

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ГІДРОАЕРОМЕХАНІКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему: « Використання програмного забезпечення CFD для моделювання
теплового комфорту приватного будинку »

Напрямок підготовки 144 «Теплоенергетика»
за фаховим спрямуванням «Енергетичний менеджмент»

Виконавець роботи

Ляховка А.В.

(прізвище і ініціали)

(підпис студента)

*В роботі не виявлено текстових,
ілюстративних та інших запозичень
без коректного на них посилання*

Випускна робота
захищена на засіданні
ЕК з оцінкою

Керівник роботи

(підпис)

Хованський С.О.

(прізвище і ініціали)

доцент каф. ПГМ

(наукова ступінь, звання або посада)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Секретар комісії

(підпис)

Суми 2020

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки
Спеціальність 144 «Теплоенергетика»
(освітня програма «Енергетичний менеджмент»)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
прикладної гідроаеромеханіки

_____ Ковальов І.О.
“ ___ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра

Ляховки Андрія Вікторовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Використання програмного забезпечення CFD для моделювання теплового комфорту приватного будинку

затверджена наказом по університету № _____ від “ ___ ” _____ 20__ р.

2 Термін здачі студентом закінченої роботи до 5 червня 2020 р.

3 Вихідні дані до роботи: Креслення об'єкту енергетичного обстеження; нормативна документація з енергоспоживання, що діє на території України.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно вирішити).

Вступ (загальна характеристика проблем з енергозбереження).

1. Огляд основних характеристик та аналіз існуючих шляхів підвищення енергетичної ефективності приватних будинків.

2. Числове моделювання теплового стану приміщення (створення тривимірної моделі, побудова розрахункової сітки, опис розрахункової моделі, проведення комп'ютерного розрахунку).

3. Аналіз результатів числового моделювання теплового стану приміщення (загальний аналіз результатів розрахунків, розподіл температури в приміщенні залежно від теплового потоку радіаторів опалення)

4. Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях (реферативний матеріал за визначеною керівником темою).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи (за змістом розрахунково-пояснювальної записки)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальна характеристика проблем з енергозбереження	до 12.04.2020	
2	Створення тривимірної моделі	до 19.04.2020	
3	Побудова розрахункової сітки	до 26.04.2020	
4	Аналіз обсягів енергоспоживання	до 06.05.2020	
5	Проведення комп'ютерного розрахунку	до 15.06.2020	
6	Опис розрахункової моделі	до 20.06.2020	
7	Аналіз результатів числового моделювання теплового режиму роботи	до 24.06.2020	
8	Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	до 25.05.2020	
9	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та графічних матеріалів	до 30.05.2020	
10	Здача роботи на перевірку	до 05.06.20	
11	Доопрацювання зауважень	до 12.06	
12	Захист роботи	з 15.06.20 до 16.06.20	

Дата видачі завдання “ 06 “ квітня 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Ляховка А.В.
(Прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Хованський С.О.
(Прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 8 таблиць, 28 рисунків, 11 літературних джерел.

Мета роботи: моделювання та дослідження теплових режимів роботи приватного будинку.

Були вирішені такі завдання:

- змодельоване приміщення наближене до дійсних розмірів;
- проведений розрахунок теплового режиму роботи;
- аналіз результатів теплового режиму роботи.

Предметом дослідження є змодельоване приміщення.

Об'єктом є опалювальний процес в приватному будинку.

Методи дослідження: математичне моделювання за допомогою програмного продукту ANSYS CFX.

Ключові слова: ТЕПЛОВИЙ КОМФОРТ, ПРИВАТНИЙ БУДИНОК, МОДЕЛЮВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ ПРОДУКТІ ANSYS CFX, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

Тема роботи – «Використання програмного забезпечення CFD для моделювання теплового комфорту приватного будинку»

