



# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад. І.С.Гулого  
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 142 Енергетичне машинобудування  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Холодильні техніка та технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ТЕХТ**

проф. Петренко В.П.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

**Остапенка Дмитра Ігоровича**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи:** Розрахунок теплового навантаження та енергоефективний вибір системи охолодження серверного приміщення у м.Київ.

**керівник роботи:** Грищенко Роман Володимирович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 17.09.2025 року № 712-кс

2. **Строк подання здобувачем роботи:** 05.12.2025

3. **Вихідні дані до роботи:** Тип приміщення – серверне приміщення ЛАЦ мобільного оператора; Тип обладнання – телекомунікаційні та серверні шафи; Тип системи охолодження – прецизійне кондиціонування повітря; Кількість прецизійних кондиціонерів – 3 шт. (Uniflair, модульного типу); Система повітророзподілу – верхня подача повітря з кондиціонерів та фронтальний забір без ізоляції гарячих/холодних коридорів;

4. **Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):**

Вступ

1. Аналітичний огляд літератури

2. Технологічний розділ (Аналіз тепловиділень в приміщенні ЛАЦ)

3. Теоретичні основи CFD-моделювання та початкові налаштування

4. Результати CFD-моделювання повітряних потоків в середовищі Ansys CFX

5. Порівняльний аналіз результатів аудиту та чисельного моделювання (CFD)

6. Висновки

7. Охорона праці

Список використаних джерел

5. **Перелік графічного матеріалу**

1. План ЛАЦ

2. Презентація Power Point (слайди)



# Acknowledgement

The completion of this Master's thesis marks an important milestone in my academic and professional journey, and I wish to express my sincere gratitude to all those who have contributed to its realization.

First and foremost, I extend my deepest appreciation to my supervisor, Associate Professor **Roman Gryshchenko**, whose profound expertise, constructive advice, and invaluable guidance have played a decisive role in shaping this work. His unwavering support, patience, and encouragement provided me with both direction and inspiration throughout the entire research process.

I would also like to acknowledge the role of the **knowledge and competencies acquired during my studies at the university**, which have served not only as a theoretical foundation but also as practical instruments in my engineering career. On numerous occasions, I have drawn upon the skills and insights gained during my academic training to solve real-world engineering challenges. This synergy between education and practice has greatly enriched my professional growth and reaffirmed the importance of continuous learning.

With heartfelt gratitude, I wish to thank my **wife** for her constant support, understanding, and encouragement. Her patience, faith, and motivation gave me the strength to persevere through the most challenging moments of this journey. Without her unwavering belief in my abilities, the successful completion of this work would not have been possible.

Finally, I would like to extend my appreciation to all colleagues, friends, and everyone who, in one way or another, provided advice, assistance, or simply words of encouragement during the preparation of this thesis. Each contribution, whether big or small, has been invaluable.

To all of you, I express my deepest respect and sincere gratitude. Your support has been instrumental in enabling me to complete this stage of my academic and professional path.

## Зміст

Анотація .....	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ..	14
Вступ.....	17
1. Аналітичний огляд літератури.....	19
1.1.Історичний розвиток систем охолодження серверних приміщень .....	20
1.2.Енергоефективність систем охолодження та показники їх оцінки.....	21
1.3.Термодинамічні виклики та теплофізичні аспекти розподілу тепла .....	22
1.3.1. Рівняння теплового балансу .....	22
1.3.2. Аналіз методів ізоляції повітряних потоків (Containment) .....	23
1.4.Узгодження джерела та споживача холоду .....	24
1.5. Аналіз наявних аудитів та світової практики застосування CFD .....	25
1.5.1. Огляд дослідження Huang J. та співавт. (2019): Моделювання систем охолодження.....	25
1.5.2. Аудит та дослідження Zhang X. (2017): Енергоспоживання ІТ-залів .....	26
1.6. Результати аналізу.....	26
2. Технологічний розділ.....	28
2.1. Аналіз тепловиділень в приміщенні ЛАЦ .....	28
2.2. Системи кондиціонування.....	36
2.3.Аналіз температурних показників та показників відносної вологості повітря в приміщенні ЛАЦ .....	39
2.4. Рекомендації отримані в результаті аудиту.....	45
3. Теоретичні основи CFD-моделювання та початкові налаштування моделі ЛАЦ .....	52
3.1.Порівняльний аналіз Ansys CFX та Fluent для задач моделювання ЛАЦ.....	52
3.2. Основні керуючі рівняння та моделі турбулентності.....	53
3.2.1. Основні рівняння неперервності та їх роль у моделюванні ЛАЦ.....	53

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Остапенко Д.І.			Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Грищенко Р.В.			5	88		
Н. контр.					Зміст			
Затверд.					ХМ – 2– 7М			

3.2.2. Рівняння руху (Нав'є–Стокса) як основа для відтворення потоків у холодному та гарячому коридорах .....	54
3.2.3. Турбулентність у ЛАЦ і необхідність повної системи $k-\epsilon$ .....	55
3.2.4. Модель SST як точніший підхід у критичних ділянках .....	56
3.2.5. Математика деформування сітки та її роль у моделюванні ЛАЦ .....	58
3.3. Параметризація задачі та налаштування фізики процесу в середовищі ANSYS CFX .....	58
4. Результати CFD-моделювання повітряних потоків в середовищі Ansys CFX ...	67
5. Порівняльний аналіз результатів аудиту та чисельного моделювання (CFD) ЛАЦ .....	72
6. Висновки .....	75
7. ОХОРОНА ПРАЦІ .....	77
7.1. Загальні положення .....	77
7.2. Вимоги безпеки перед початком роботи .....	78
7.3. Вимоги безпеки під час виконання роботи .....	79
7.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи .....	81
7.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях .....	81
Список використаних джерел .....	83
Додатки .....	86

## Анотація

Магістерська робота присвячена комплексному дослідженню тепловиділень у приміщенні лінійно-апаратного цеху (ЛАЦ) дата-центру та визначенню ефективних інженерних рішень для усунення локальних перегрівів.

У роботі виконано детальний аналіз впливу конфігурації приміщення, організації повітряних потоків на розподіл температурних полів. Проведено оцінку ефективності різних схем організації повітряного обміну, включно з традиційними та сучасними рішеннями, що передбачають зонування повітряних потоків і використання «холодних» та «гарячих» коридорів.

Особливу увагу приділено аналізу виникнення локальних перегрівів, що можуть призводити до зниження продуктивності або відмови обладнання, а також розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності системи холодопостачання. Запропоновані технічні рішення спрямовані на оптимізацію повітророзподілу, зменшення енергетичних витрат і стабілізацію мікроклімату у приміщенні ЛАЦ.

Результати дослідження підтверджують, що застосування системного підходу до аналізу теплових процесів у поєднанні з точними інженерними розрахунками дає змогу не лише своєчасно виявляти проблемні ділянки, але й підвищувати загальну ефективність та надійність функціонування дата-центру.

### Актуальність дослідження

Зі стрімким розвитком цифрових технологій та ущільненням розміщення серверного обладнання, проблема ефективного відведення тепла у дата-центрах та лінійно-апаратних цехах (ЛАЦ) набуває критичного значення. На практиці часто виникає парадокс, коли сумарна холодопродуктивність значно перевищує тепловиділення, але обладнання продовжує перегріватися через неефективний розподіл повітряних потоків, змішування холодного та гарячого повітря та

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Остапенко Д.І.				Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Грищенко Р.В.					7	88		
					Анотація					
Н. контр.								ХМ – 2– 7М		
Затверд.										

утворення зон турбулентності. Традиційні методи проектування та аудиту не дозволяють повною мірою виявити та усунути ці аеродинамічні проблеми.

У зв'язку з цим, актуальним є застосування комплексного підходу, що поєднує інструментальний аудит із чисельним моделюванням (CFD). Такий підхід дозволяє створити «цифровий двійник» приміщення, візуалізувати рух повітряних мас, виявити приховані зони застою тепла та розробити точкові інженерні рішення (ізоляція коридорів, переорієнтація потоків) для модернізації існуючих систем. Це дозволяє досягти реального підвищення енергоефективності та зниження коефіцієнта PUE без необхідності повної заміни дороговартісного кліматичного обладнання.

### **Мета дослідження**

Метою роботи є підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності системи холодопостачання лінійно-апаратного цеху (ЛАЦ) мобільного оператора. Це досягається шляхом верифікації даних інструментального аудиту результатами CFD-моделювання повітряних потоків, що дозволяє виявити приховані аеродинамічні вади, ліквідувати зони локального перегріву обладнання та оптимізувати схему повітророзподілу без повної заміни обладнання.

### **Завдання дослідження**

- Виконати аналіз тепловиділень від існуючого технологічного обладнання та розрахувати фактичний тепловий баланс приміщення ЛАЦ.
- Провести аналіз інструментального аудиту параметрів мікроклімату та тепловізійного обстеження рядів обладнання для виявлення зон локального перегріву.
- Побудувати модель (CFD) розподілу повітряних потоків у приміщенні та верифікувати її за результатами експериментальних вимірювань.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						8
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- Виявити аеродинамічні причини неефективності існуючої системи охолодження (зони застою, змішування потоків, рециркуляція) шляхом аналізу полів швидкостей та тиску .

- Розробити та обґрунтувати комплекс інженерних рішень для усунення перегрівів без повної заміни кондиціонерів .

### **Об'єкт дослідження**

Процеси тепломасообміну та формування полів температур і швидкостей повітря в технологічному приміщенні лінійно-апаратного цеху насиченої серверної інфраструктури.

### **Предмет дослідження**

Методи оптимізації аеродинаміки повітряних потоків та підвищення енергоефективності систем прецизійного кондиціонування з використанням інструментального аудиту та чисельного моделювання (CFD).

### **Наукова новизна**

Удосконалено методику діагностики систем охолодження дата-центрів шляхом комплексування даних тепловізійного контролю з результатами математичного моделювання аеродинаміки, що дозволило ідентифікувати приховані зони рециркуляції повітря. Дістало подальший розвиток обґрунтування ефективності зонування («холодні»/«гарячі» коридори) для приміщень зі змішаним типом обладнання та нерівномірним тепловим навантаженням. Встановлено залежність між геометричною конфігурацією забору повітря кондиціонерами та виникненням зон локального перегріву в умовах надлишкової холодительної потужності.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Розроблено конкретні рекомендації щодо модернізації системи охолодження ЛАЦ, що дозволить ліквідувати аварійні температурні режими в рядах обладнання. Запропоновані заходи дозволяють зменшити коефіцієнт

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

ефективності використання енергії (PUE) з поточного рівня 1,86 та забезпечити економію електроенергії. Методика верифікації моделі може бути використана для аудиту інших технологічних приміщень мобільних операторів.

*Ключові слова: лінійно-апаратний цех, дата-центр, CFD-моделювання, інструментальний аудит, аеродинаміка потоків, локальні перегіви, ізоляція коридорів, енергоефективність.*

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

## Abstract

The thesis is dedicated to a comprehensive study of heat dissipation in the **Line-Equipment Room (LER)** of a data center and the determination of effective engineering solutions to eliminate local overheating (hotspots).

The work performs a detailed analysis of how the room configuration and airflow organization influence the distribution of temperature fields. The efficiency of various air exchange schemes was evaluated, including both traditional and modern solutions that involve airflow zoning and the use of **"cold" and "hot" aisles**.

Particular attention is paid to analyzing the occurrence of local overheating, which can lead to reduced performance or equipment failure, as well as developing recommendations for improving the efficiency of the cooling supply system. The proposed technical solutions are aimed at optimizing air distribution, reducing energy costs, and stabilizing the microclimate within the LER.

The research results confirm that applying a systematic approach to analyzing thermal processes, combined with precise engineering calculations, allows for not only the timely detection of problem areas but also an increase in the general efficiency and reliability of the data center's operation.

### Relevance of the Research

With the rapid development of digital technologies and the increasing density of server equipment, the problem of effective heat removal in data centers and Line-Equipment Rooms (LER) is becoming critical. In practice, a paradox often arises where the total **cooling capacity** significantly exceeds heat emission, yet equipment continues to overheat due to inefficient airflow distribution, the mixing of cold and hot air, and the formation of turbulence zones. Traditional design and audit methods do not fully allow for the detection and elimination of these aerodynamic problems.

In this regard, the application of a complex approach combining instrumental auditing with **Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling** is highly relevant. This approach allows for the creation of a **"digital twin"** of the room, visualization of

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
						11
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

air mass movement, detection of hidden heat stagnation zones, and the development of targeted engineering solutions (aisle containment, flow reorientation) to modernize existing systems. This enables achieving a real increase in energy efficiency and a reduction in the **Power Usage Effectiveness (PUE)** coefficient without the need for a complete replacement of expensive climate control equipment.

### **Aim of the Research**

The aim of the work is to increase the energy efficiency and operational reliability of the cooling supply system in a mobile operator's Line-Equipment Room (LER). This is achieved by verifying instrumental audit data with the results of CFD airflow modeling, which allows for the detection of hidden aerodynamic flaws, the elimination of local equipment overheating zones, and the optimization of the air distribution scheme without full equipment replacement.

### **Research Tasks**

- Analyze heat dissipation from existing technological equipment and calculate the actual thermal balance of the LER.
- Conduct an analysis of the instrumental audit of microclimate parameters and a thermal imaging survey of equipment rows to identify zones of local overheating.
- Construct a **CFD model** of airflow distribution in the room and verify it against experimental measurement results.
- Identify the aerodynamic causes of the existing cooling system's inefficiency (stagnation zones, flow mixing, recirculation) by analyzing velocity and pressure fields.
- Develop and substantiate a set of engineering solutions to eliminate overheating without the complete replacement of air conditioners.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
						12
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## Object of Research

Heat and mass transfer processes and the formation of temperature and air velocity fields in the technological room of a Line-Equipment Room with high-density server infrastructure.

## Subject of Research

Methods for optimizing airflow aerodynamics and increasing the energy efficiency of precision air conditioning systems using instrumental auditing and numerical modeling (CFD).

## Scientific Novelty

The methodology for diagnosing data center cooling systems has been improved by integrating thermal imaging control data with the results of mathematical aerodynamic modeling, which allowed for the identification of hidden air recirculation zones. The justification for the effectiveness of zoning ("**cold**"/"**hot**" aisles) for rooms with mixed equipment types and uneven thermal loads was further developed. A dependence was established between the geometric configuration of air intake by air conditioners and the occurrence of local overheating zones under conditions of excess cooling capacity.

## Practical Value of the Results

Specific recommendations have been developed for modernizing the LER cooling system, which will eliminate critical temperature conditions in equipment rows. The proposed measures allow for reducing the **Power Usage Effectiveness (PUE)** coefficient from the current level of **1.86** and ensuring electricity savings. The model verification methodology can be used to audit other technological rooms of mobile operators.

**Keywords:** *line and hardware shop, data center, CFD modeling, instrumental audit, aerodynamics of flows, local overheating, corridor insulation, energy efficiency.*

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		13

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

**ЛАЦ** – лінійно-апаратний цех (серверне приміщення мобільного оператора).

**ІТ** – інформаційні технології (обладнання серверного центру).

**CRAC** – *Computer Room Air Conditioner* – кондиціонер для серверних кімнат прямого охолодження (фреоновий контур).

**CRAH** – *Computer Room Air Handler* – кондиціонер із водяним контуром (чилерна система).

**Containment** – ізоляція гарячих і холодних коридорів у серверній

**Free Cooling (фрікулінг)** – природне охолодження, що використовує низьку температуру зовнішнього повітря.

**Chiller** – холодильна машина для охолодження води або розчину гліколю.

**COP** – *Coefficient of Performance* – коефіцієнт продуктивності холодильного циклу.

**PUE** – *Power Usage Effectiveness* – показник ефективності використання енергії дата-центром.

**DCiE** – *Data Center Infrastructure Efficiency* – обернений показник до PUE.

**CFD** – *Computational Fluid Dynamics* – комп'ютерне моделювання потоків повітря та тепла.

**ASHRAE** – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* – Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря.

**UPS** – *Uninterruptible Power Supply* – система безперебійного живлення

**EER** – *Energy Efficiency Ratio* – співвідношення охолоджувальної потужності до споживаної енергії.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						14
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

**ΔT** – температурний перепад.

**R407C** – холодильний агент (суміш R32/R125/R134a), використовується у прецизійних кондиціонерах Uniflair.

**Серверне приміщення (ЛІАЦ)** – технологічне приміщення, призначене для розміщення серверів, телекомунікаційного та комутаційного обладнання з контрольованими параметрами мікроклімату (температура, вологість, запиленість).

**Теплове навантаження** – кількість теплоти, яку необхідно відвести з приміщення для підтримання заданої температури, зазвичай виражається в кВт.

**Джерело холоду** – холодильна машина або система, що виробляє холод (чилер, компресорна установка, фреонова система).

**Споживач холоду** – об'єкт, від якого відводиться тепло (сервери, телекомунікаційні шафи, електронні модулі).

**Прецизійний кондиціонер** – високоточна кліматична установка, що підтримує стабільні параметри температури та вологості у серверних приміщеннях, допускаючи відхилення не більше  $\pm 1$  °C.

**Система фрікулінгу (Free Cooling)** – схема охолодження, у якій використовується зовнішнє повітря або холодна вода для зменшення навантаження на компресори.

**Система ізоляції потоків (Containment)** – інженерне рішення, яке запобігає змішуванню холодного та гарячого повітря, завдяки чому забезпечується стабільний тепловий режим серверів.

**Коефіцієнт продуктивності (COP)** – відношення відведеного тепла до затраченої енергії в холодильному циклі.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

**Коефіцієнт енергетичної ефективності (PUE)** – показник, що характеризує частку енергії, яка безпосередньо використовується ІТ-обладнанням у загальному енергоспоживанні дата-центру.

**Тепловий баланс приміщення** – співвідношення між усіма надходженнями та відведенням тепла в замкненому об’ємі; визначає необхідну потужність системи охолодження.

**CFD-моделювання** – метод чисельного аналізу потоків повітря, що дозволяє прогнозувати розподіл температур і визначати зони локальних перегрівів.

**Глікольовий контур** – частина системи холодопостачання, у якій циркулює розчин етиленгліколю або пропіленгліколю для запобігання замерзанню при низьких температурах.

**Теплообмінник** – пристрій для передачі тепла між двома середовищами (повітря–вода, вода–фреон тощо).

**Hot Spot («гаряча точка»)** – локальна зона перегріву в серверному приміщенні, де температура перевищує допустимі норми через неефективний повітророзподіл.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
						16
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## Вступ

Стрімкий розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій та перехід до мереж нових поколінь супроводжується безпрецедентним зростанням обсягів обробки даних. Це призводить до суттєвого збільшення щільності розміщення серверного обладнання в дата-центрах та лінійно-апаратних цехах (ЛАЦ), що, у свою чергу, перетворює задачу забезпечення належного мікроклімату з допоміжної функції на критично важливий фактор надійності всієї мережі. Сучасне телекомунікаційне устаткування характеризується високим рівнем тепловиділення, а енергоспоживання систем охолодження сьогодні становить значну частину — до 40–50% — від загальних експлуатаційних витрат технічних майданчиків.

Практика експлуатації діючих об'єктів показує, що наявність потужного кліматичного обладнання не завжди є гарантією відсутності аварійних ситуацій. Часто виникає парадокс, коли сумарна холодопродуктивність встановлених кондиціонерів значно перевищує тепловиділення від обладнання, проте в серверних шафах все одно фіксуються зони критичного локального перегріву. Це свідчить про те, що ключова проблема полягає не в дефіциті холоду, а в неефективній аеродинаміці приміщення: нерівномірному розподілі повітряних потоків, неконтрольованій рециркуляції гарячого повітря та змішуванні потоків, що знижує загальну енергоефективність системи.

Традиційні методи проектування та експлуатації, що базуються на усереднених показниках температури, не дозволяють ефективно діагностувати такі аеродинамічні вади. Інструментальний аудит дає змогу зафіксувати вже існуючі проблеми, але часто не дає повного розуміння фізики процесів, що їх викликають. У цьому контексті виникає необхідність застосування комплексного підходу, який поєднує натурні вимірювання з математичним моделюванням (CFD — Computational Fluid Dynamics). Створення «цифрового двійника» аеродинаміки приміщення дозволяє візуалізувати невидимі повітряні

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						17
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

потоки, верифікувати дані аудиту та розробити точкові інженерні рішення для оптимізації системи без ризиків для діючого обладнання.

Дана магістерська робота присвячена вирішенню проблеми підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності системи холодопостачання лінійно-апаратного цеху шляхом оптимізації повітророзподілу. В основу дослідження покладено результати комплексного аудиту та чисельного моделювання мікроклімату реального об'єкта, що дозволило виявити приховані причини перегрівів та розробити обґрунтовані рекомендації щодо модернізації системи охолодження без повної заміни дороговартісного обладнання. Реалізація запропонованих рішень спрямована на забезпечення стабільного температурного режиму роботи серверів та зниження коефіцієнта ефективності використання енергії (PUE).

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						18
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1. Аналітичний огляд літератури

Постійне зростання обсягів цифрових даних, інтенсивний розвиток телекомунікаційних технологій і поява нових сервісів обумовили значне збільшення теплових навантажень у серверних приміщеннях та центрах обробки даних. Сервери, маршрутизатори, системи зберігання інформації та допоміжне обладнання постійно генерують тепло, яке необхідно безперервно відводити для забезпечення їхньої стабільної та надійної роботи. Лінійно-апаратні цехи (ЛАЦ) мобільних операторів — це технологічні приміщення з високою щільністю розміщення апаратури, де навіть незначне підвищення температури може призвести до збоїв у роботі або втрати зв'язку.

