Chart*. <https://www.co2meter.com/blogs/news/carbon-dioxide-indoor-levels-chart>
22. DesignBuilder. (n.d.). *DesignBuilder Online Learning Materials*. <https://designbuilder.co.uk/35-support/tutorials/96-designbuilder-online-learning-materials>
23. EnergyPlus. (n.d.). *EnergyPlus™ is a whole building energy simulation program*. <https://energyplus.net/>
24. Fixr.com. (n.d.). *Ventilation System Cost | Cost to Install Ventilation*. <https://www.fixr.com/costs/ventilation-installation>
25. Fresh-r. (n.d.). *Fresh-r HRV Decentralized Smart HRV Systems at Small Planet Supply*. <https://www.smallplanetsupply.com/freshr-hrvs>
26. Healthy Buildings. (n.d.). *CO₂ Concentration Calculator*. <https://healthybuildings.hsph.harvard.edu/tools/co2-calculator/>
27. iO HVAC Controls. (n.d.). *iO HVAC CO₂ Controller; Temperature and Humidity Monitor And Controller CO₂-TH*. <https://iohvaccontrols.com/product/co2-th/>
28. Provent. (n.d.). *Визначення необхідного повітрообміну приміщень*. https://dbn.co.ua/publ/viznachennja_neobkhidnogo_povitroobminu_primishhen/35-1-0-1212
29. Trackpac. (n.d.). *The Ultimate Guide to Indoor Air Quality Monitoring in 2025*. <https://trackpac.io/blog/the-ultimate-guide-to-indoor-air-quality-monitoring/>
30. Vents US. (n.d.). *Series Vents CO₂*. <https://vents-us.com/series/co2-vus/>