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ.....	7
1.1 Принципи проектування енергоефективних будівель.....	7
1.2 Енергетичні можливості зовнішнього клімату.....	9
1.3 Математична модель для управління тепловим режимом інтелектуальної будівлі.....	11
1.4 Програмний комплекс ANSYS CFX як один із основних інструментів моделювання у сфері теплоенергетики.....	14
2 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПРИМІЩЕННЯ.....	17
2.1 Створення тривимірної моделі.....	17
2.2 Побудова розрахункової сітки.....	18
2.3 Опис розрахункової моделі.....	22
2.4 Проведення комп'ютерного розрахунку.....	38
3. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	42
3.1 Загальний аналіз результатів розрахунків.....	42
3.2 Аналіз результатів розрахунків при опаленні за допомогою радіаторів.....	45
3.3 Аналіз результатів розрахунку після заміни склопакетів на більш енергоефективні.....	55
4. УЛАШТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК БЛИСКАВКОЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	57
4.1 Основі можливі наслідки влучання блискавки в будівлі і споруди.....	57
4.2 Необхідність та економічне обґрунтування захисту від блискавки.....	60
4.3 Заходи захисту.....	62
4.4 Розрахунки встановлення блискавкозахисту.....	63
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	72

					6.144.09 БР 00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Ляховка				Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Хованський				4	72	
Н. Контр.					СумДУ, ЕМ-61		
Затверд.							

ВСТУП

Як відомо [1], Україна відноситься до енергодефіцитних країн, адже задовольняє свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах (ПЕР) за рахунок власного їх видобутку менш, ніж на 50 %. Видобуток власних ПЕР проводиться в таких гірничо-геологічних умовах, які роблять їх неконкурентоздатними з імпортованими ПЕР. Це перш за все відноситься до видобутку нафти і газу. Не краща сучасна ситуація і у вугільній промисловості, де більшість шахт мають низькі економічні показники. Хоча Україна має великі поклади вугілля, якого вистачило б на сотні років, однак для їх розробки необхідні великі капітальні вкладення, яких в умовах економічної кризи держава не може забезпечити [1].

В свою чергу [1], криза енергетична, яка стала причиною багатьох негативних явищ в економіці України, особливо загострилася в останні роки. Відсутність альтернативних джерел ПЕР, у першу чергу нафти й газу, призвели до виникнення залежності від іноземних постачальників. Слідуючи збільшенню ціни на імпортовані енергоносії, виникає необхідність все більш активної роботи з енергозбереження. Тому в сьогоднішній день, через ріст залежності від імпортованих енергоносіїв та їх вартості, на перший план постає питання економії теплоенергії.

Сьогодні Україна покриває потребу в енергоресурсах [2] за рахунок власного видобутку лише на 53% енергії від загальної потреби, імпортує 75% необхідного обсягу природного газу та 85% сирової нафти і нафтопродуктів. Зважаючи на таку статистику, від якої залежить ціноутворення на ПЕР, зменшення вартості опалення будинків, набуває виняткової важливості. Зараз, майже завжди, при зведенні будинку економлять на теплоізоляції, вентиляції та енергоефективному опалювальному обладнанні, віддаючи перевагу дорого вартісному дизайну. Саме через це [3], основними споживачами теплової енергії є житлово-комунальний сектор (44%), це більше ніж промисловість (35%) та інші галузі економіки (21%).

Отже зменшення використання теплової енергії в житловому секторі є головним завданням енергозбереження. Є два шляхи вирішення цього завдання:

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скоротити використання енергоресурсів за рахунок їх більш економного використання, або використовувати сучасні технології будівництва та модернізації приватних та багатоквартирних будинків, встановлюючи енергоефективне опалювальне обладнання та теплоізоляцію.

Проектування будинків з використанням сучасних технології, які б гарантували економне використання енергоресурсів, але в той же час, могли б забезпечити комфортну і безпечну життєдіяльність – задача складна, але реальна. Вирішивши цю задачу, можна зекономити значну кількість матеріальних ресурсів. Рішення цієї задачі може бути реалізована за рахунок сучасних комп'ютерних технологій за допомогою математичного моделювання процесів, що відбуваються під час опалення приміщень.

При застосуванні математичного моделювання будівель вирішуються рівняння гідродинаміки в поєднанні з початковими та граничними умовами, що надають інформацію про розподіл температури, швидкості та концентрації шкідливих речовин в досліджуваному об'ємі.

Отже математичне моделювання дозволяє проводити оцінку можливих теплових втрат у будинку, та можливого поліпшення санітарно-гігієнічних та екологічних умов. Також за допомогою попереднього моделювання будівель за допомогою сучасних програмних комплексів є можливість розрахувати і визначити матеріали, використання яких при будівництві дозволить раціонально використовувати матеріальні ресурси, і які, в свою чергу, забезпечать економію коштів на оплату енергоресурсів потрібних на забезпечення життєдіяльності в даній будівлі.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

1.1 Принципи проектування енергоефективних будівель

Ціль проектування [4] і будівництва енергоефективних будівель полягає в більш ефективному використанні енергоресурсів, затрачених на енергопостачання будівлі, шляхом застосування інноваційних рішень, які здійсненні технічно, обґрунтовані економічно, а також прийнятні з екологічної і соціальної точки зору і не змінюють звичного образу життя. Пріоритетність при виборі енергозберігаючих технологій мають технічні рішення, одночасно сприяючі поліпшенню мікроклімату приміщень і захисту навколишнього середовища.