В умовах підвищених енергетичних тарифів і вимог до сталого розвитку особливої актуальності набуває проблема енергоефективності систем охолодження. За даними досліджень, до 40–50 % енергоспоживання дата-центру припадає саме на процеси тепловідведення [1, 2]. Це означає, що кожен кіловат тепла, відведеного з серверного залу, безпосередньо впливає на загальні експлуатаційні витрати. Надійна система охолодження має забезпечувати не лише підтримання допустимого температурного режиму, а й рівномірний розподіл потоків повітря, мінімізуючи утворення локальних зон перегріву. Проблема таких «гарячих точок» (hot spots) залишається типовою навіть у сучасних ЛАЦ з прецизійними кондиціонерами, що свідчить про складність термодинамічного узгодження між джерелом холоду та споживачем тепла.

Саме тому дослідження систем охолодження в контексті підвищення їхньої енергоефективності та усунення локальних перегрівів є не лише технічним, але й науково-прикладним завданням. Його розв'язання потребує аналізу історії розвитку охолоджувальних систем, фізичних принципів тепловідведення, а також сучасних технологій організації повітряних потоків і енергозбереження.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		19

## 1.1. Історичний розвиток систем охолодження серверних приміщень

Історія становлення систем охолодження тісно пов'язана з розвитком обчислювальної техніки. Перші серверні приміщення у 1980–1990-х роках охолоджувалися за допомогою систем типу **CRAC (Computer Room Air Conditioner)**, які працювали за принципом прямого охолодження. Усередині таких установок відбувається випаровування холодоагенту, який відбирає тепло від повітря, що циркулює через випарник. Охолоджене повітря подавалося під підлогу, а гаряче — поверталось у верхню частину залу. Подібна схема мала перевагу простоти, але поступово втрачала ефективність через збільшення тепловиділень серверів. Розподіл повітря в приміщенні був нерівномірним, утворювались застійні зони, де температура сягала критичних значень [3].

У 2000-х роках набули поширення системи **CRAH (Computer Room Air Handler)**, що базуються на циркуляції холодної води від централізованого чилера. Повітря охолоджується в теплообміннику через контакт із холодною водою, що циркулює замкненим контуром. Це рішення дозволило віддалити компресори з серверного залу, знизити шум і підвищити стабільність мікроклімату. Крім того, з'явилась можливість використовувати природне охолодження — так званий **фрікулінг (free cooling)**, коли охолодження здійснюється завдяки низькій температурі зовнішнього повітря без увімкнення компресорів [4].

Подальший розвиток технологій охолодження був зумовлений потребою локалізації теплових потоків. Якщо раніше охолоджувалось усе приміщення загалом, то тепер почала формуватися концепція «охолодження біля джерела тепла». Ця тенденція проявилась у появі **in-row охолоджувачів**, розміщених між серверними шафами. Вони забирають гаряче повітря безпосередньо від серверів, охолоджують його й одразу подають назад у холодну зону. Завдяки скороченню шляху циркуляції повітря досягається висока ефективність і швидка реакція системи на зміну навантаження [5].

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						20
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Іншим напрямом розвитку стала поява **RDHx (Rear Door Heat Exchanger)** — теплообмінників, розташованих у задніх дверцятах серверних шаф. У цих системах повітря, що виходить із серверів, проходить через водяний теплообмінник і охолоджується перед тим, як потрапити в зал. Така конфігурація дозволяє усунути гарячі зони без масштабної реконструкції приміщення та особливо ефективна в середніх за розміром серверних залах [6].

## 1.2. Енергоефективність систем охолодження та показники їх оцінки

Для кількісної оцінки ефективності використання енергії в ЦОД загальноприйнятим є коефіцієнт PUE (Power Usage Effectiveness), методика розрахунку якого регламентується стандартом **ISO/IEC 30134-2**. PUE визначається як відношення загальної енергії, спожитої дата-центром, до енергії, спожитої ІТ-обладнанням:

$$PUE = \frac{E_{DC}}{E_{IT}} \quad (1.1)$$

де  $E_{DC}$  – загальне енергоспоживання дата-центру (кВт·год);

$E_{IT}$  – енергоспоживання ІТ-обладнання (сервери, сховища, комутатори) (кВт·год).

Ідеальним значенням є  $PUE = 1.0$ . Для традиційних ЦОД цей показник часто перевищує 2.0, тоді як сучасні енергоефективні об'єкти досягають рівня 1.2–1.4. Згідно з даними аудиту, PUE досліджуваного ЛАЦ становить 1.86, що свідчить про значний потенціал для оптимізації.[9].

У практиці проектування дата-центрів ці показники взаємопов'язані. Підвищення температури подачі холодного повітря навіть на 2 °С зменшує енергоспоживання компресорів приблизно на 5–8 %. Саме тому сучасні стандарти **ASHRAE TC9.9** рекомендують робочий діапазон температур від 18 до 27 °С та відносну вологість у межах 40–60 %, що дозволяє поєднати енергоефективність із надійністю роботи обладнання [11].

Ефективність системи охолодження визначається не лише типом застосованої технології, але й **співвідношенням між джерелом холоду та споживачем**. Якщо охолоджувальні агрегати працюють із надлишковою

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
						21
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

потужністю або повітря розподіляється нерівномірно, утворюються зони надлишкового та недостатнього охолодження. У таких умовах енергетичні витрати зростають, а температура в окремих зонах може виходити за межі допустимих значень.

### 1.3. Термодинамічні виклики та теплофізичні аспекти розподілу тепла

Термодинамічні процеси у серверних приміщеннях визначаються взаємодією двох контурів: **повітряного** та **водяного** (у разі чилерних систем). Основним завданням є перенесення тепла від ІТ-обладнання до теплообмінника з мінімальними втратами. Втім, навіть у найсучасніших системах спостерігаються ефекти локального перегріву.

Причинами є нерівномірна циркуляція повітря, відсутність належного балансування вентиляторів, турбулентність потоків у верхніх зонах приміщення. З фізичної точки зору, ці явища можна пояснити порушенням закону рівноваги масових і теплових потоків у замкнутому просторі. Якщо об'ємна витрата повітря, що подається кондиціонером, не відповідає сумарній потребі серверів, виникають області зниженої швидкості, де повітря не оновлюється достатньо швидко. Такі ділянки стають «тепловими пастками». Для їх усунення використовують локальні сенсорні системи, які контролюють температуру та вологість у реальному часі й коригують роботу вентиляторів і заслінок [13].

Розрахунок теплового режиму ЛАЦ базується на рівнянні теплового балансу, яке враховує всі джерела надходження теплоти.

#### 1.3.1. Рівняння теплового балансу

Повне теплове навантаження на систему кондиціонування  $Q_{total}$  визначається сумою явних тепловиділень від усіх джерел у приміщенні:

Повний вигляд рівняння теплового балансу для системи кондиціонування:

$$Q_{total} = Q_{IT} + Q_{UPS} + Q_{light} + Q_{people} + Q_{enc} \quad (1.2)$$

де:

$Q_{total}$  — загальне теплове навантаження на систему кондиціонування, Вт;

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
						22
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$Q_{IT}$  — тепловиділення від електронного обладнання (сервери, комутатори), Вт;

$Q_{UPS}$  — тепловиділення від джерел безперебійного живлення, Вт;

$Q_{light}$  — тепловиділення від системи освітлення, Вт;

$Q_{reople}$  — тепловиділення від обслуговуючого персоналу, Вт;

$Q_{enc}$  — теплонадходження через огорожувальні конструкції (стіни, вікна, перекриття), Вт.

Для ІТ-обладнання вважається, що майже вся спожита електрична потужність перетворюється на тепло:

$$Q_{IT} \approx P_{el}.$$

### 1.3.2. Аналіз методів ізоляції повітряних потоків (Containment)

Одним з найбільш ефективних методів підвищення енергоефективності є фізичне розділення холодних і гарячих повітряних мас. Існує два основних підходи: ізоляція холодного коридору (Cold Aisle Containment - САС) та ізоляція гарячого коридору (Hot Aisle Containment - НАС).

Порівняння ефективності цих методів показує, що НАС має перевагу завдяки використанню всього об'єму приміщення як "холодного резервуару", що збільшує теплову інерцію системи у випадку аварії.<sup>11</sup>

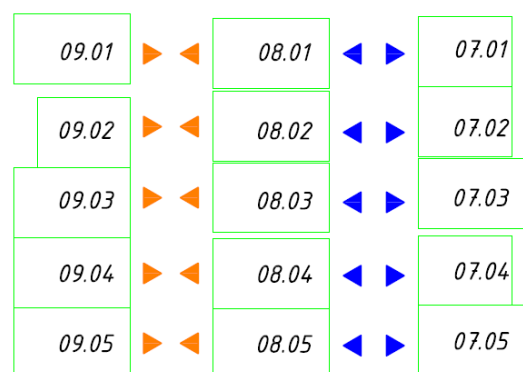


Рис. 1.3.2.1. Схематичне зображення ізоляції холодного (праворуч) та гарячого (ліворуч) коридорів

Економія енергії при впровадженні ізоляції досягається за рахунок можливості підвищення температури повітря, що подається кондиціонерами, та

зменшення швидкості обертання вентиляторів. Потужність, споживана вентилятором, залежить від витрати повітря у кубічній залежності:

$$\frac{N_{fan2}}{N_{fan1}} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^3 \quad (1.3)$$

Це означає, що зменшення витрати повітря на 20% (завдяки усуненню перетоків) призводить до зниження енергоспоживання вентиляторами майже на 50%.

Перевага containment полягає у простоті впровадження — його можна реалізувати навіть у вже діючих приміщеннях, використовуючи пластикові або скляні панелі для ізоляції [7]. Дослідження показують, що завдяки такій схемі можна зменшити показник PUE 1,8 до 1,3, а отже, скоротити споживання електроенергії майже на третину [8].

З погляду термодинаміки containment мінімізує перемішування двох потоків із різними ентальпіями. Це означає, що температура на вході до серверів залишається стабільною, а загальна ефективність охолодження зростає, оскільки система працює з меншим перепадом температур.

#### 1.4. Узгодження джерела та споживача холоду

З точки зору системної енергетики, охолодження серверного приміщення — це процес взаємодії двох підсистем: **джерела холоду** (чилери, кондиціонери, компресори) та **споживачів** (сервери, телекомунікаційне обладнання). Ефективність усього комплексу визначається тим, наскільки ці дві підсистеми узгоджені між собою.

Якщо холодоагент подається при надмірно низькій температурі, відбувається перевитрата електроенергії та надмірне осушення повітря. У протилежному випадку, коли температура подачі занадто висока, система не встигає компенсувати тепловиділення, що призводить до зростання температури у стійках і перегріву серверів. Збалансувати ці процеси дозволяє **динамічне регулювання**, коли робота насосів, компресорів і вентиляторів адаптується до реальних теплових умов.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
						24
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливо, що сучасні системи моніторингу дозволяють будувати **теплові карти** серверного приміщення — тривимірні моделі розподілу температури в реальному часі. Це дає можливість своєчасно реагувати на виникнення гарячих зон і змінювати режими охолодження лише в тих ділянках, де це необхідно. Такий підхід знижує енергоспоживання на 20–30 % і забезпечує стабільну роботу обладнання [14].

### **1.5. Аналіз наявних аудитів та світової практики застосування CFD**

Для коректної оцінки ефективності запропонованих рішень необхідно проаналізувати досвід попередніх досліджень та аудитів, які сформували сучасну методологічну базу. У науковій літературі та технічних звітах провідних компаній (Schneider Electric, The Green Grid, ASHRAE) накопичено значний масив даних щодо типових проблем серверних приміщень.

#### **1.5.1. Огляд дослідження Huang J. та співавт. (2019): Моделювання систем охолодження**

У дослідженні "A Calculation Model for Typical Data Center Cooling System", автори розглядали проблему узгодження розрахункових моделей з реальними експлуатаційними даними.

**Проблематика та труднощі:** Головною проблемою, виявленою в ході цього аудиту, стала нелінійність залежності між навантаженням на сервери та споживанням енергії системою охолодження. Традиційні лінійні моделі не враховували динаміку теплової інерції приміщення та змінні режими роботи компресорів. Труднощі полягали у точній параметризації тепловиділень від різномірного обладнання.

**Застосовані засоби:** Було використано комплексний підхід, що поєднує математичне моделювання енергетичних балансів з CFD-симуляцією розподілу температур.

**Результати та пояснення:** Дослідження показало, що оптимізація лише на рівні налаштувань чилера без урахування аеродинаміки залу дає обмежений ефект. Ключовий висновок полягав у тому, що ефективність системи

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

охолодження (COP) суттєво залежить від температури зворотного повітря. Чим вища температура повітря, що повертається до кондиціонера (без змішування з холодним), тим ефективніше працює теплообмінник. Це стало теоретичним підґрунтям для впровадження ізоляції коридорів.

### 1.5.2. Аудит та дослідження Zhang X. (2017): Енергоспоживання ІТ-залів

Робота "Cooling Energy Consumption Investigation of Data Center IT Room" зосередилась на енергетичному балансі конкретних серверних кімнат.

**Питання та виклики:** Аудит ставив за мету виявити причини високого PUE (Power Usage Effectiveness) у діючих дата-центрах. Основним викликом була ідентифікація прихованих втрат холоду, коли вироблена потужність не досягала споживача.

**Результати:** Було встановлено, що значна частина холодопродуктивності втрачається через явище "байпасування" (bypass airflow) — проходження холодного повітря повз сервери безпосередньо у витяжні канали. Це призводить до необхідності переохолодження повітря та надмірної роботи вентиляторів. CFD-моделювання у цьому дослідженні дозволило візуалізувати шляхи витoku повітря, що стало основою для рекомендацій щодо герметизації фальшпідлоги та кабельних вводів.

## 1.6. Результати аналізу

Проведений аналітичний огляд дозволяє зробити наступні висновки:

- Традиційні підходи до охолодження ЛАЦ (подача повітря в загальний об'єм) вичерпали свій ресурс ефективності в умовах зростання щільності теплових навантажень.
- Основними проблемами існуючих систем є аеродинамічні вади: рециркуляція гарячого повітря та байпасування холодного, що призводить до локальних перегрівів та завищеного показника PUE.
- Для вирішення цих проблем необхідний комплексний підхід, що поєднує інструментальний аудит, впровадження технологій ізоляції коридорів (Containment) та використання CFD-моделювання для оптимізації потоків.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Перспективним напрямком є використання систем Free Cooling (вільного охолодження), ефективність яких значно зростає при правильній організації аеродинаміки приміщення та підвищенні температури теплоносія.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						27
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 2. Технологічний розділ

### 2.1. Аналіз тепловиділень в приміщенні ЛАЦ

Основним джерелом тепловиділення в приміщенні ЛАЦ є технологічні шафи, 95% спожитої ними електроенергії перетворюється в теплову, сумарні тепловиділення від шаф становить 105,5 кВт.

Характеристики технологічного обладнання наведені в табл.2.1, термограми обладнання наведені в табл.2.2.

Для підтримання заданих параметрів повітря (температури) в приміщенні ЛАЦ встановлено 3 прецизійні кондиціонери (K123, K124, K125) з системою припливних повітропроводів, загальною холодинною потужністю 119,3 кВт та 15 спліт систем (K128-K142), загальною холодинною потужністю 127,2 кВт.

Прецизійні кондиціонери виробництва Uniflair моноблочного виконання з проміжним холодоносієм встановлені в протилежних частинах приміщення, підключені до припливних повітропроводів, що забезпечує компенсацію теплопритоків від технологічного обладнання:

- для обладнання рядів 1 та 6 - один MUER 1411 (K123) основний
- для обладнання рядів 10, 11,12 - один MUER 1411 (K124) та один MUER 1722 (K125).

Проміжний холодоносій – розчин гліколю подається за допомогою трьох циркуляційних насосів ІЛ 40/140-2,2/2 від конденсаторів, що встановлені на даху приміщення – 1 шт. RAL3600, 2 шт. RAL2300; в перехідні періоди кондиціонери працюють в режимі «free-cooling» - охолодження повітря в гліколевому теплообміннику. Кондиціонер MUER 1722 (K125) обладнаний паровим зволожувачем повітря. Холодоагент кондиціонерів K123, K124. K125 – фреон R22.

Спліт системи виробництва “Climaveneta” з внутрішніми блоками пристельного типу та виносними зовнішніми блоками були встановлені у зв’язку зі збільшенням технологічного обладнання, для компенсації

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		28

тепловиділення та резервування обладнання кондиціонування:

- для обладнання рядів 8 та 9 - дві HED/HCAT0041 (K140, K142) основні, та одна HED/HCAT0041 (K141) резервна
- для обладнання ряду 7 - дві HED/HCAT0031 (K133, K139) основні, та одна HED/HCAT0031 (K138) резервна
- для обладнання ряду 0 - дві HED/HCAT0031 (K135, K137) основні, та одна HED/HCAT0031 (K136) резервна
- для обладнання рядів 6 та 4 - дві HED/HCAT0041 (K131, K132) основні, та одна HED/HCAT0041 (K134) резервна
- для обладнання ряду 3 - дві HED/HCAT0061 (K129, K130) основні
- для обладнання ряду 1 - одна HED/HCAT0061 (K128) в резерві.

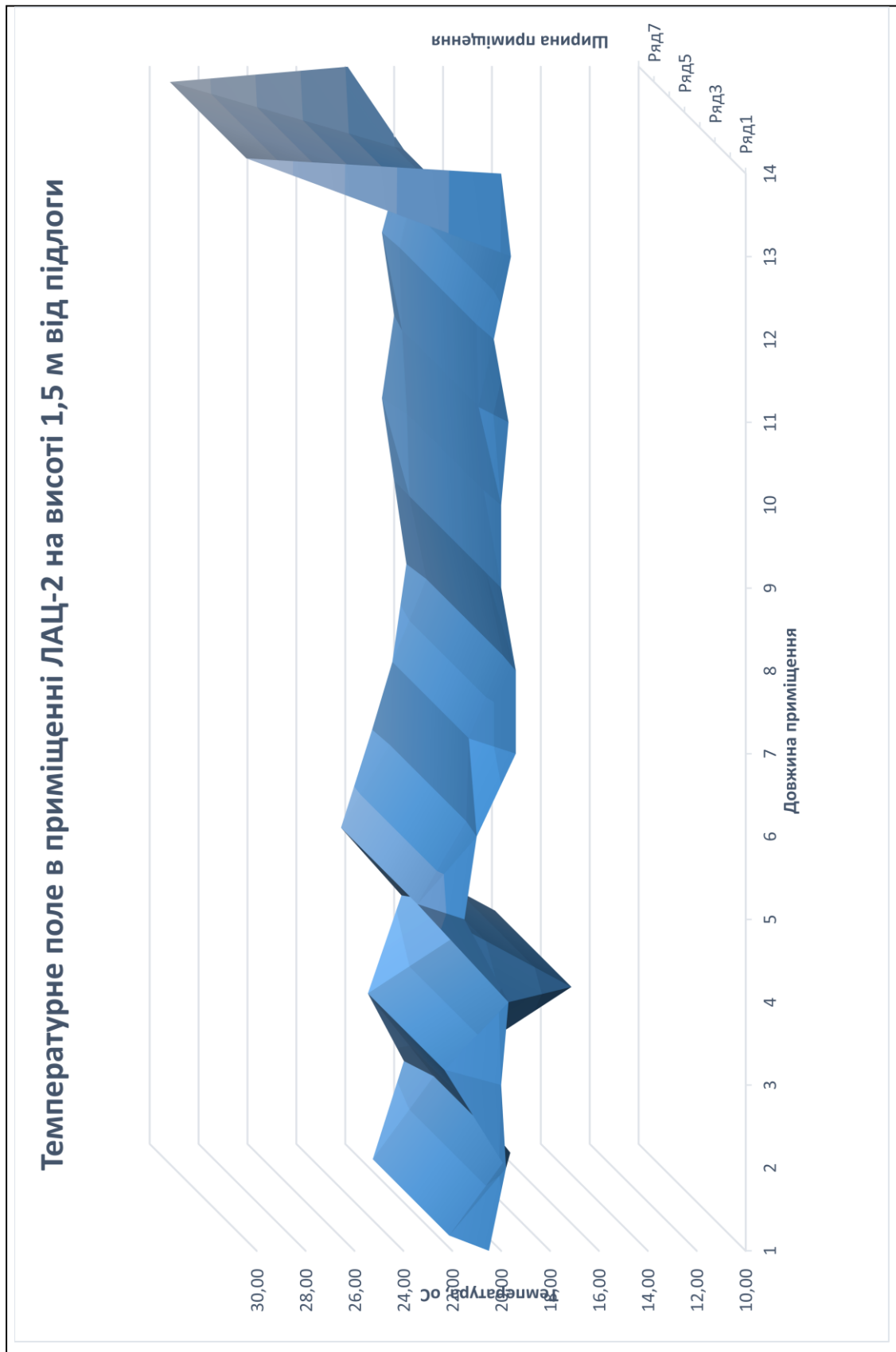
Зовнішні компресорно-конденсаторні блоки розташовані на фасадній стіні приміщення вздовж осі Д. Холодоагент кондиціонерів K128 – K142 - фреон R407C.

На рис.2.1 наведено графік температурного поля по приміщенню, як видно з графіка спостерігається нерівномірність розподілу температур в різних точках приміщення, яка викликана невідповідністю встановленого обладнання кондиціонування встановленому технологічному обладнанню: забір повітря повинен виконуватись з «гарячих» коридорів, подача в «холодні».

За рахунок щілин між шафами відбуваються перетоки повітря з «холодних» коридорів в «гарячі», що негативно впливає на охолодження обладнання. Перетоки повітря спостерігаються в 2-х магістральних коридорах, що обумовлено відсутністю повітропроводів забору гарячого повітря до кондиціонерів K123, K124, K125; невідповідністю забору і подачі повітря кондиціонерів K135, K136, K137, K130, K128, K129, K134, K123 коридорам стійок.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29

Рис. 2.1.1.