Методологія проектування енергоефективної будівлі [4] повинна ґрунтуватися на системному аналізі будівлі як єдиної енергетичної системи. Подання енергоефективного будинку як суми незалежних інноваційних рішень порушує принципи системності та призводить до втрати енергетичної ефективності проекту. Проектування енергоефективного будинку відповідно до принципів системного аналізу включає в себе три етапи [4]:

- побудова математичної моделі тепломасобмінних процесів в будівлі, тобто опис їх на мові математики;
- вибір цільової функції, тобто визначення обмежуючих умов і формулювання оптимізаційної задачі в залежності від мети оптимізації (зниження витрат енергії на опалення, зниження встановленої потужності устаткування, зниження витрат енергії на кліматизацію в річному циклі і т.д.);
- рішення поставленої оптимізаційної задачі.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно до принципів системного аналізу [4], доцільно при проектуванні енергоефективного будинку розглядати дві незалежні енергетичні підсистеми:

- зовнішній клімат як джерело енергії;
- будівля як єдина енергетична система.

Аналіз першої підсистеми дозволяє обчислити енергетичний потенціал зовнішнього клімату і визначити методи його використання для тепло- і холодопостачання будівлі. Аналіз другої підсистеми дозволяє визначити характеристики архітектурно-конструктивних, теплотехнічних або енергетичних показників будинку як єдиної енергетичної системи.

Прийнята вище методика побудови математичної моделі теплового режиму будівлі як єдиної енергетичної системи передбачає декомпозицію будівлі на три основні енергетично взаємопов'язані підсистеми:

- енергетичний вплив зовнішнього клімату на оболонку будівлі;
- енергія, що накопичена (міститься) в оболонці будівлі, тобто в зовнішніх конструкціях будівлі;
- енергія, що накопичена (міститься) всередині об'єму будівлі, тобто у внутрішньому повітрі, внутрішньому обладнанні, внутрішніх конструкціях і т.д.

При необхідності кожна із зазначених підсистем може бути представлена методом декомпозиції більш дрібними енергетично взаємопов'язаними елементами.

Проектування енергоефективного будинку полягає [4] в оптимізації трьох енергетично взаємопов'язаних підсистем і будівлі в цілому як єдиної енергетичної системи і включає в себе:

- визначення оптимальних архітектурно-планувальних, теплотехнічних або енергетичних параметрів окремих елементів будівлі з урахуванням взаємозв'язку між ними;
- визначення оптимальних архітектурно-планувальних, теплотехнічних або енергетичних параметрів будинку як єдиної енергетичної системи.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При реальному проектуванні [4] вибір оптимальної сукупності взаємопов'язаних інноваційних архітектурно-планувальних та інженерних рішень енергоефективного будинку може бути обмежений рядом обмежень, так званих «дисциплінарних умов», які фіксовані з самого початку і не можуть бути порушені (наприклад, поверховість або протяжність будівлі). При цьому ставиться завдання оптимізації з заданими обмеженнями, і мета досягається при отриманні оптимального рішення з урахуванням заданих обмежень.

Прийняття остаточного рішення [4] належить до компетенції відповідальної особи (частіше групи осіб), яким надано право остаточного вибору і на якого покладена відповідальність за цей вибір. Роблячи вибір, він може враховувати поряд з рекомендаціями, що випливають з математичного розрахунку, ще ряд міркувань кількісного і якісного характеру, які в цих розрахунках не були враховані.