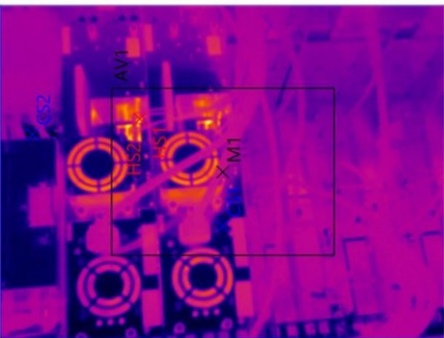
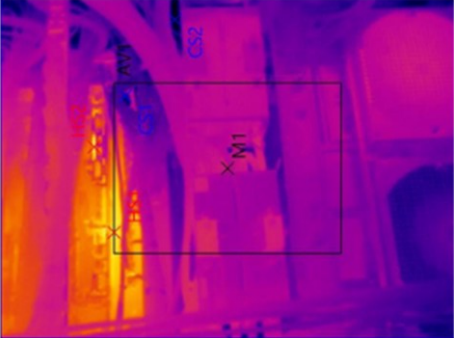




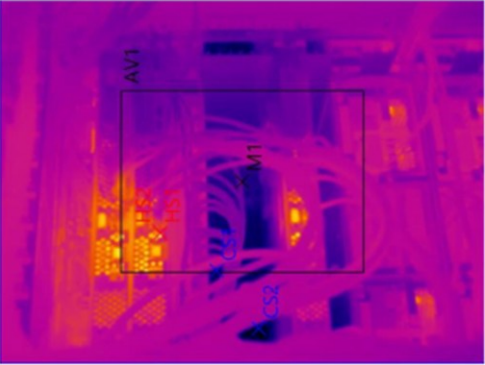
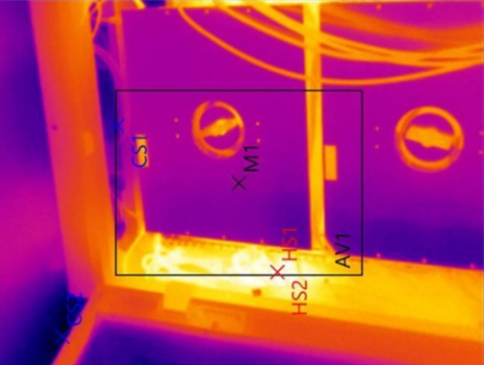
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

00.KMP.142.003.014.ПЗ.



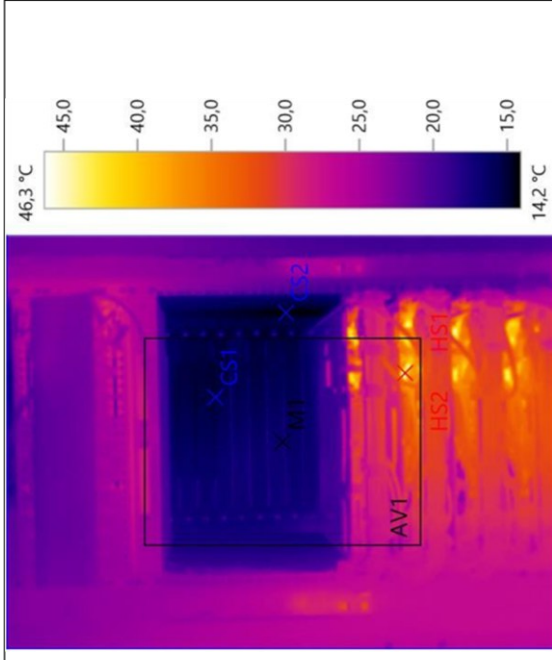
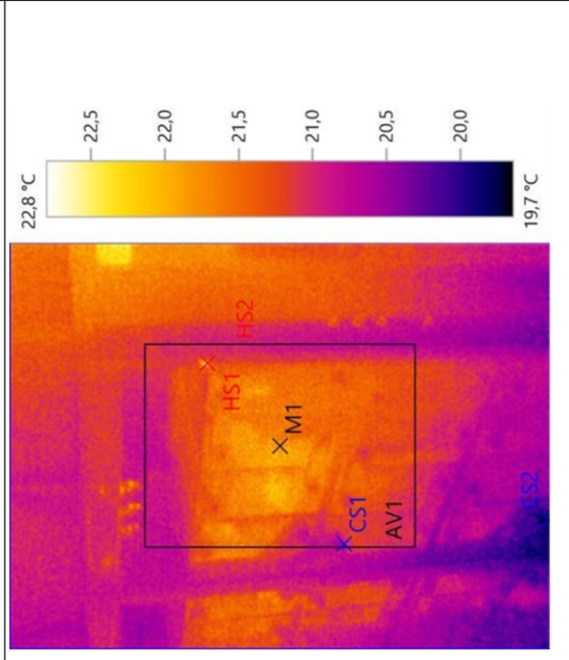
Таблиця 2.1.1.

Ряд	Номер кабінету	Температура найхолоднішої точки, °C	Температура найбільшої площі точки, °C	Термограма шафи	Фото шафи	Примітка
0	1	25,7	40,6			Локальний перегрів
1	1	26,7	57,3			Локальний перегрів

Локальний перегрів			
	1	28,3	59,6
	9	18,7	38,9

Локальний перегрів			
	52,1		32,5
9	4	18,4	3
10	10	18,5	3



<p>Перегрів обладна ння</p>					<p>12</p>	<p>5</p>	<p>13,9</p>	<p>49,9</p>	<p>200</p>	<p>1</p>	<p>19,7</p>	<p>22,8</p>
-------------------------------------	---	--	--	---	-----------	----------	-------------	-------------	------------	----------	-------------	-------------

## 2.2. Системи кондиціонування

Прецизійні кондиціонери виробництва Uniflair моноблочного виконання з проміжним холодоносієм встановлені в протилежних частинах приміщення, до них підключені припливні повітропроводи, що забезпечують подачу повітря до 3, 4, 5, 9, 10, 11, та 12 рядів для компенсації теплопритоків від технологічного обладнання.

Подача охолодженого повітря здійснюється через систему повітропроводів з верхньої частини кондиціонерів, забір повітря відбувається безпосередньо через фронтальні решітки кондиціонерів, наявність лише системи припливних повітропроводів порушує баланс повітряних потоків «гарячих» та «холодних» коридорів, що викликає перетікання повітря через нещільності між шафами та магістральні коридори та погіршує відведення тепла від обладнання.

Схема системи К-123

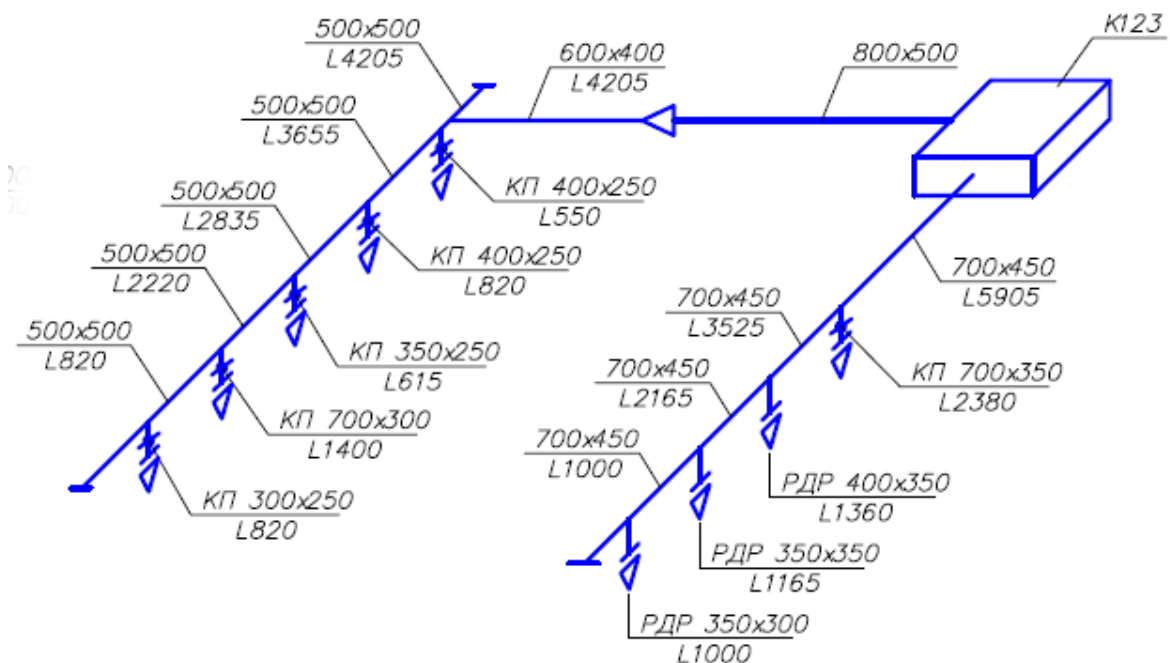


Рис. 2.2.1. Схема повітряних каналів системи К-123

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Схема системи К-125

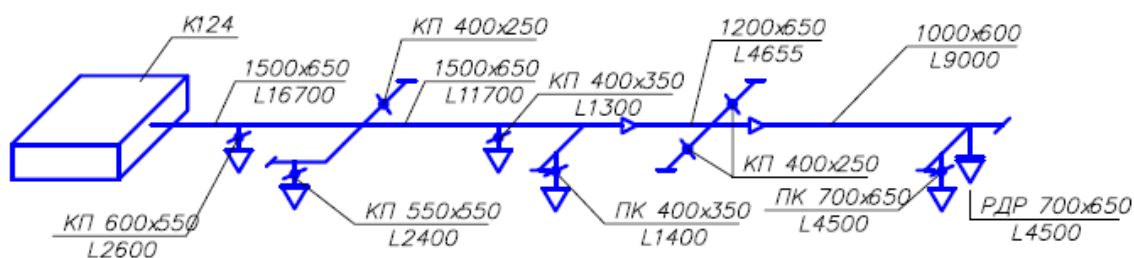


Схема системи К-124

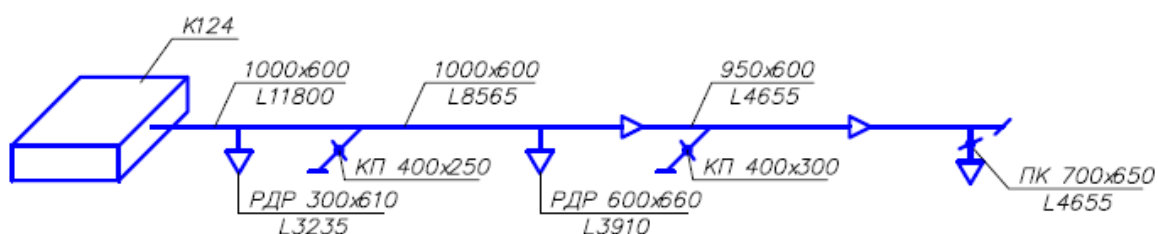


Рис. 2.2.2. Схема повітряних каналів системи К-124 та К-125

Кондиціонери К123, К124, К125 конструктивно мають два повітроохолоджувача: фреоновий, що працює в літній період та гліколевий на який доцільно переключати з пониженням температури зовнішнього повітря нижче  $+15^{\circ}\text{C}$ , що дозволить суттєво економити електроенергію (35 кВт/год) та зменшити коефіцієнт PUE.

Кондиціонери К123, К124, К125 укомплектовані пластинчастими теплообмінниками які використовуються як конденсатори, від яких тепло відводить гліколь до зовнішніх блоків (RAL2300, RAL3600). Циркуляцію гліколю забезпечують три циркуляційні насоси ІЛ 40/140-2,2/2, по одному на кожен кондиціонер, що встановлені на 3-му поверсі в технічному приміщенні.

Основним недоліком реалізованої системи циркуляції гліколю є відсутність резервування насосів.



*Рис. 2.2.3. Фото циркуляційних насосів*

На зовнішніх блоках систем K123, K124, K125 було проведено заміну вентиляторів, проте детальне візуальне обстеження показало, що оребрення теплообмінної поверхні на всіх трьох зовнішніх блоках є в край незадовільному стані: зважаючи на значний їх термін експлуатації на поверхні утворився шар забруднення, який можна видалити лише засобами хімії для конденсаторів, проте стан теплообмінної поверхні не витримає такого «миття», оребрення після струменя води з хімією «розсиплеться». На даний момент через вищеперераховані фактори конденсатори фактично втратили до 20% своєї заводської теплової потужності, при подальшій їх експлуатації цей відсоток буде збільшуватись, аж до повної зупинки систем K123, K124, K125., особливо це критично для систем K125, та K125 в яких немає резервування стельовими спліт-системами, тобто обладнання рядів 9, 10, 11, 12 залишиться без охолодження.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		38

### 2.3. Аналіз температурних показників та показників відносної вологості повітря в приміщенні ЛАЦ

В приміщенні за рахунок відсутності відведення повітря з «гарячих» коридорів безпосередньо до кондиціонерів є зони з підвищеною температурою та заниженою відотною вологістю повітря.

Оскільки в Україні застаріла нормативна база для проектування приміщень ЛАЦ, звертаємось до закордонних нормативів. Так в «ASHRAE TC 9.9. 2011. Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance» рекомендовані параметри повітря для таких приміщень: температура повітря 18-27 °С, відносна вологість – не більше 60 %. В СН 512 – 78. «Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин»: 19-23 °С та 45-59 %.

Для коректної роботи технологічного обладнання виходячи з вищенаведеного необхідно підтримувати параметри повітря рекомендовані в технічних паспортах.

В таблиці 2.3.1. наведені тепловиділення від обладнання в приміщенні ЛАЦ, як видно з таблиці в приміщенні є значний запас холодильної потужності, цей факт підтвердився візуально: більшість систем К128-К142 вмикаються рідко. В таблиці 3.21 та рис.3.16 наведений розподіл температур в приміщенні. В таблиці 3.22 та рис.3.17 наведений розподіл відотної вологості в приміщенні.

З вищенаведених даних видно, що найкритичнішою зоною є «гарячий» коридор 1-го ряду, де підвищена температура повітря та занижена відносна вологість повітря, ці проблеми є основною причиною перегріву технологічного обладнання стійок 1-го ряду, який ми відслідковували на термограмах.

На рис.2.3.1 - 2.3.6. наведені графіки зміни температури та відотної вологості протягом доби (період опитування реєстраторів кожні 5 хв.) для «гарячого» та «холодного» коридорів 1-го ряду, з графіків видно, що коливання температури відбувається в межах 1 °С, відотної вологості – 8%.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
						39
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3.1.

## Тепловиділення від обладнання

Ряд / Кабінет	13	Г	12	Х	11	Г	10	Х	9	Г	8	Х	7	Г	0	Х	6	Г	5	Г	4	Х	3	Г	2	Х	1	Г	
Коридор																													
1	0,00		2,10		1,4		0,00		2,00		1,48		1,80		0,43		1,12		0,00		0,00		4,38		0		1,31		
2	0,00		0,00		0,00		0,00		1,57		1,81		1,81		0,43		1,12		0,00		0,00		0,00		0		3,12		
3	0,00		2,00		0,00		3,30		2,50		1,81		1,33		0,50		1,37		0,00		1,04		1,99		0		3,12		
4	0,19		2,07		0,00		3,10		3,15		1,81		2,55		0,50		1,12		0,00		1,31		0,62		0		1,25		
5	0,00		2,40		0,00		3,20		2,90		1,81		0,34				1,12		0,00		1,12		0,62		0		4,46		
Коридор																													
Батарея/ інвентор, кВт	1,44		1,08		3,84						3,84				2,16														
Освітлення, кВт				0,05				0,05				0,05				0,05						0,10				0,05		0,05	
Обладнання кондиціонерів, кВт				10,33								0,65				0,80						4,49				2,00			
Тепловиділення, кВт	1,63		9,65		5,24		9,60		12,12		12,56		7,83		4,02		5,85					3,47		7,61			13,26		
Сумарні тепловиділення від обладнання, кВт				26,89				21,77				21,09				10,72						15,67				13,36			
Інфільтрація, кВт																													
Холодопродуктивність, фактична, кВт				27,13				37,98				23,20				10,56						32,00				21,44			
Холодопродуктивність, максимальна, кВт				28,03				56,07				29,00				13,20						35,80				26,80			
Резервування холодопродуктивності, кВт				0,00				0,00				14,50				6,60						15,80				13,40			
Різниця між холодопродуктивністю та тепловиділеннями, кВт				0,23				16,21				2,11				-0,16						16,33				8,08			

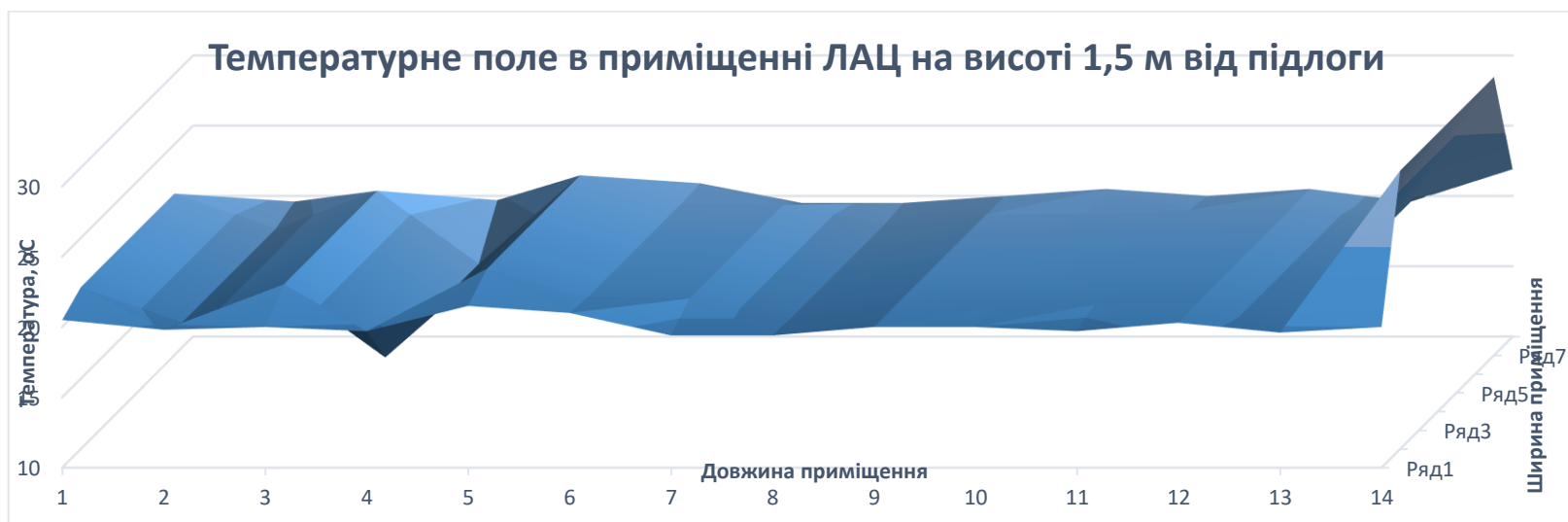
00.КМР.142.003.014.ПЗ.

Таблиця 2.3.2.

Розподіл температур в приміщенні ЛАЦ

Ряд / Кабінет	13	Г	12	Х	11	Г	10	Х	9	Г	8	Х	7	Г	0	Х	6	Г	Х	5	Г	4	Х	3	Г	2	Х	1	Г
Коридор		20,5		19,8		20,0		19,7		21,5		21,0		19,4		19,4					20,0		19,7		20,3				20,0
1																													
2																													
3		21,5		19,0		21,7		16,5		22,8		20,8		20,7		19,3		20,0		20,1		20,3		20,4		19,6		29,8	
4																													
5																													
Коридор	19,5	19,0		19,6		20,0		19,7		20,4		20,9		19,5		19,5					20,5		20,0		20,5				21,9

Рис. 2.3.1.



00.КМР.142.003.014.ПЗ.

Таблиця 2.3.3.

Розподіл відносної вологості в приміщенні ЛАЦ

Ряд / Кабінет	13	Г	12	Х	11	Г	10	Х	9	Г	8	Х	7	Г	0	Х	6	Г	Х	5	Г	4	Х	3	Г	2	Х	1	Г															
Коридор		43,0		44,5		43,4		44,0		40,0		42,6				44,1		43,7			43,7		43,8		43,8		44,0		44,0															
1		40,5		45,0		38,1		48,0		37,5		39,5		40,6		45,8		43,0		42,7		42,9		43,4		41,0		23,2																
2																																												
3																																												
4																																												
5																																												
Коридор	47,0	46,0		43,6		42,9		43,8		42,0		43,3				44,6		42,8			42,9		42,9		43,0		43,5		41,0	47,0														

Рис. 2.3.2.

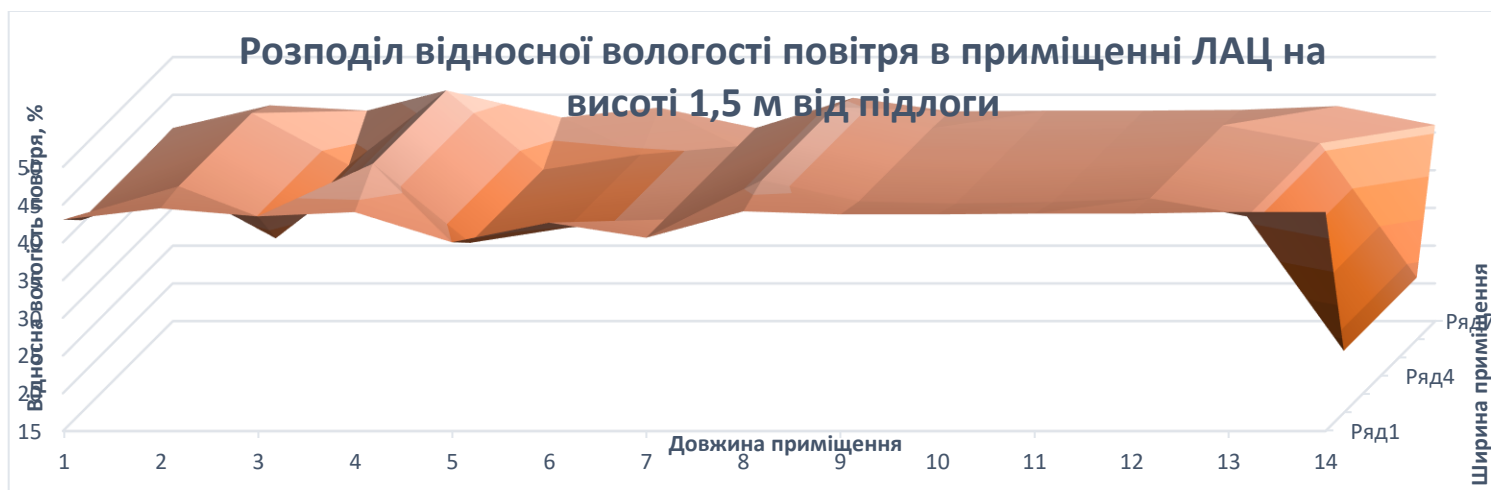
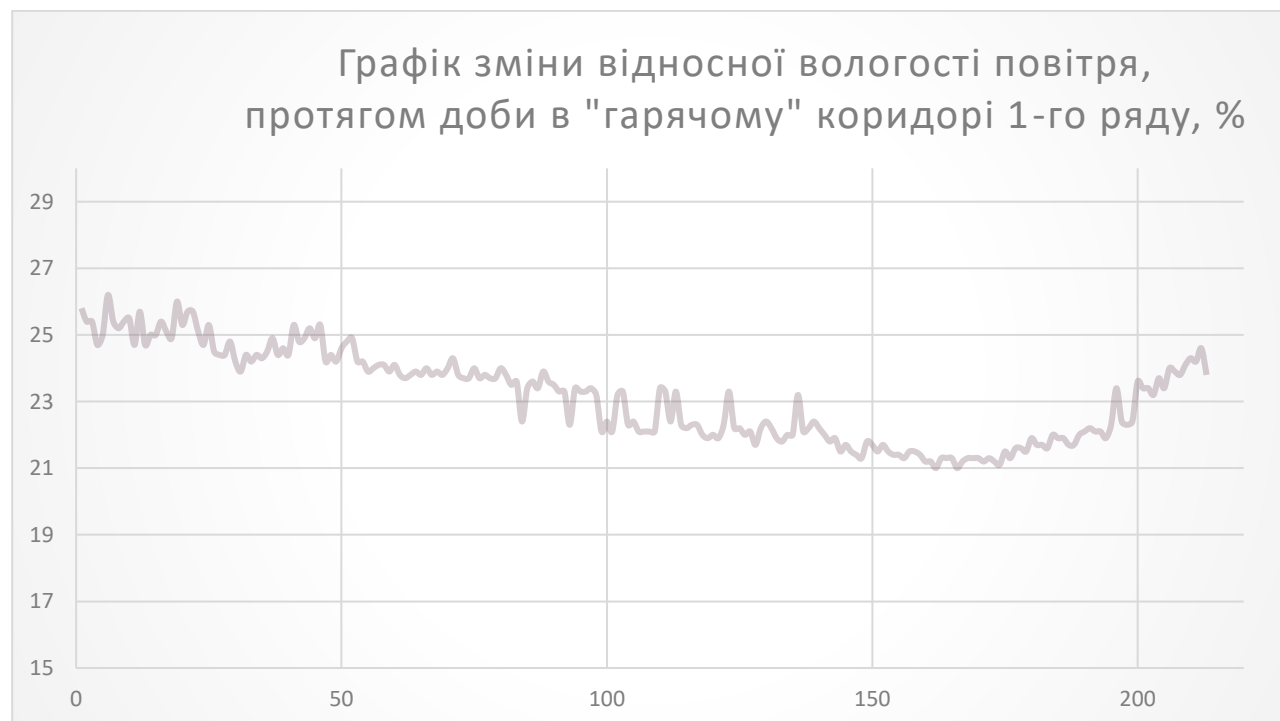


Рис. 2.3.3.



Рис. 2.3.4.



Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Рис. 2.3.5.



Рис. 2.3.6.



Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

00.KMP.142.003.014.ПЗ.

## 2.4. Рекомендації отримані в результаті аудиту

Коефіцієнт використання електричної енергії

$$PUE = 164,91 \text{ кВт/год} / 88,75 \text{ кВт/год} = 1,86$$

Шляхи зменшення коефіцієнту використання електричної енергії:

- усунення нещільностей між шафами технологічного обладнання;
- відокремлення «холодних» коридорів від загального об'єму приміщення за допомогою розсувних систем;
- правильна організація повітряних потоків: забір повітря виконувати з «гарячих» коридорів подачу в «холодні»;
- замінити конденсатори (RAL2300, RAL2300, RAL3600) на нові з ЕС вентиляторами;
- можлива заміна АС вентиляторів внутрішніх блоків кондиціонерів на ЕС (великий термін окупності);
- максимально використовувати режим «free cooling».

Зауваження та рекомендації подані в таблиці 2.4.1.

Таблиця 2.4.1.

№ п.п.	Зауваження	Посилання	Рекомендації
1	Головний прохід при односторонньому розташуванні рядів обладнання повинен бути 1200 мм, фактично проходи 900 мм та 845 мм	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.16. табл. 1	При проектуванні в майбутньому подібних об'єктів та реконструкції діючих дотримуватись норм проектування
2	Прохід між лицьовими боками рядів, за наявності у ряді ввідного обладнання, засобів випробування, дистанційного живлення та перемикання повинен бути 1200 мм, по факту проходи від 690 мм до 1010 мм	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.16. табл. 1	При проектуванні в майбутньому подібних об'єктів та реконструкції діючих дотримуватись норм проектування

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		45

3	Відносна вологість повітря в приміщенні ЛАЦ повинна бути в межах від 50% до 80%, по факту вона становить від 23,2% до 48%, що не входить в межі оптимальних умов для роботи обладнання	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	В приміщенні ЛАЦ№2 встановлені прецизійні кондиціонери, які повинні бути обладнанні системою зволоження повітря, потрібно увімкнути парові зволожувачі в роботу, це підвищить відносну вологість повітря в приміщенні
4	Відсутність системи витяжної вентиляції	Проектна документація 1098Р1/1689-ОВ, арк.5	Встановити витяжний вентилятор В2 та клапан з електроприводом згідно проекту
5	В кондиціонерах К123, К124, К125 в якості холодоагента використовується фреон R22, що згідно Монреальського протоколу 1987 року повинен мати обмежене використання, а з 2020 року не використовуватись взагалі	Монреальський протокол про речовини, що виснажують озоновий шар	Замінити холодоагент
6	Нерівномірність температурних полів по «гарячих» і «холодних» кооридорах	Рис.2.1	Модернізувати розподіл і забір повітря: забір повітря повинен здійснюватись з «гарячих» коридорів, подача в «холодні». Особливо критично «гарячий» коридор 1-го ряду.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

7	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 12.05 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
8	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 09.04 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
9	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 08.01 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
10	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 07.03 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
11	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 07.04 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
12	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 00.04 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
13	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 00.02 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження

14	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 00.03 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
15	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 00.01 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
16	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 06.03 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
17	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 04.05 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження
18	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 01.05 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження, виконати ремонт кондиціонера K128, увімкнути його в роботу, виконати відвід повітря з «гарячого» коридору до кондиціонера K123

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш 48
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

29	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 01.01 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження, виконати ремонт кондиціонера К128, увімкнути його в роботу, виконати відвід повітря з «гарячого» коридору до кондиціонера К123
20	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 01.03 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження, виконати ремонт кондиціонера К128, увімкнути його в роботу, виконати відвід повітря з «гарячого» коридору до кондиціонера К123
21	Спостерігається локальний перегрів обладнання в шафі 01.02 вище 40°C	ГБН В.2.3-34620942-001:2013 ст.20. п. 10.2	Збільшити подачу холодного повітря в дану область для забезпечення охолодження, виконати ремонт кондиціонера К128, увімкнути його в роботу, виконати відвід повітря з «гарячого» коридору до кондиціонера К123

22	Наявність лише системи припливних повітропроводів порушує баланс повітряних потоків «гарячих» та «холодних» коридорів, що викликає перетікання повітря через нещільності між шафами та магістральні коридори та погіршує відведення тепла від обладнання.	Проектна документація 0508/8-0-53/LATS2-OB, арк.3	Ліквідувати зазори між техноллогічними шафами, на холодних коридорах встановити розсувну систему дверей, таким чином магістральні коридори стануть своєрідними повітропроводами для теплого повітря від «гарячих» коридорів до кондиціонерів K123, K124, K125
23	Відсутність резервування циркуляційних насосів K123, K124, K125	Проектна документація 1098P1/1689-OB	Встановити додаткові насоси, які можуть бути або в резерві, або періодично вмикатися для збільшення ресурсу роботи основних насосів.
24	Забруднена теплообмінна поверхня RAL2300, RAL2300, RAL3600 систем K123, K124, K125, яка внаслідок тривалої експлуатації починає руйнуватися	Рис.3.2-3.5	Заміна зовнішніх конденсаторів систем K13, K124, K125
25	Низький рівень мастила в компресорі системи K123		Перевірити рівень мастила, за необхідності додати.
26	Висока температура клеми L1 (71 °C), контактора CV, кондиціонера K123	Рис.3.7	Піджати силові контакти контактора CV
27	Недостача фреону в системі K124	В оглядовому вікні парорідинна суміш	Перевірити кількість фреону, за необхідності додати.

28	Пускач компресора: hager ESD 463 працює з перевантаженням, температура його поверхні 54,3°C; температура експлуатації модульних контакторів hager серії ESD 463 від -10 до 50 °C	Рис.3.9	Замінити пускач на компресор, бажано на силовий, оскільки модульні розраховані на активне навантаження, при використанні їх для двигунів вони швидко виходять з ладу, підгорають і залипають контакти.
29	Відсутність підтримання заданої відносної вологості повітря в приміщенні.	ASHRAE TC 9.9. 2011  ГБН В.2.3-34620942-001:2013	В системах К128-К142 є можливість підключення датчиків відносної вологості та управління паровим зволожувачем, в залежності від типу обладнання, що знаходиться в технологічних шафах в зонах де потрібно підтримувати даний параметр необхідно доукомплектувати системи зволожувачами повітря та датчиками відносної вологості
30	Неробочий компресор системи К132		Замінити на новий
31	Відсутній повітряний фільтр у внутрішньому блоці системи К134		Встановити фільтр

### 3. Теоретичні основи CFD-моделювання та початкові налаштування моделі ЛАЦ

#### 3.1. Порівняльний аналіз Ansys CFX та Fluent для задач моделювання ЛАЦ

В інженерній практиці часто виникає питання вибору інструменту. Обидва пакети, CFX та Fluent, є флагманами компанії Ansys, проте вони мають архітектурні відмінності, що впливають на їх придатність для конкретних задач. Ansys CFX використовує метод контрольних об'ємів, центрованих у вершинах (вузлах) сітки. Контрольні об'єми формуються навколо вузлів шляхом з'єднання центрів елементів та середин ребер (dual mesh approach). Цей підхід забезпечує високу точність на тетраедральних сітках, які часто використовуються для складної геометрії серверних приміщень з великою кількістю дрібних деталей (кабелі, решітки). Ansys Fluent (Cell-Centered) - традиційно використовує підхід, де змінні зберігаються в центрах комірок сітки. Хоча сучасний Fluent підтримує і вузлові схеми, його "рідна" архітектура краще працює на полідральних сітках. Підхід CFX часто дозволяє отримати аналогічну точність на грубіших сітках порівняно з клітинно-центрованим підходом, що економить ресурси при моделюванні великих приміщень.

Алгоритм вирішувача - найважливіша відмінність у контексті даної роботи:

- Ansys CFX (Coupled Solver): Завжди використовує повністю зв'язаний вирішувач, де рівняння імпульсу ( $u, v, w$ ) та неперервності ( $p$ ) вирішуються одночасно в одній великій матричній системі. Це забезпечує надзвичайно високу робастність (стійкість) розрахунку.

- Ansys Fluent (Segregated & Coupled): Історично використовував розділений (segregated) вирішувач (SIMPLE, PISO), де рівняння вирішуються послідовно. Хоча зараз доступний і Coupled вирішувач, CFX був збудований навколо цієї технології від початку.

Задачі з вільною конвекцією (плавучістю) часто є нестабільними для розділених вирішувачів через сильний зв'язок між швидкістю та тиском. Зв'язаний вирішувач CFX набагато краще справляється з великими кроками по часу (Pseudo

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		52

Time Step), дозволяючи швидше досягти збіжності у задачах змішаної конвекції, яка характерна для серверних кімнат (потужні струмені від кондиціонерів + повільний тепловий рух під стелею).

Чому обрано CFX у даній роботі: з огляду на необхідність моделювання складних взаємодій між примусовою вентиляцією та природною конвекцією, а також потребу в стабільній збіжності на складних сітках, вибір CFX є повністю виправданим для аналізу ЛАЦ.

### 3.2. Основні керуючі рівняння та моделі турбулентності

Математичний опис теплових та аеродинамічних процесів у серверному приміщенні лінійно-апаратного цеху (ЛАЦ) є ключовою передумовою для здійснення коректного чисельного моделювання та визначення ефективності системи охолодження. Серверні приміщення характеризуються високою щільністю тепловиділення, складною просторовою структурою потоків, наявністю зон рециркуляції та неоднорідним розподілом температури. Саме тому застосування CFD-моделювання з повним математичним апаратом дає можливість відтворити реальні теплові умови в ЛАЦ, виявити причини локальних перегрівів, оцінити ефективність охолодження і визначити оптимальну конфігурацію керування потоками повітря.

#### 3.2.1. Основні рівняння неперервності та їх роль у моделюванні ЛАЦ

Будь-яке моделювання потоків повітря в серверних приміщеннях базується на законі збереження маси. Рівняння неперервності у загальному вигляді має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (3.1)$$

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – час, с;  $u_i$  – компонент вектора швидкості вздовж осі  $i$  (відповідає  $u_x, u_y, u_z$ ), м/с;  $x_i$  – просторова координата вздовж відповідної осі, м.

Наявність цього рівняння гарантує, що повітряні потоки, які подаються до холодного коридору прецизійними кондиціонерами, зберігають масу в межах усієї

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						53
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислювальної області. У контексті ЛАЦ це особливо важливо, тому що створюються неоднорідні поля швидкості, і невірне виконання рівняння неперервності може призвести до появи штучних джерел чи стоків маси, що викривлятиме реальну структуру потоків.

Порушення неперервності в чисельній моделі може стати причиною суттєвої помилки при визначенні того, чи доходить холодне повітря до інлетів серверів. Саме тому правильне виконання цього рівняння визначає коректність усього CFD-розрахунку.

### 3.2.2. Рівняння руху (Нав'є–Стокса) як основа для відтворення потоків у холодному та гарячому коридорах

Динаміка повітря у серверному приміщенні описується системою рівнянь Нав'є–Стокса, що враховують транспорт імпульсу в'язкою, стисливою або нестисненою рідиною. У повній диференціальній формі ці рівняння записуються як

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i, \quad (3.2)$$

де  $\rho$  – густина рідини (повітря), кг/м<sup>3</sup>;  $u_i$  – компонент швидкості у напрямку, для якого записується рівняння (наприклад, x, y або z), м/с; t – час, с;  $u_j$  – компонент швидкості у напрямку j (індекс підсумовування для конвективного переносу), м/с;  $x_i, x_j$  – просторові координати, м; p – статичний тиск, Па;  $\mu$  – динамічна в'язкість, Па·с;  $S_i$  – додаткові джерела імпульсу та об'ємні сили (наприклад, сила тяги вентиляторів або гравітація), Н/м<sup>3</sup>

У випадку ЛАЦ термін  $S_i$  найчастіше включає вплив сил тяги вентиляторів серверів, які створюють спрямовані потоки через серверні модулі. З математичної точки зору це джерело імпульсу дозволяє правильно змоделювати інтенсивність та напрям витрати гарячого повітря з серверів у гарячий коридор.

Утворення завихрень, рециркуляції, підйомних потоків та зон з мінімальними швидкостями напряму залежить від правильності розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса. Саме ці процеси визначають, чи відбуватиметься небажане змішування

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
						54
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



безрозмірне;  $k$  – кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $P_k$  – генерація турбулентної енергії,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^3)$ ;  $C_{2\varepsilon}$  – друга емпірична константа моделі (зазвичай  $\approx 1.92$ ), безрозмірне.

Ця модель дозволяє виявити складні вихрові структури, які виникають у верхній частині стійок, де гаряче повітря, що піднімається, часто перекручується у завихрення, спрямовані назад у холодний коридор. Саме неправильне моделювання турбулентності є найчастішою причиною помилки при прогнозуванні локальних перегрівів.

### 3.2.4. Модель SST як точніший підхід у критичних ділянках

У тих зонах ЛАЦ, де виникають різкі градієнти швидкості — наприклад, у вузьких коридорах між серверними стійками більш доцільною є модель SST. Її особливість полягає в поєднанні моделей  $k$ - $\varepsilon$  та  $k$ - $\omega$ , що забезпечує коректне моделювання як біля стінок, так і у вільній течії.

Для повноти математичного апарату наводяться рівняння SST. Перше описує транспорт  $k$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (3.5)$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $k$  – кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $u_j$  – компонент вектора швидкості,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $x_j$  – просторова координата,  $\text{м}$ ;  $P_k$  – генерація (утворення) турбулентної кінетичної енергії,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^3)$ ;  $\beta^*$  – емпірична константа моделі (зазвичай  $\approx 0.09$ ), безрозмірна;  $\omega$  – питома швидкість дисипації турбулентності (частота турбулентних пульсацій),  $1/\text{с}$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість (молекулярна),  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\sigma_k$  – турбулентне число Прандтля для  $k$  (коефіцієнт дифузії), безрозмірне;  $\mu_t$  – турбулентна (вихрова) в'язкість,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

друге описує транспорт  $\omega$ :

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (3.6)$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\omega$  – питома швидкість дисипації (частота турбулентності),  $1/\text{с}$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $u_j$  – компонент швидкості,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $x_j$  – просторова

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		56

координата, м;  $\gamma$  – коефіцієнт моделі для генерації  $\omega$  безрозмірний;  $\nu_t$  – кінематична турбулентна в'язкість ( $\mu_t / \rho$ ), м<sup>2</sup>/с;  $P_k$  – генерація турбулентної кінетичної енергії, кг/(м·с<sup>3</sup>);  $\beta$  – коефіцієнт дисипації  $\omega$ , безрозмірний;  $\mu$  – динамічна в'язкість, Па·с;  $\sigma_\omega$  – турбулентне число Прандтля для  $\omega$ , безрозмірне;  $\mu_t$  – турбулентна динамічна в'язкість, Па·с;  $F_1$  – функція змішування (blending function), що перемикає модель між режимами  $k - \omega$  та  $k - \epsilon$ , безрозмірна (від 0 до 1);  $\sigma_{\omega 2}$  – константа для перехресної дифузії, безрозмірна;  $k$  – кінетична енергія турбулентності, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Вибір моделі турбулентності Shear Stress Transport (SST) для чисельного дослідження процесів в лінійно-апаратному цеху обумовлений її високою точністю при розрахунку течій зі значними градієнтами тиску та швидкості, що є характерним для щільно заповнених серверних приміщень. Оскільки геометрія ЛАЦ передбачає наявність вузьких коридорів між рядами обладнання та зон складної рециркуляції повітря, використання стандартних двопараметричних моделей, таких як  $k-\epsilon$ , може призвести до неточного прогнозування відриву пограничного шару, особливо на ребрах стійок та в зонах змішування холодних і гарячих потоків. Модель SST, розроблена Ментером, вирішує цю проблему шляхом застосування гібридного підходу: у пристінній області вона використовує рівняння  $k - \omega$  для безпосереднього інтегрування крізь в'язкий підшар без необхідності застосування складних демпфуючих функцій, тоді як у зоні вільної течії автоматично перемикається на модель  $k-\epsilon$  за допомогою спеціальної функції змішування (blending function), що робить розрахунок нечутливим до значень турбулентних характеристик на вході в домен. Критичною перевагою SST для даної задачі є модифікована формула розрахунку турбулентної в'язкості, яка враховує перенос дотичних напружень турбулентності, що запобігає нефізичному наростанню рівня турбулентної енергії в зонах гальмування потоку, наприклад, перед фронтальними панелями серверних шаф. В умовах відсутності фальшпідлоги, коли розподіл повітря здійснюється через систему кондиціонування безпосередньо в об'єм приміщення, точне відтворення структури вихорів та зон

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		57

застою є визначальним для ідентифікації локальних перегрівів обладнання, що робить модель SST найбільш збалансованим інструментом з точки зору співвідношення обчислювальних витрат та вірогідності отриманих результатів розподілу температурних полів.

### 3.2.5. Математика деформування сітки та її роль у моделюванні ЛАЦ

Окрему групу складають рівняння для обчислювальної сітки. Вони дозволяють адаптувати геометрію до складних конструктивних елементів. Основне рівняння для переміщення вузлів сітки має вигляд [15, с. 53]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial x_i}{\partial x_j} \right) = 0,, \quad (3.7)$$

а гранична умова [15, с. 54]

$$x_i = x_i^{wall}.$$

де  $x_i$  – координата (або переміщення) вузла обчислювальної сітки вздовж осі  $i$ , м;  $x_j$  – просторова координата, м;  $\mu$  – коефіцієнт дифузії сітки (або жорсткість сітки), який визначає, як деформація границі поширюється всередину області (часто залежить від оберненого об'єму комірки), умовна одиниця;  $x_i^{wall}$  – задана координата положення граничної поверхні (стінки), м.

У контексті ЛАЦ рух сітки потрібний у тих випадках, коли проводиться аналіз різних конфігурацій обладнання або перфорованих плит без повного регенерування обчислювальної області. Це прискорює дослідження та дозволяє швидко оцінювати вплив конструктивних змін.

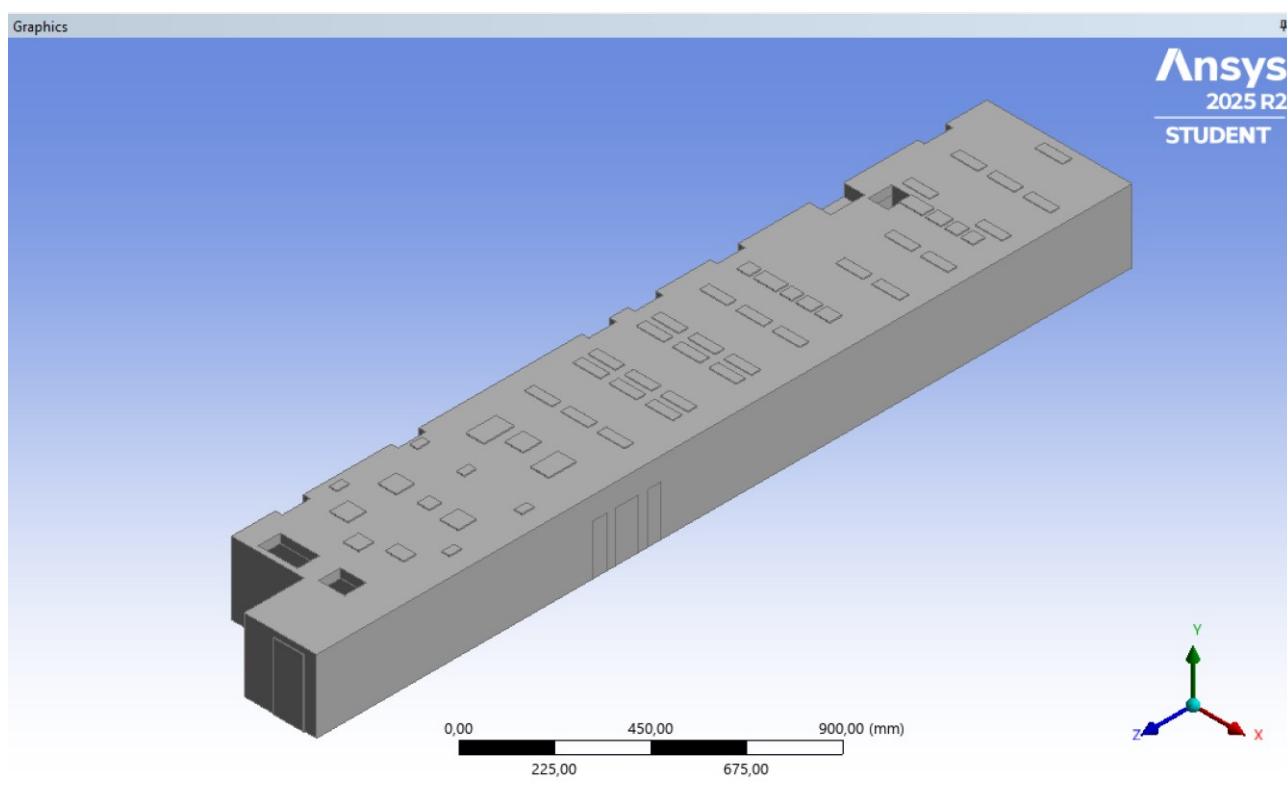
### 3.3. Параметризація задачі та налаштування фізики процесу в середовищі ANSYS CFX

Процес побудови математичної моделі лінійно-апаратного цеху вимагав детального опрацювання етапів препроцесингу, починаючи від адаптації геометрії і закінчуючи тонким налаштуванням вирішувача. Першочерговим завданням стало створення тривимірної геометричної моделі приміщення, яка б відповідала

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						58
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

наявним обчислювальним ресурсам. Оскільки для виконання дослідження використовувалася студентська версія програмного комплексу ANSYS із вбудованим обмеженням на розмір розрахункової сітки до одного мільйона елементів, моделювання приміщення в натуральну величину із необхідною деталізацією було технічно неможливим. Для вирішення цієї проблеми було застосовано метод геометричного масштабування, в результаті чого модель була зменшена у співвідношенні 1:10.

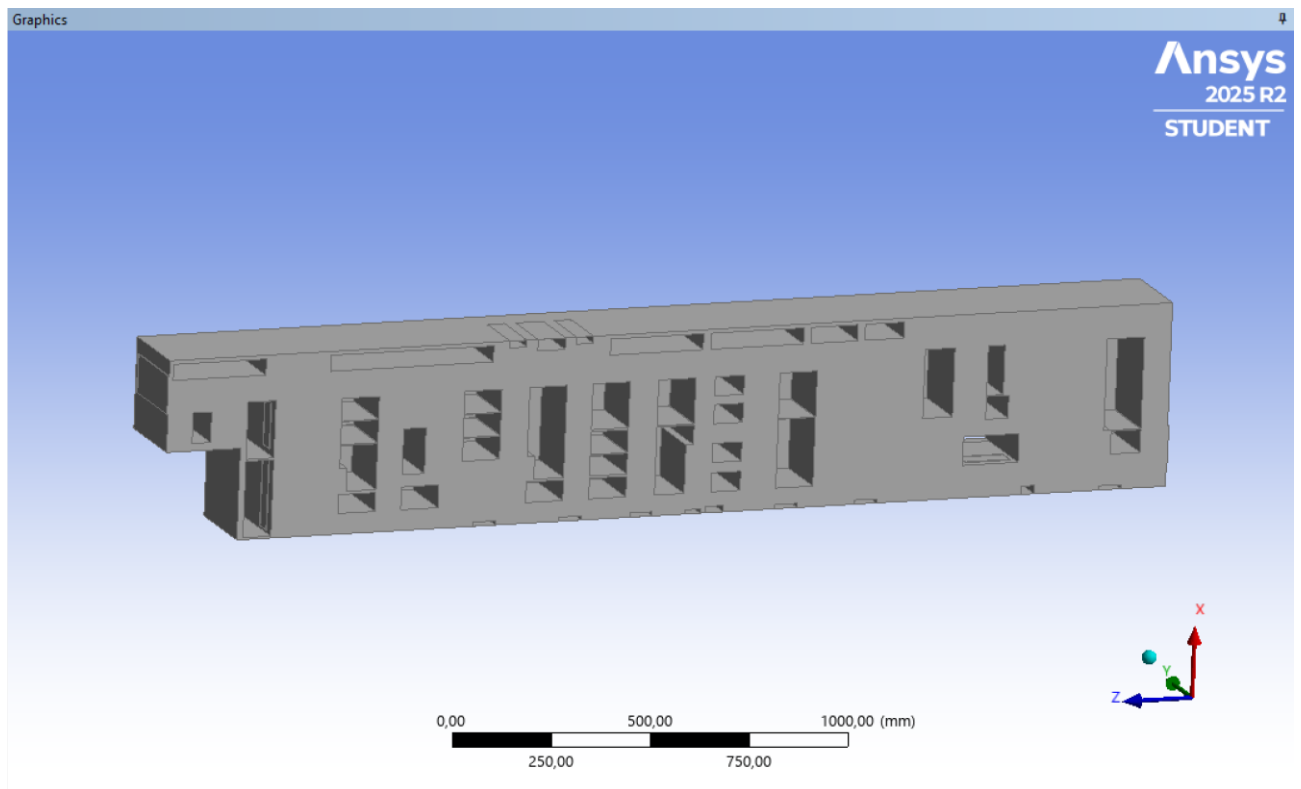
Такий підхід дозволив зберегти топологічну подібність течій та архітектуру приміщення, при цьому забезпечивши можливість використання достатньо щільної сітки для коректного розрахунку градієнтів температур та швидкостей. Сама геометрія була спрощена до рівня основних аеродинамічних перешкод: серверні шафи представлені як об'єми, видавлені з нижньої площини, що створюють опір руху повітря, тоді як решітки систем кондиціонування змодельовані на верхній площині як поверхні входу холодного потоку. Загальний вигляд розробленої твердотільної моделі представлено на рисунку нижче.



*Рис. 3.3.1. Геометрична модель приміщення ЛАЦ (твердотільна модель)*

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		59

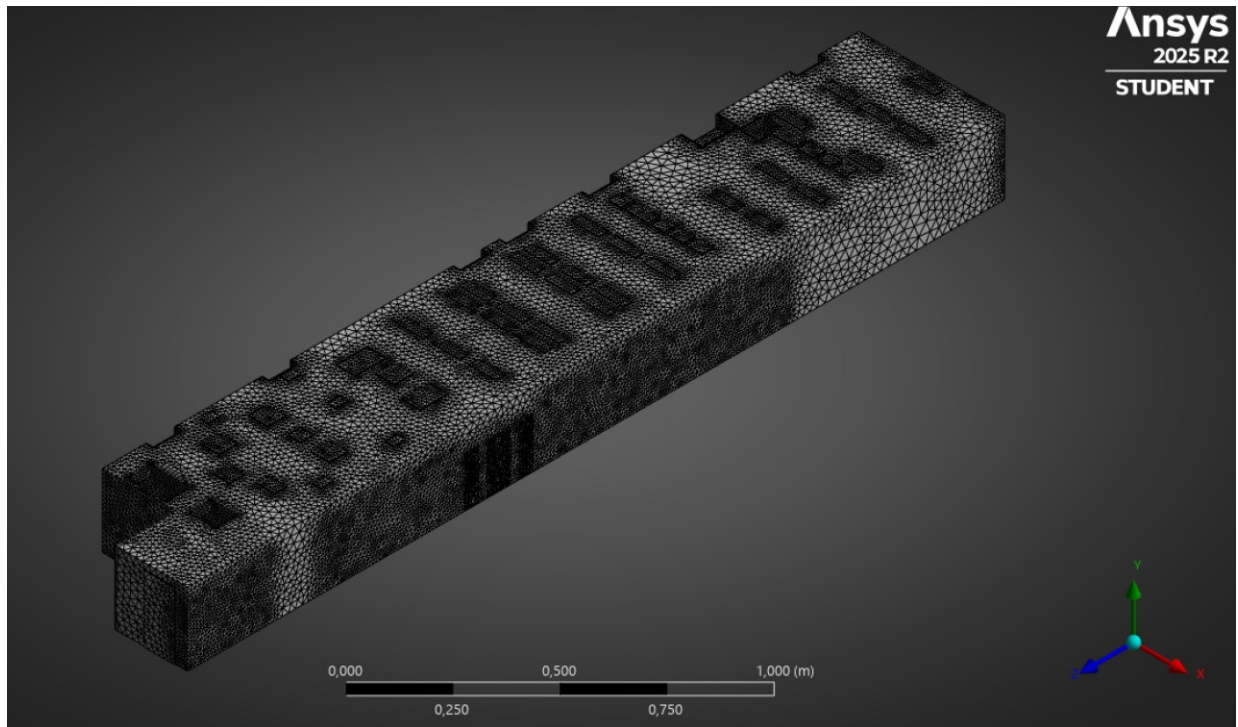
Детальніше розташування зон, що імітують серверне обладнання, та архітектуру коридорів можна побачити на вигляді знизу моделі.



*Рис. 3.3.2. Геометрична модель із позначенням зон розташування стійок (вигляд знизу)*

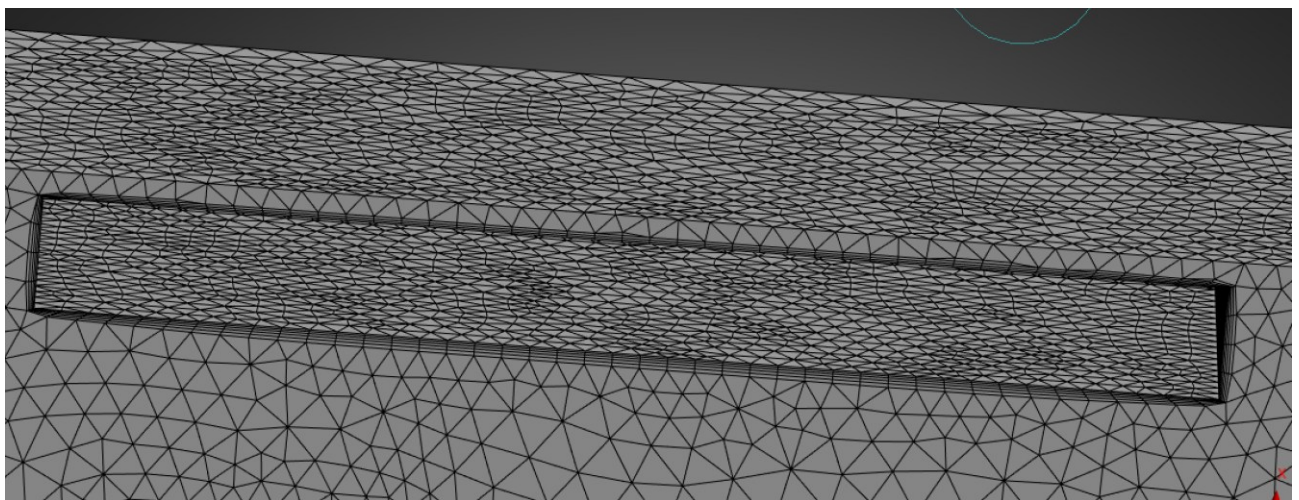
Наступним критичним етапом стала дискретизація розрахункової області, тобто побудова скінченно-елементної сітки, якість якої безпосередньо визначає точність отриманих результатів. Для забезпечення коректної роботи турбулентних моделей було застосовано спеціалізовані інструменти локального керування параметрами сітки. Зокрема, для поверхонь, що обтікаються повітрям (стінки серверних шаф, підлога), було використано інструмент **Inflation**. Це дозволило створити пристінні шари призматичних комірок, які необхідні для правильного розрахунку пограничного шару, де відбуваються найінтенсивніші процеси тертя та теплообміну.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		60



*Рис. 3.3.3. Загальний вигляд розрахункової сітки*

Водночас, у зонах із високими градієнтами швидкості — на поверхнях входу повітря з кондиціонерів та забору повітря в обладнання — було застосовано функцію **Face Sizing** (локальне подрібнення). Це дало змогу значно зменшити розмір комірки в цих критичних зонах, забезпечивши точне відтворення профілю повітряних струменів, що було б неможливим при використанні рівномірної грубої сітки. Деталізація сітки поблизу стінок показана на наступному рисунку.



*Рис. 3.3.4. Деталізація сітки з використанням інструменту Inflation біля стінок*

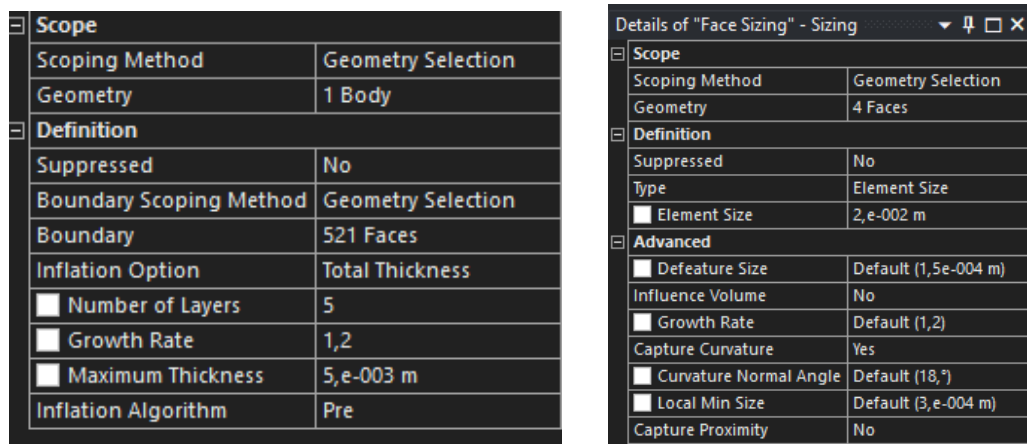


Рис. 3.3.5. Дерево налаштувань інструментів Sizing та Inflation

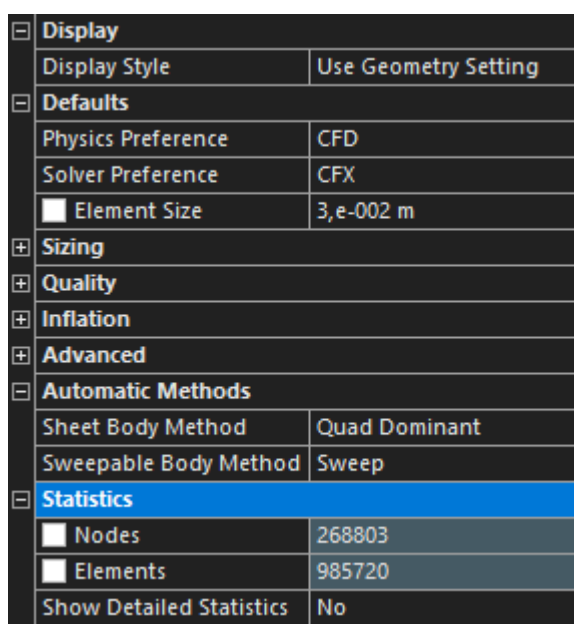


Рис. 3.3.6. Дерево налаштувань Mesh

Налаштування фізики процесу в препроцесорі CFX-Pre базувалося на необхідності відтворення реальної динаміки повітряних мас. На відміну від стаціонарних постановок (Steady State), для даного дослідження було обрано тип аналізу **Transient** (нестационарний). Це рішення обумовлене тим, що повітряні потоки в серверних приміщеннях часто мають складну вихрову структуру, яка змінюється в часі, і стаціонарний розрахунок міг би "згладити" ці коливання, втративши важливі деталі про зони рециркуляції. Загальний час моделювання було визначено як 60 секунд із кроком за часом (Time Step) 0,1 с, що згідно з числом Куранта є достатнім для стабільного розрахунку перехідних процесів у масштабованій моделі.

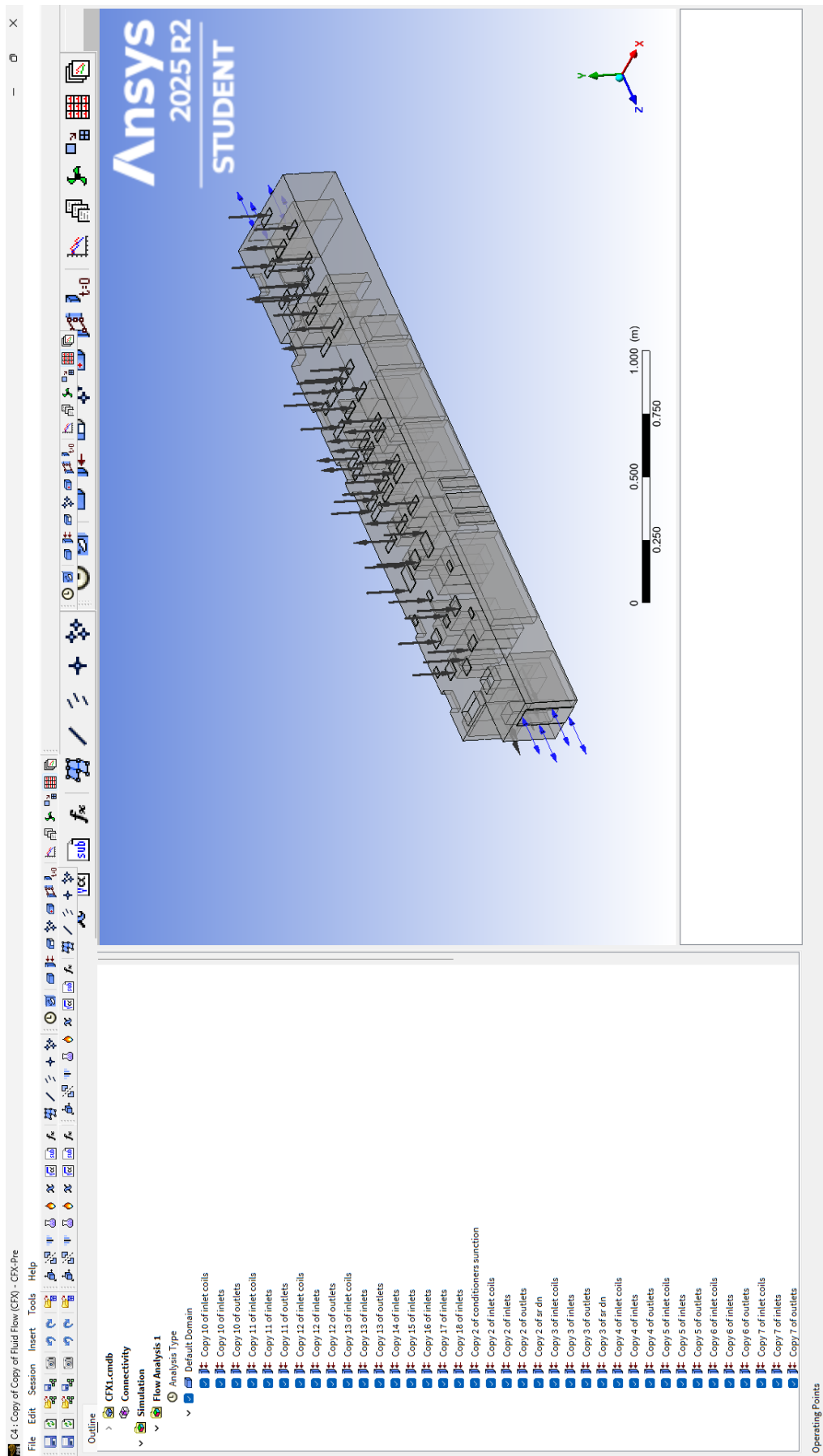
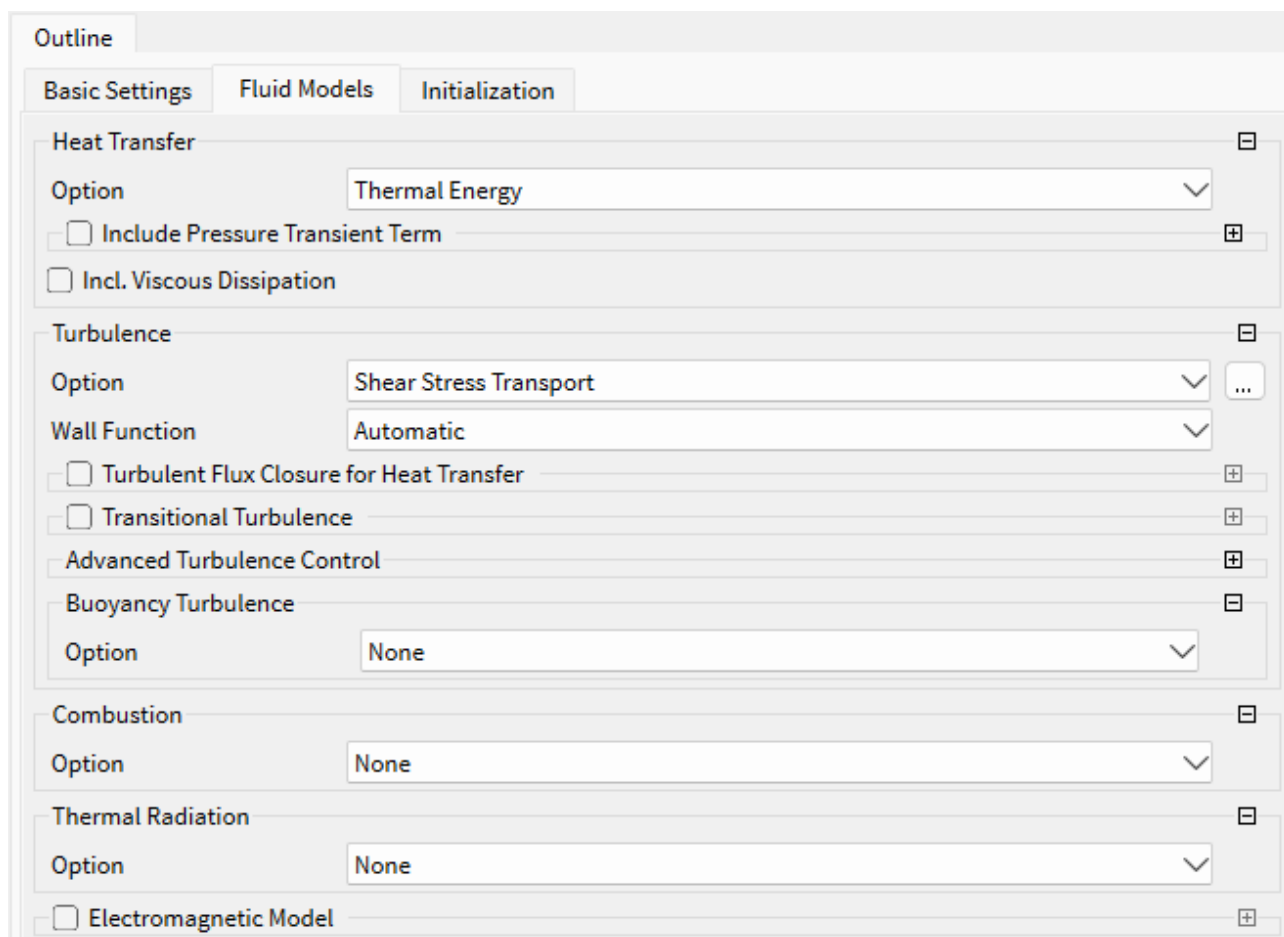


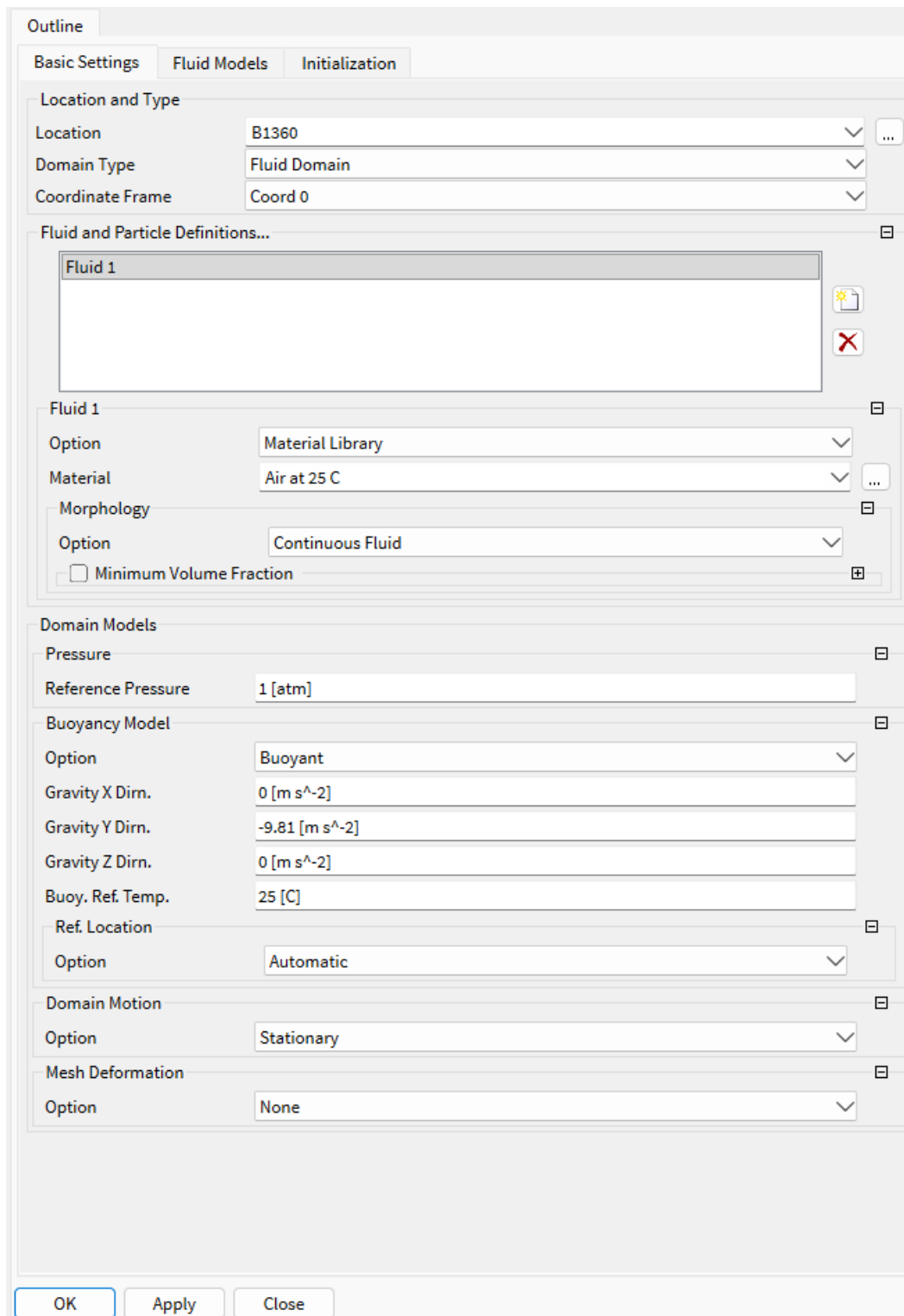
Рис. 3.3.7. Налаштування отворів outlet та inlet в середовищі CFX-Pre

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

Вибір математичної моделі турбулентності є одним із найважливіших рішень при CFD-моделюванні. Для задач вентиляції серверних приміщень стандартна  $k - \epsilon$  модель часто виявляється недостатньо точною, оскільки вона погано передбачає відриви потоку на гострих кутах стійок та поведінку струменів, що вдаряються об перешкоди. Тому в даній роботі було застосовано модель **Shear Stress Transport (SST)**. Вона поєднує переваги  $k - \epsilon$  моделі у вільному потоці та  $k - \omega$  моделі в пристінній області, забезпечуючи високу точність прогнозування зон аеродинамічних тіней та локальних завихрень, які і є основними причинами перегріву обладнання. Конфігурація налаштувань у дереві проекту наведена на рис. 3.3.8. та рис.3.3.9.



*Рис. 3.3.8. Дерево налаштувань фізики та параметрів розрахунку в середовищі CFX-Pre*



*Рис. 3.3.9. Дерево налаштувань фізики та параметрів розрахунку в середовищі CFX-Pre (продовження)*

Особливу увагу було приділено налаштуванням обчислювача (Solver) для забезпечення мінімізації похибок. У меню **Define Run** було активовано опцію подвійної точності (**Double Precision**). Це налаштування є критично важливим для

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

задач аеродинаміки приміщень, оскільки перепади тиску, що рухають повітря, є відносно малими (в діапазоні десятків паскалів), і використання стандартної одинарної точності могло б призвести до накопичення помилок округлення та, як наслідок, до розбіжності розв'язку або отримання фізично некоректних результатів. Для оптимізації часу розрахунку було задіяно технологію паралельних обчислень у режимі **Intel MPI Local Parallel**, що дозволило розподілити обчислювальне навантаження між фізичними ядрами процесора, значно прискоривши отримання результатів.

Контроль завершення розрахунку здійснювався за рівнем нев'язок (residuals) — величин, що характеризують похибку виконання законів збереження маси та імпульсу. Аналіз графіку збіжності, наведеного нижче, показав, що ітераційний процес стабілізувався на позначці 200 ітерацій. Саме на цьому етапі середньоквадратичні нев'язки (RMS) опустилися нижче порогового значення  $10^{-4}$ , що є загальноприйнятим стандартом у інженерному моделюванні. Досягнення такої глибини збіжності свідчить про те, що отримана система рівнянь розв'язана коректно, баланси маси та енергії дотримані, а результати моделювання можна вважати валідними для подальшого аналізу.

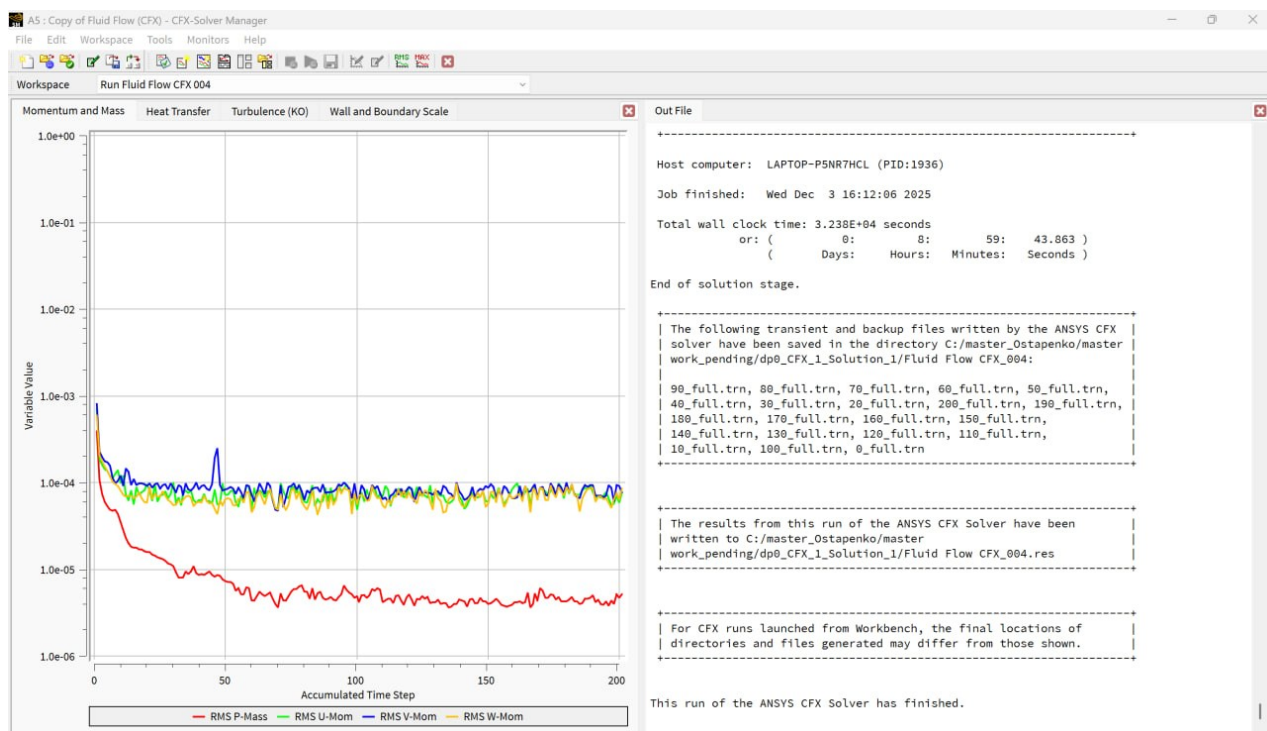


Рис. 3.3.10. Графік збіжності ітераційного процесу (Residuals)

#### 4. Результати CFD-моделювання повітряних потоків в середовищі Ansys CFX

Чисельне моделювання аеродинаміки приміщення лінійно-апаратного цеху (ЛАЦ) дозволило отримати детальну тривимірну картину розподілу повітряних потоків, що є недосяжним при використанні традиційних методів точкових вимірювань анемометром. Аналіз результатів проводився шляхом дослідження полів швидкості та тиску в контрольних перерізах, які є критичними для експлуатації серверного обладнання. Отримана візуалізація демонструє складну структуру течії, яка формується під дією примусової конвекції від прецизійних кондиціонерів та теплових плюмів від нагрітого обладнання.

На висоті 1,5 метра, що відповідає геометричному центру теплового навантаження більшості серверних шаф та рівню розташування найбільш критичного активного обладнання, аеродинамічна картина характеризується значною стохастичністю. Як видно з рисунка 4.1, простір приміщення чітко фрагментується на зони активної аерації та зони стагнації.

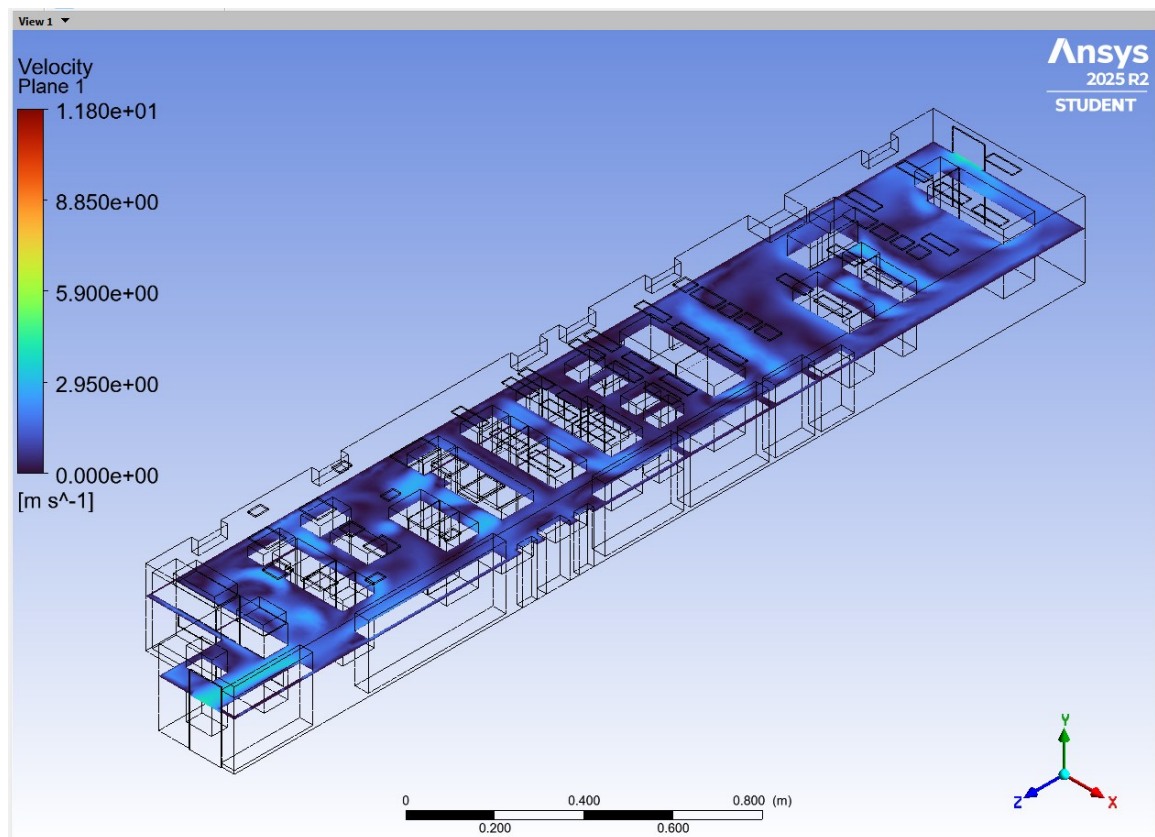


Рис. 4.1. Розподіл поля швидкостей повітря на висоті 1,5 м

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		67

У ділянках, що знаходяться на осі видуву основних кондиціонерів, швидкість потоку досягає значень 3,8–5,7 м/с (відображені зеленим та жовтим кольором), що забезпечує інтенсивний теплообмін. Проте в периферійних зонах, зокрема в області розташування 1-го та 12-го рядів обладнання, фіксується критичне падіння швидкості до значень 0,1–0,5 м/с (темно-сині зони). Така «аеродинамічна тінь» є наслідком затухання енергії струменя на відстані, а також екранування потоку масивом інших стійок. Фактично, на цій висоті в проблемних рядах відсутній організований рух повітря, що робить конвективний теплообмін неефективним.

Розподіл потоків на рівні 0,5 метра від підлоги (Рис. 4.2) є індикатором ефективності надходження холодного повітря до нижніх юнітів стійок, де часто розміщуються джерела безперебійного живлення (ДБЖ) та важкі сервери.

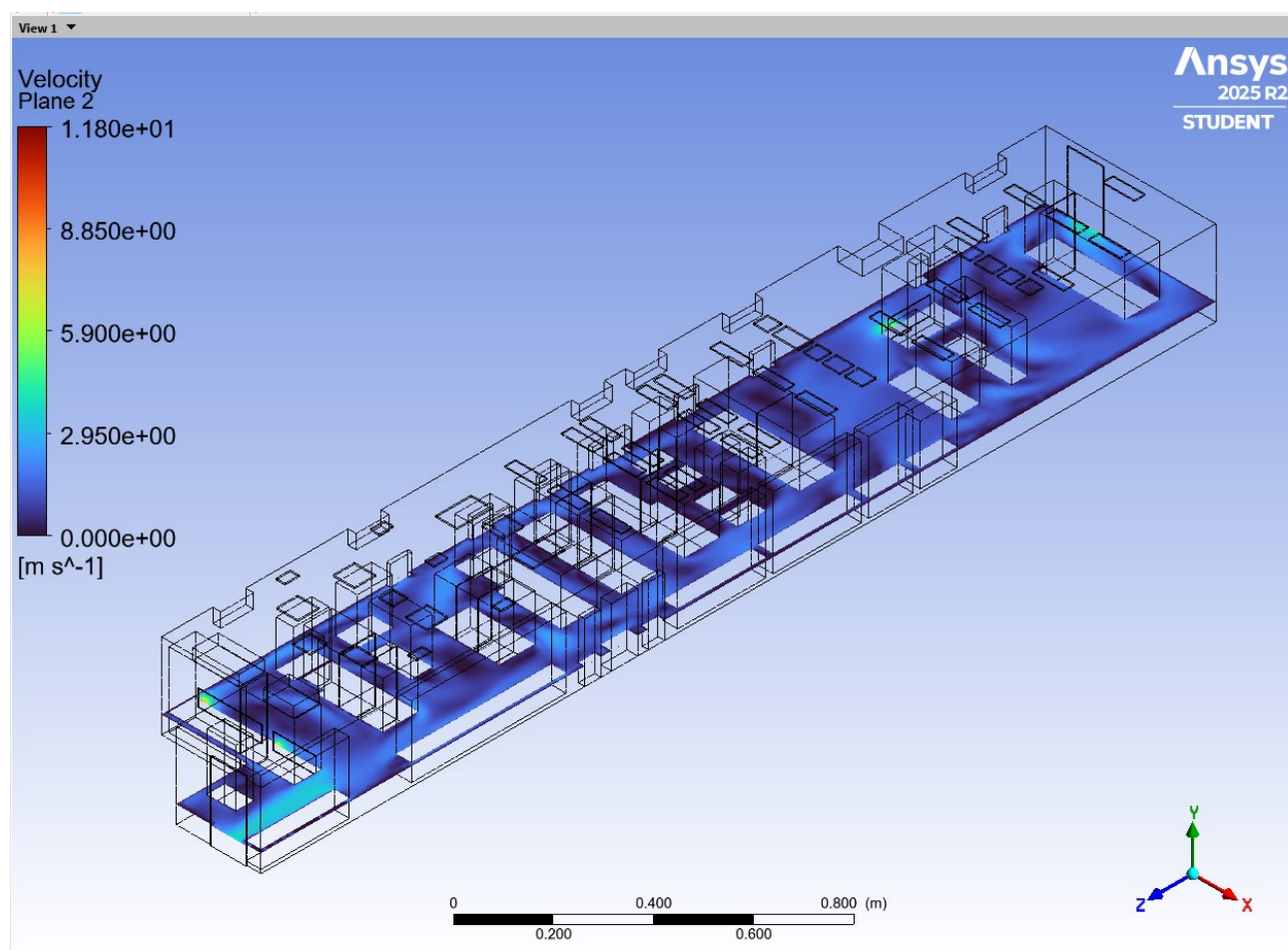
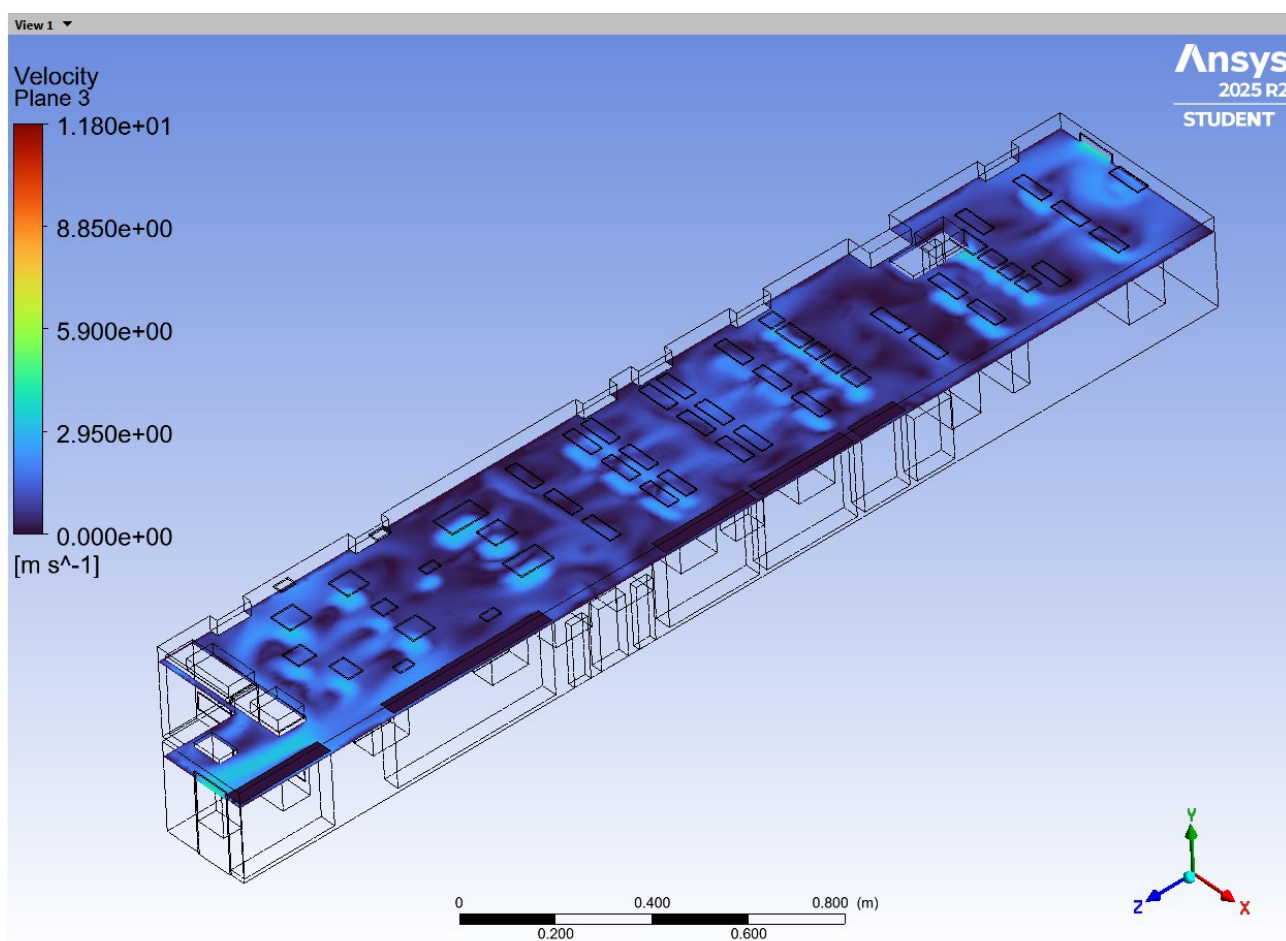


Рис. 4.2. Розподіл поля швидкостей повітря на висоті 0,5 м

Моделювання виявило наявність обширних застійних зон у проходах між рядами на цьому рівні. Низька кінетична енергія потоку біля підлоги свідчить про те, що холодне повітря, яке подається кондиціонерами з верхньої зони, не має достатнього імпульсу, щоб "пробити" теплову подушку і опуститися до самого низу. Це створює ризик перегріву обладнання, встановленого в нижній частині шаф, оскільки забір повітря відбувається з перегрітого середовища без притоку свіжої холодної маси.

У верхній зоні приміщення на висоті 2,0 м, де розташовані решітки кондиціонерів та спліт-систем, спостерігається найбільш динамічна картина, представлена на рисунку 4.3.



*Рис. 4.3. Розподіл поля швидкостей повітря на висоті 2,0 м*

Візуалізація демонструє високошвидкісні струмені, що виходять із решіток кліматичної техніки. Проте векторний аналіз показує, що значна частина цих струменів розсіюється у вільному об'ємі над стійками, не досягаючи цільових

"холодних" коридорів. Відсутність напрямних конструкцій призводить до того, що холодне повітря змішується з теплим повітрям, що піднімається від серверів, ще до моменту виконання корисної роботи охолодження. Це явище термічного "короткого замикання" (short cycling) є основною причиною енергетичних втрат.

Поперечний переріз приміщення (Рис. 4.4) дозволяє оцінити структуру макровихрових утворень та загальну циркуляцію. На розрізі чітко ідентифікуються великі рециркуляційні комірки. Видно, як висхідні конвективні потоки від нагрітого обладнання стикаються з низхідними потоками від кондиціонерів, утворюючи зони турбулентного перемішування. Замість формування чіткого контуру "джерело холоду – споживач – джерело холоду", повітря циркулює по замкнених траєкторіях у верхній частині залу. Це підтверджує неефективність поточної схеми організації повітрообміну без фізичного розділення потоків.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		70

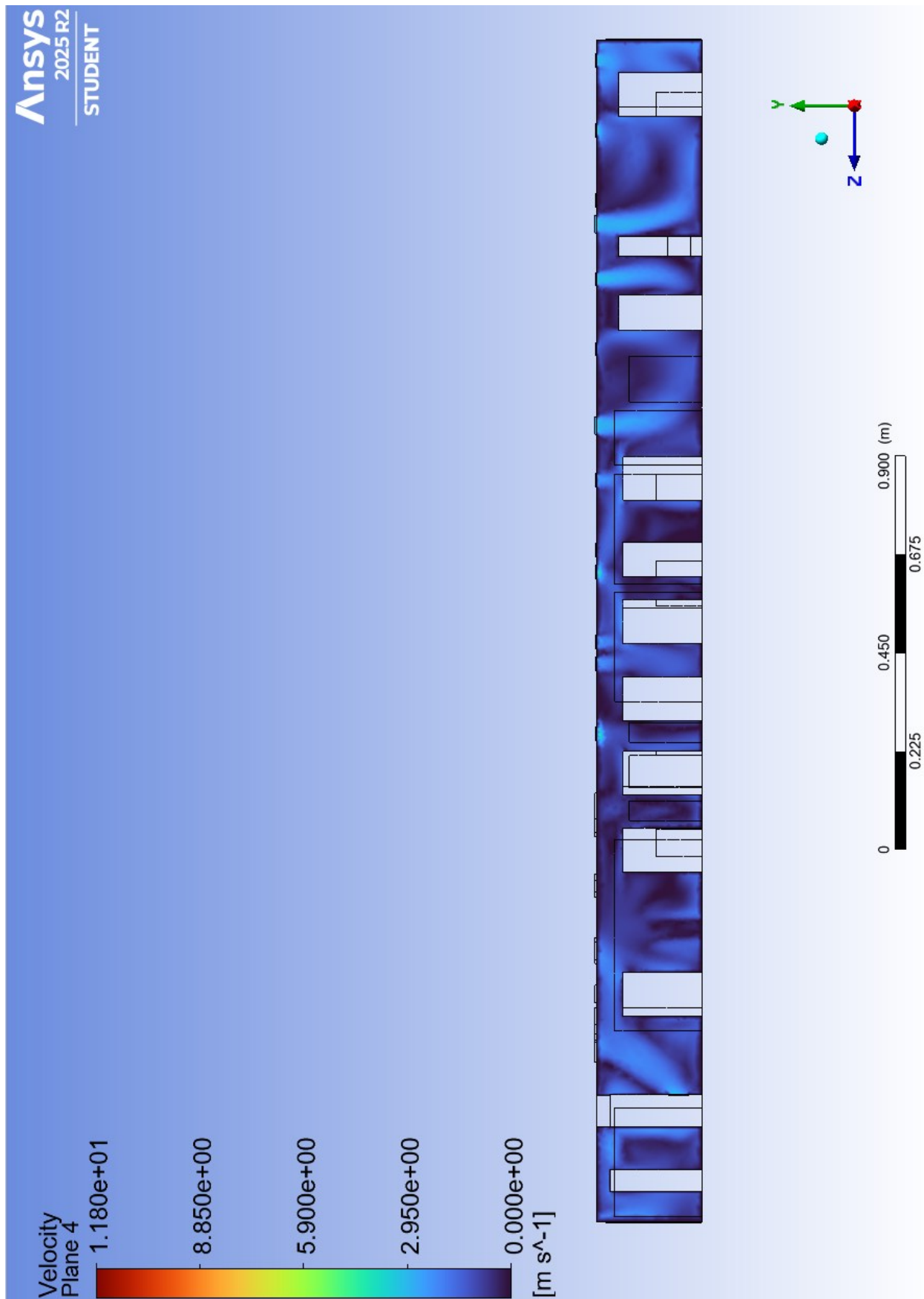


Рис. 4.4. Поперечний розріз приміщення ЛАЦ: вектори швидкості та контури

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

## 5. Порівняльний аналіз результатів аудиту та чисельного моделювання (CFD) ЛАЦ

Нижче наведено зіставлення емпіричних даних, отриманих під час фізичних вимірювань, із розрахунковими даними математичної моделі, що дозволило верифікувати причини неефективності системи охолодження.

### 1. Нерівномірність температурного поля

**Результат аудиту:** Інструментально зафіксовано значну гетерогенність температурного поля. Виявлено критичні зони перегріву в 1-му ряду («гарячий» коридор), де температура досягає 29,8 °C при нормі до 27 °C, а також локальні перегріву окремих серверних шаф.

**Результат моделювання:** Розрахункова модель підтвердила кореляцію між зонами перегріву та зонами низької швидкості руху повітря (аеродинамічними тінями). Візуалізація довела, що причиною підвищеної температури є не дефіцит холодопродуктивності, а відсутність конвективного теплообміну через нульову швидкість потоку в проблемних точках.

### 2. Аеродинаміка повітряних потоків (Bypass Airflow)

**Результат аудиту:** Виявлено наявність фізичних щілин між шафами та непрямі ознаки змішування повітряних мас (нерівномірність показників вологості та температури в магістральних проходах).

**Результат моделювання:** CFD-моделювання візуалізувало процес розсіювання кінетичної енергії потоку. Замість ламінарного руху спостерігається хаотична турбулентність, внаслідок якої холодне повітря змішується з нагрітим ще до входу в повітрязабірники серверного обладнання, що суттєво знижує ККД системи.

### 3. Ефективність використання потужності та робота обладнання

**Результат аудиту:** Розрахунки показали наявність значного запасу холодної потужності (PUE = 1.86), однак фактичне охолодження залишається

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		72

неефективним. Увімкнення допоміжних спліт-систем не призводило до лінійного зниження температури.

**Результат моделювання:** Виявлено явище «short cycling» (циркуляція повітря вхолосту) та конфлікт потоків. Модель показала, що зустрічні потоки від основних прецизійних кондиціонерів та допоміжних спліт-систем гасять швидкість один одного, утворюючи зони стагнації та «повітряні пробки», які неможливо виявити точковими анемометрами.

#### 4. Організація повітрообміну та архітектурні рішення

**Результат аудиту:** Встановлено невідповідність схеми забору повітря (фронтальні решітки) та рекомендовано впровадження системи ізоляції коридорів.

**Результат моделювання:** Підтверджено критичність проблеми фронтального забору, що створює турбулентність і «замикає» гаряче повітря біля стійок. Моделювання також математично обґрунтувало неефективність виключно налаштувань обладнання без встановлення фізичних бар'єрів (containment), оскільки лише фізична ізоляція здатна забезпечити необхідний перепад тиску для проходження повітря через сервери.

Підсумовуючи результати верифікації, слід зазначити, що інтеграція інструментального аудиту з CFD-моделюванням дозволила перейти від констатації симптомів перегріву до точного визначення фізичних першопричин неефективності дата-центру. Якщо емпіричні виміри лише зафіксували температурні аномалії та високий PUE на тлі надлишку потужності, то математична модель розкрила приховану механіку цих процесів: наявність масштабних зон аеродинамічної тіні та критичну турбулентність, яка нівелює роботу кліматичного обладнання. Визначальним стало виявлення деструктивного впливу допоміжних спліт-систем, зустрічні потоки яких блокують нормальну циркуляцію повітря, створюючи невидимі для точкових датчиків зони стагнації. Цей комплексний аналіз остаточно спростував гіпотезу про дефіцит

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
						73
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

холодопродуктивності та довів безперспективність виключно програмних налаштувань обладнання. Результати дослідження безапеляційно вказують, що поточна архітектура повітрообміну є фундаментально неефективною через фронтальний забір повітря та відсутність бар'єрів. Отже, єдиним валідним інженерним рішенням є впровадження фізичної системи ізоляції коридорів, що дозволить впорядкувати аеродинаміку, ліквідувати ефект змішування потоків та конвертувати наявний енергетичний потенціал системи у стабільний температурний режим для ІТ-обладнання.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		74

## 6. Висновки

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення енергоефективності системи охолодження лінійно-апаратного цеху (ЛАЦ) шляхом комплексної оптимізації аеродинаміки повітряних потоків. Проведене дослідження наочно продемонструвало необхідність поєднання натурних вимірювань із чисельним моделюванням для об'єктів з високою щільністю тепловиділень.

### 1. Обґрунтування необхідності комплексного підходу (Аудит + CFD)

Результати роботи довели, що традиційний інструментальний аудит дозволяє зафіксувати лише наслідки неефективності (локальні перегріву, високий PUE), тоді як CFD-моделювання розкриває фізику процесів, що їх спричиняють.

- Інструментально було зафіксовано парадокс: при значному надлишку сумарної холодопродуктивності ( $PUE = 1,86$ ) в серверних шафах спостерігаються критичні температури до  $57,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ряд 1).

- Математичне моделювання в середовищі Ansys CFX дозволило виявити причину цього явища — наявність масштабних зон аеродинамічної тіні (швидкість повітря  $< 0,5\text{ м/с}$ ) та рециркуляційних вихорів, які блокують доступ холодного повітря до обладнання.

- Встановлено, що зустрічні потоки від основних прецизійних кондиціонерів та допоміжних спліт-систем гасять швидкість один одного, створюючи зони стагнації, що неможливо було виявити без побудови векторних полів швидкостей.

**2. Скорельовані заходи з підвищення ефективності** На основі верифікації даних аудиту результатами моделювання розроблено комплекс технічних рішень для модернізації системи охолодження:

#### 2.1. Архітектурно-планувальні рішення (Аеродинаміка):

- **Впровадження ізоляції коридорів (Containment):** Необхідно фізично відокремити «холодні» коридори від загального об'єму приміщення за допомогою розсувних систем. Це дозволить створити необхідний перепад тиску для проходження повітря крізь сервери та усуне ефект змішування

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		75

потоків, підтверджений моделлю.

- **Герметизація стійок:** Ліквідація щілин між шафами та монтаж заглушок (blanking panels) у вільних юнітах для запобігання паразитному перетіканню (bypass airflow) повітря, яке було ідентифіковано як одна з причин низької ефективності.

## 2.2. Технічні рішення (Обладнання):

- **Зміна логіки повітрообміну:** Необхідно змінити схему циркуляції: забір гарячого повітря має здійснюватися безпосередньо з «гарячих» коридорів, а подача — виключно в ізольовані «холодні». Поточна схема з фронтальним забором повітря кондиціонерами є неефективною, оскільки створює турбулентність безпосередньо в зоні обслуговування серверів.

- **Усунення конфлікту обладнання:** Рекомендовано виконати переміщення або переналаштування спліт-систем (зокрема K128), які наразі створюють аеродинамічний опір для потоків від основних кондиціонерів, спричиняючи локальні перегриви в рядах 01.01–01.05.

- **Модернізація компонентів:** Заміна зовнішніх конденсаторів (RAL2300/3600) на нові моделі з енергоефективними ЕС-вентиляторами та перехід на використання холодоагентів, що відповідають сучасним екологічним нормам (заміна R22).

## 2.3. Експлуатаційні заходи:

- **Відновлення вологісного режиму:** Введення в експлуатацію парових зволожувачів для підняття відносної вологості з поточних 23,2%–48% до нормативних 50%–80%, що знизить ризик електростатичних розрядів.

- **Максимізація режиму Free Cooling:** Використання гліколевих контурів (Free Cooling) при температурах зовнішнього повітря нижче +15 °C дозволить суттєво зменшити енергоспоживання компресорів.

Реалізація запропонованих заходів дозволить знизити коефіцієнт PUE з поточного рівня 1,86, ліквідувати аварійні температурні режими обладнання та забезпечити стабільну роботу телекомунікаційної мережі оператора.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		76

## 7. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 7.1. Загальні положення

7.1.1. Цей розділ розроблено на основі **Закону України «Про охорону праці»** (ст. 14 «Обов'язки працівника щодо додержання вимог нормативно-правових актів з охорони праці») та **Кодексу цивільного захисту України**. Розділ встановлює вимоги безпеки під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи, яка включає два етапи з різними умовами праці:

- Робота з відеодисплейними терміналами (персональним комп'ютером) під час проведення ресурсоемних розрахунків CFD-моделювання.
- Інструментальний аудит у діючому приміщенні лінійно-апаратного цеху (ЛАЦ) з використанням вимірювальних приладів.

7.1.2. До проведення інструментальних вимірювань у приміщеннях з діючим електроустаткуванням допускаються особи, які пройшли вступний інструктаж з охорони праці, первинний інструктаж на робочому місці, а також ознайомлені з планом евакуації та принципом дії автоматичних систем пожежогасіння згідно з **НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»**.

7.1.3. Згідно з **ГОСТ 12.0.003-74**, під час виконання роботи на дослідника можуть впливати такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

#### **Фізичні фактори:**

- Підвищений рівень шуму на робочому місці (від систем охолодження серверів та кондиціонерів), що регламентується **ДСН 3.3.6.037-99**;
- Небезпечний рівень напруги в електричних колах, замикання яких може пройти через тіло людини (**НПАОП 40.1-1.21-98**);
- Рухомі частини машин і механізмів (незахищені крильчатки вентиляторів у відкритих стійках);
- Підвищена або знижена температура повітря робочої зони (перепади температур між «гарячими» та «холодними» коридорами);
- Підвищена рухливість повітря (протяги від прецизійних кондиціонерів);

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		77

- Можлива загазованість повітря парами холодоагентів (фреонів) у аварійних ситуаціях (НПАОП 0.00-1.81-18).

### **Психофізіологічні фактори:**

- Нервово-емоційне напруження при роботі зі складними програмними комплексами;
- Перенапруження зорового аналізатора;
- Статичні навантаження на опорно-руховий апарат та м'язи кистей рук при тривалій роботі за ПК.

7.1.4. Організація робочого місця за комп'ютером повинна відповідати **Наказу Мінсоцполітики № 207 від 14.02.2018 «Вимоги до безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями»**, а пожежна безпека забезпечується відповідно до **НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»**.

## **7.2. Вимоги безпеки перед початком роботи**

### **7.2.1. Перед початком роботи на ПК (етап математичного моделювання):**

1. Провести візуальний огляд робочого місця. Переконалися у стійкості розміщення системного блоку, монітора, клавіатури. Проходи до робочого місця повинні бути вільними.

2. Перевірити цілісність корпусів обладнання, сполучних кабелів та кабелів живлення. Забороняється використовувати обладнання з пошкодженою ізоляцією, зламаними вилками або розетками.

3. Перевірити наявність та надійність підключення захисного заземлення (занулення). Провід заземлення не повинен мати розривів.

4. Відрегулювати параметри мікроклімату та освітлення:

- Відсутність прямих сонячних променів або відблисків штучного освітлення на екрані монітора.
- Рівень освітленості клавіатури та робочої документації повинен становити не менше 300 лк (ДБН В.2.5-28:2018).

5. Налаштувати ергономіку робочого місця:

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
						78
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- Висота сидіння крісла повинна забезпечувати кут згинання ніг у колінах та рук у ліктях приблизно 90°.
- Екран монітора має бути розташований на відстані 600–700 мм від очей, верхній край екрана — на рівні лінії погляду.

### **7.2.2. Перед початком інструментального аудиту в ЛАЦ:**

1. Узгодити проведення робіт з відповідальною особою (черговим інженером або адміністратором залу) та отримати інструктаж щодо особливостей даного приміщення (розташування кнопок аварійної зупинки, шляхів евакуації).

2. Перевірити справність та калібрування вимірювальних приладів (тепловізора, анемометра, термогігрометра) згідно з технічною документацією заводів-виробників.

3. Одягнути спеціальний одяг (за необхідності) або перевірити власний одяг: він повинен бути зручним, не сковувати рухів, не мати звисаючих частин (шарфів, краваток, розстебнутих манжетів), які можуть бути затягнуті повітряним потоком у рухомі частини вентиляторів.

4. Звільнити кишені від дрібних металевих предметів, інструментів, ключів, які при нахилі можуть випасти всередину серверного обладнання та спричинити коротке замикання.

5. За необхідності тривалого перебування в шумному приміщенні підготувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху (протишумні навушники або вкладиші).

### **7.3. Вимоги безпеки під час виконання роботи**

#### **7.3.1. Під час роботи за ПК (вимоги Наказу № 207):**

1. Суворо дотримуватись режимів праці та відпочинку. При інтенсивній роботі (введення даних, аналіз графіків CFD) роботи регламентовані перерви тривалістю 10–15 хвилин через кожну годину роботи для зняття зорового та м'язового напруження.

2. Не допускати захаращення вентиляційних отворів системного блоку паперами чи сторонніми предметами, щоб уникнути перегріву та виходу з

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркул
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		79

ладу комп'ютерної техніки.

3. Забороняється проводити самостійний ремонт, відкривати корпус системного блоку, торкатися роз'ємів сполучних кабелів, тильної сторони монітора під час роботи обладнання.

4. Уникати вживання напоїв безпосередньо за робочим столом для запобігання потраплянню рідини на електроприлади, що може спричинити коротке замикання та ураження струмом.

5. При виконанні тривалих обчислювальних процесів (рендерингу), які не потребують постійної участі оператора, допускається залишати обладнання увімкненим, якщо це не суперечить правилам пожежної безпеки установи.

### **7.3.2. Під час роботи з вимірювальними інструментами в ЛАЦ:**

1. При роботі з тепловізором або пірометром, що обладнані лазерним цільовказівником, категорично забороняється направляти лазерний промінь в очі персоналу (згідно з **СанПіН 5804-91**). Також слід уникати наведення променю на дзеркальні та поліровані металеві поверхні, щоб уникнути відбиття променю.

2. Вимірювання швидкості повітря анемометром проводити обережно, тримаючи прилад на безпечній відстані від лопатей вентиляторів, щоб уникнути механічного пошкодження зонда та травмування рук.

3. Усі вимірювання (температури, вологості, швидкості) проводити безконтактним методом. Забороняється просовувати руки або зонди приладів крізь захисні решітки обладнання.

### **7.3.3. Загальні вимоги безпеки при перебуванні в приміщенні ЛАЦ:**

1. Пересуватися приміщенням слід обережно, зважаючи на конструктивні особливості фальшпідлоги. Уникати наступання на пошкоджені, хитаючись або зняті плити фальшпідлоги.

2. Категорично забороняється торкатися струмоведучих частин, відкривати електрощити, розподільчі коробки, задні дверцята серверних шаф, торкатися шин заземлення та кабельних комунікацій (**НПАОП 40.1-1.21-98**).

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архив
						80
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Не перекривати власним тілом або обладнанням повітрязбірні решітки працюючого обладнання, оскільки це може призвести до його локального перегріву та аварійної зупинки.

4. Постійно слідкувати за станом світлових табло та звукових оповіщувачів системи автоматичного газового пожежогасіння.

5. Не залишати без нагляду вимірювальні прилади, ноутбуки та інші особисті речі у проходах між рядами обладнання.

#### **7.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи**

7.4.1. Зберегти результати вимірювань та моделювання на основні та резервні носії інформації. 5.4.2. Коректно завершити роботу прикладного програмного забезпечення та операційної системи. 5.4.3. Відключити електроживлення периферійних пристроїв, якщо це передбачено інструкцією з експлуатації. 5.4.4. Вимкнути вимірювальні прилади, очистити їх від пилу, перевірити цілісність та помістити у спеціальні футляри або місця для зберігання. 5.4.5. У разі переміщення приладів з холодного середовища в тепле (наприклад, з вулиці в приміщення), не вмикати їх до повної акліматизації та висихання конденсату. 5.4.6. Повідомити відповідального чергового інженера про завершення робіт та вихід з технічного приміщення. 5.4.7. Про всі виявлені під час роботи недоліки, несправності обладнання, пошкодження кабелів або порушення правил охорони праці повідомити керівника робіт.

#### **7.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

##### **7.5.1. Дії при виникненні пожежі:**

- негайно припинити роботу.
- При спрацюванні системи автоматичного газового пожежогасіння (світловий сигнал «Газ — виходь!», звукова сирени) негайно, без паніки, покинути приміщення протягом часу затримки пуску газу (зазвичай 30 секунд). Щільно зачинити за собою двері для забезпечення герметичності приміщення.
- За відсутності автоматики — натиснути ручний пожежний сповіщувач.
- Викликати пожежно-рятувальну службу за телефоном **101**.

					00.КМР.142.003.014.ПЗ.	Аркти
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		81

- Повідомити адміністрацію та розпочати евакуацію згідно з планом.
- Гасіння електроустановок під напругою дозволяється виконувати тільки вуглекислотними або порошковими вогнегасниками, дотримуючись безпечної відстані (не менше 1 м).

#### 7.5.2. Дії при ураженні електричним струмом:

- негайно звільнити потерпілого від дії струму шляхом вимкнення електроустановки (рубильником, вимикачем) або відділення потерпілого від струмоведучих частин з використанням діелектричних засобів (суха палиця, дошка, діелектричні рукавиці).
- Викликати екстрену медичну допомогу за телефоном **103**.
- Надати домедичну допомогу залежно від стану потерпілого (забезпечити спокій, при відсутності дихання та пульсу — розпочати серцево-легеневу реанімацію) згідно з **Порядком надання домедичної допомоги особам при невідкладних станах**.

#### 7.5.3. Дії при витокі холодоагенту (фреону):

- Слід пам'ятати, що фреони (R22, R407C, R410A) важчі за повітря, не мають кольору і часто запаху, але при високій концентрації витісняють кисень, викликаючи задуху.
- При виявленні ознак витоків (сичання, поява туману, різке погіршення самопочуття, запаморочення) негайно покинути приміщення, рухаючись по можливості не нахиляючись до підлоги, де концентрація газу найвища.
- Повідомити технічний персонал про аварію для вжиття заходів щодо герметизації системи та провітрювання приміщення.

#### 7.5.4. Дії при аварійному стані ПК:

- При появі диму, іскор, запаху горілої ізоляції або нехарактерного шуму з системного блоку — негайно відключити обладнання від електромережі.
- Повідомити про несправність технічний персонал. Забороняється вмикати несправне обладнання до усунення поломки.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Аркуш
						82
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## Список використаних джерел

1. Huang J. et al. A Calculation Model for Typical Data Center Cooling System // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 158. – P. 4464–4470.
2. Zhang X. Cooling Energy Consumption Investigation of Data Center IT Room with Vertical Airflow Containment Systems // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 205. – P. 1503–1509.
3. Schneider Electric. Calculating Total Cooling Requirements for Data Centers: White Paper № 25. – 2014. – 15 p.
4. m-info.ua. Дата-центри і серверні – типи систем охолодження [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://m-info.ua> (дата звернення: 10.10.2025).
5. SimScale Blog. Data Center Cooling and ASHRAE 90.4 Standard [Electronic resource]. – 2022. – Mode of access: URL: <https://www.simscale.com>.
6. ASHRAE TC9.9. Thermal Guidelines for Data Processing Environments. 4th Edition. – Atlanta: ASHRAE, 2016. – 178 p.
7. Schneider Electric. Data Center Cooling Technologies: White Paper. – 2020. – (NRAN-5TE6HE\_R4\_EN).
8. Green Grid Association. PUE: A Comprehensive Review: Technical Report. – 2019.
9. Energy Star. Data Center Metrics Report / US EPA. – 2020.
10. Rahimi M. Thermal Management Challenges in Modern Data Centers // Elsevier. – 2022.
11. ASHRAE. Cooling Energy and Humidity Management // ASHRAE Journal. – 2021.
12. Zhang X. CFD Simulation of Air Distribution in Server Rooms // Building and Environment. – 2019.
13. Schneider Electric. EcoStruxure for Data Centers – Intelligent Cooling Control: User Guide. – 2023.
14. SimScale. CFD-Based Thermal Optimization of Data Centers: Case Study. – 2022.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		83

15. Лабай В. Й. Системи кондиціонування повітря: навч. посібник / В. Й. Лабай. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 376 с.
16. Форсюк А. В. Холодильні машини [Електронний ресурс]: курс лекцій. Частина II. Теплообмінне обладнання холодильних машин / А. В. Форсюк. – К.: НУХТ, 2016. – 98 с. – Режим доступу: URL: <http://dspace.nuft.edu.ua>.
17. Форсюк А. В. Холодильні машини [Електронний ресурс]: курс лекцій. Частина I. Компресори холодильних машин / А. В. Форсюк. – К.: НУХТ, 2016. – Режим доступу: URL: <http://dspace.nuft.edu.ua>.
18. Петренко В. П. Теплотехнологічні процеси та установки: курс лекцій / В. П. Петренко. – К.: НУХТ, 2013. – 118 с.
19. Грищук М. В. Основи охорони праці: навч. посібник / М. В. Грищук. – К.: Кондор, 2007. – 240 с.
20. Холодильні установки: методичні рекомендації до проведення практичних занять / уклад. О. Б. Василів. – К.: НУХТ, 2020. – 45 с.
21. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» / уклад.: В. П. Петренко, Р. В. Грищенко. – К.: НУХТ, 2024. – 38 с.
22. ГБН В.2.3-34620942-001:2013. Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування. – К.: Мінрегіон України, 2013.
23. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К.: Мінрегіон України, 2013.
24. Монреальський протокол про речовини, що виснажують озоновий шар [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://zakon.rada.gov.ua>.
25. ISO/IEC 30134-2:2016. Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 2: Power usage effectiveness (PUE). – Geneva: ISO/IEC, 2016.
26. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Затверджено наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. – К.: МВС України, 2014.
27. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 2023 R1. – Canonsburg: ANSYS, Inc., 2023.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		84

**28.** Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.

**29.** ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2018.

**30.** НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. Затверджено наказом Мінсоцполітики від 05.03.2018 № 333.

**31.** ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010.

**32.** Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Розділ 1.7. Заземлення і захисні заходи електробезпеки. – К.: Міненерговугілля України, 2017.

**33.** ТІА-942. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. – Telecommunications Industry Association, 2017.

**34.** Закон України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 № 1818-ІХ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://zakon.rada.gov.ua>.

**35.** Uniflair Leonardo Evolution. Technical Manual. Models: MUER-MUTR-MUVR. – Schneider Electric, 2015.

**36.** Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd Edition. – Pearson Education Ltd, 2007. – 503 p.

**37.** ДСТУ EN 13779:2011. Вентиляція громадських будівель. Вимоги до виконання систем вентиляції та кондиціонування повітря. – К.: Держспоживстандарт України, 2011.

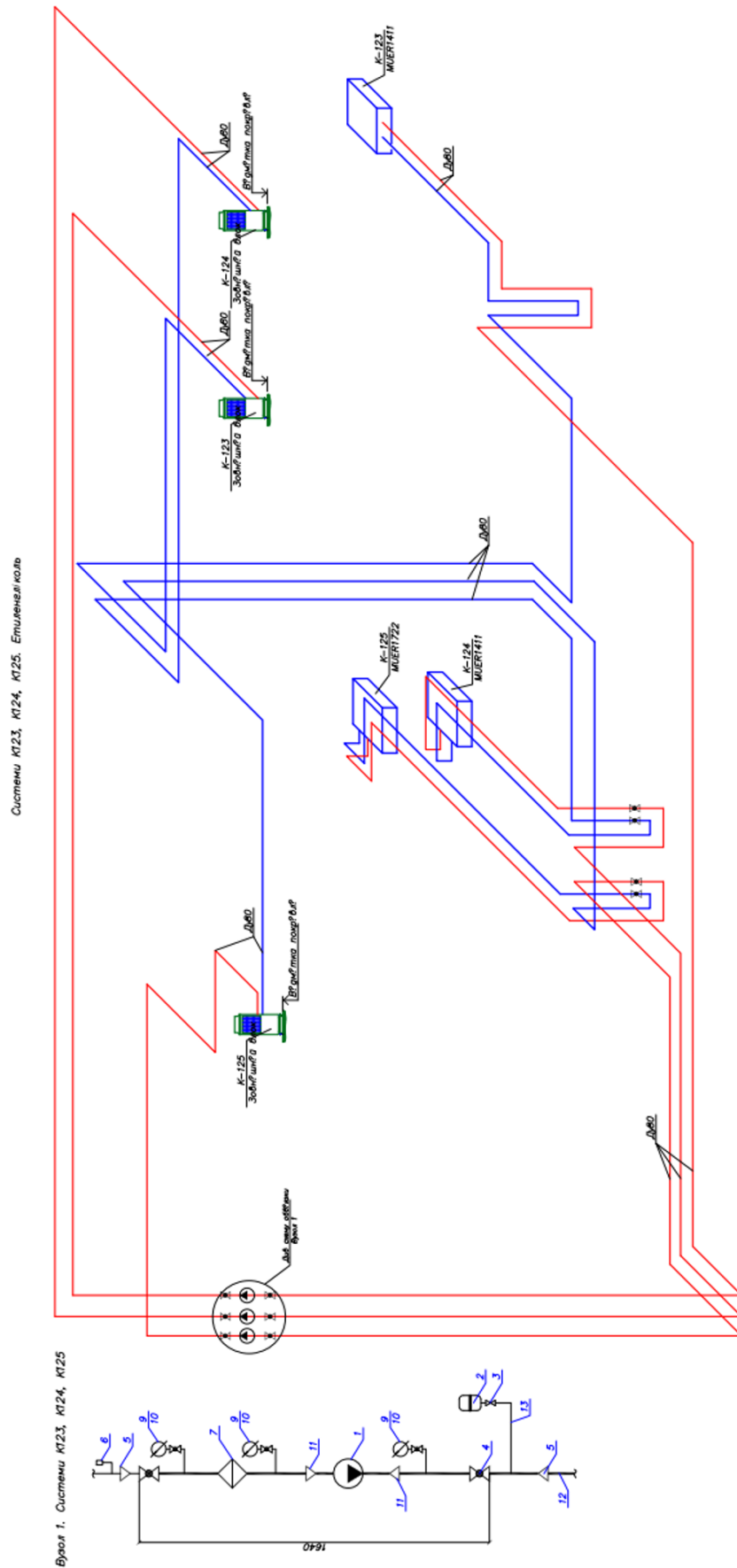
**38.** Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-ХІІ.

**39.** Міхеев М. О., Міхеева І. М. Основи теплопередачі. – К.: Енергія, 1977. – 344 с.

					00.KMP.142.003.014.ПЗ.	Архиви
						85
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

# Додатки

## Додаток.1. Системи к1232, К124, К125. Етиленгліколь



Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

00.KMP.142.003.014.ПЗ.

Аркуш

86

**TECHNICAL DATA**

MODEL	RAL	0360	0510	0700	1000	1500	2300	3600	5700	
Power supply	V/ph/Hz	230 / 1 / 50							400 / 3 / 50	
Number of fans / pole	NUM.	2 / 6	2 / 6	3 / 6	3 / 6	4 / 6	3 / 6	4 / 6	3 / 6	
Total nominal power absorption	kW	0.36	0.54	0.54	0.87	1.16	2.04	2.72	6.30	
Absorbed Current	A	1.74	2.61	2.61	4.8	6.4	9.0	12.0	11.4	
Nominal capacity (*)	kW	16.6	20.9	30.2	36.9	51.3	81.2	127.9	200.5	
Nominal airflow	m <sup>3</sup> /h	5800	6470	9560	11820	16000	31800	41600	54000	
Sound pressure level at 10 m free-field conditions	dB(A)	46.0	46.5	48.0	49.0	50.0	55.0	56.0	60.5	

MODEL	RAN	0750	1000	1500
Power supply	V/ph/Hz	230 / 1 / 50		
Number of fans / pole	NUM.	2 / 4	3 / 4	4 / 4
Total nominal power absorption	kW	1.28	1.92	2.56
Absorbed Current	A	6.6	9.9	13.2
Nominal capacity (*)	kW	34.6	46.0	64.1
Nominal airflow	m <sup>3</sup> /h	11490	16140	21820
Sound pressure level at 10 m free-field conditions	dB(A)	56.5	58.5	60.0

(\*) Air temp. = 25°C ; water inlet temp. = 40°C ; water outlet temp = 35°C ; glicol = 0%

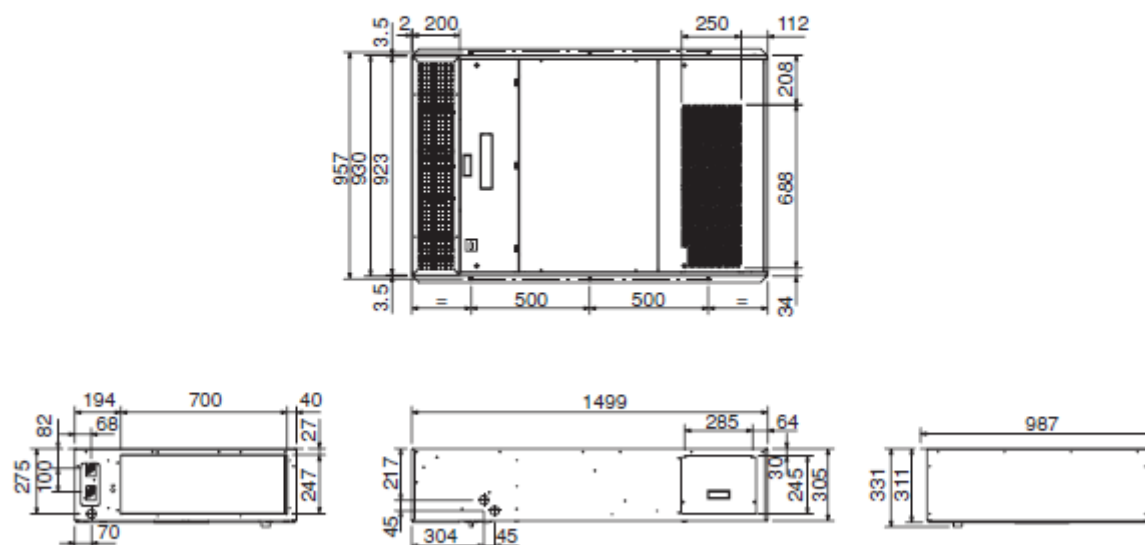
**Pressure drop by liquid supply function**

MODEL	Pressure drop (kPa)	liquid supply (l/h)	Pressure drop (kPa)	liquid supply (l/h)	Pressure drop (kPa)	liquid supply (l/h)
<b>RAL 0360</b>	4	1000	9	1500	14	2000
<b>RAL 0510</b>	14	2000	21	2500	30	3000
<b>RAL 0700</b>	12	3000	15	3500	20	4000
<b>RAL 1000</b>	8	4000	10	4500	12	5000
<b>RAL 1500</b>	14	5000	16	5500	19	6000
<b>RAL 2300</b>	8	6000	9	6500	10	7000
<b>RAL 3600</b>	3	7000	3	7500	2	8000
<b>RAL 5700</b>	22	8000	24	8500	27	9000
<b>RAN 750</b>	7	3000	10	3500	12	4000
<b>RAN 1000</b>	8	4000	10	4500	12	5000
<b>RAN 1500</b>	14	5000	16	5500	19	6000

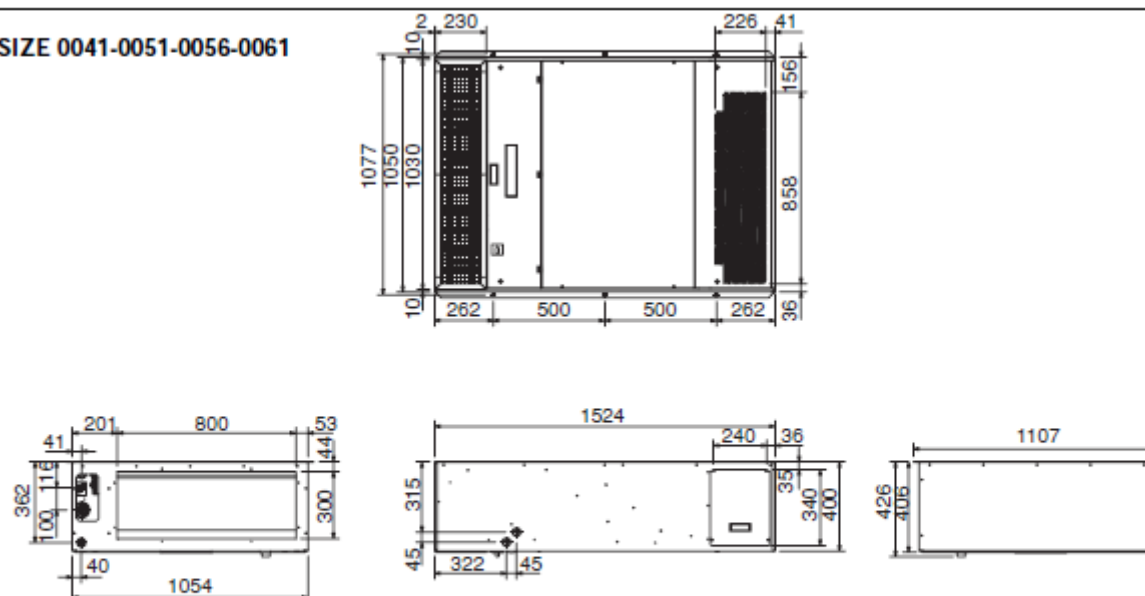
**DIMENSIONAL DRAWINGS**



**SIZE 0011-0021-0031**



**SIZE 0041-0051-0056-0061**



Size HED	Fittings		Weight (kg)
	Ø1	Ø2	
0011-0021-0031	15,8mm-5/8"	9,52mm-3/8"	90
0041-0051-0061	19,05mm-3/4"	12,3mm-1/2"	120

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

00.KMP.142.003.014.ПЗ.