1.2 Енергетичні можливості зовнішнього клімату

Вплив зовнішнього клімату на тепловий режим будівлі і витрати енергії на опалення та охолодження приміщення полягає в комплексному впливі окремих метеорологічних показників: температури, вологості, швидкості і напрямку руху зовнішнього повітря, прямий і розсіяною радіації. Основною вимогою, пред'являються до математичної моделі показників зовнішнього клімату, є облік їх спільного поєднання. Можливі три підходи до побудови математичної моделі сукупності показників зовнішнього клімату: детермінований, імовірнісний і детерміновано-імовірнісний. Перший підхід заснований на використанні реального поєднання сукупності показників зовнішнього клімату кожного географічного пункту за багаторічний період. Сутність цього підходу полягає в наступному. В архівах метеостанції зібрані за багато років щогодинні і термінові показники клімату для даного географічного пункту. З метою використання в теплотехнічних

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунках ці дані систематизують в табличну форму. У таблиці 1.1 наведена приблизна таблична форма систематизації показників зовнішнього клімату.

Таблиця 1.1 Параметри зовнішнього клімату [4]

Рік	Місяць	Денні години	T_0 , °C	V_0 , м/с	Напрямок вітру	d , г/=.кг
2020	Січень	1	-7	3	Пн	4
		2	-8	5	Пн	3
		3	-8	4	Пн	3
		• • •				
		724	-12	7	Пд	4
		725	-14	6	Пд	4
		726	-14	2	Пд	4
		• • •				

Позначення: T_0 – температура зовнішнього повітря; V_0 – швидкість вітру; d – вологовміст зовнішнього повітря.

У таблицю показників зовнішнього клімату [4] заносять з архіву значення показників за весь період спостережень. Після цього масиви чисел з таблиці заносять у зовнішню пам'ять комп'ютера. При розрахунках теплового режиму будівлі значення показників зовнішнього клімату викликаються з зовнішньої пам'яті комп'ютера в оперативне пристрій, що виконує розрахунок. При цьому можуть бути викликані значення показників зовнішнього клімату всього періоду або його окремих частин (наприклад, холодний період - січень, теплий період - липень і т.д.). Використання такої моделі дозволяє побудувати гістограму розподілу частот вихідного показника (навантаження на систему регулювання теплового режиму, температури приміщення, температури внутрішнього повітря і т.д.). Для побудови гістограми на осі ординат наносять розрахункові інтервали часу (кроки за часом), а на осі абсцис – можливі (очікувані) значення вихідного показника. З огляду на, що сучасні комп'ютери забезпечені програмними

комплексами, що здатні будувати різноманітні графіки і діаграми, процес побудови гістограми доцільно автоматизувати. Аналіз розподілу частот появи вихідного показника дозволяє візуально, а при необхідності і чисельно оцінити його забезпеченість.

1.3 Математична модель для управління тепловим режимом інтелектуальної будівлі

Поняття «інтелектуальна будівля» [4] народилося в США на початку 80-х років ХХ століття і дуже швидко стало модним. Поки фахівці ламали голови над його концепцією, будівельники і інвестори поспішали оголосити таким будь-яку споруду, де встановлена система контролю доступу або пожежна сигналізація. Звичайно, елементи інтелектуальності сьогодні притаманні майже будь-якій будові. Але всетаки інтелектуальний будинок - поняття зовсім іншого масштабу. Створення оптимального середовища для бізнесу, забезпечення комфортних умов діяльності, зниження витрат на експлуатацію - це основні критерії концепції інтелектуальної будівлі.

Ця будівля [4] з єдиної кабельної архітектурою, що забезпечує циркуляцію всього потоку інформації: телефонію, передачу даних в локальній мережі, відео та інших даних аж до великих систем життєзабезпечення та управління будівлею.

Під системами життєзабезпечення будівлі розуміються:

- телефонно-комп'ютерна мережа;
- контроль доступу в приміщення;
- пожежна безпека будівлі;
- дозиметричний контроль;
- управління опаленням, кондиціонування та вентиляцією;
- відеоспостереження в цілях безпеки.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтелектуальна будівля (ІВ - Intelligent Building) являє собою комплекс організаційних, інженерно-технічних заходів та програмних засобів, спрямованих на створення високоефективної економічної інфраструктури обслуговування комплексу, що максимально відповідає потребам користувачів і власників цієї будівлі.

Математичні моделі [4] теплового режиму приміщень, призначені для використання в системах управління, в порівнянні з моделлю для проектування мають певні особливості. Можна відзначити дві основні вимоги до цих моделей (до певної міри суперечливих):

1. Необхідність високої точності чисельного моделювання теплового режиму. Тільки на цій основі можливе забезпечення якісного управління тепловим режимом.
2. Обмеження на програму для комп'ютера за обсягом обчислень і часу обчислень. Комп'ютер, на якому реалізується математична модель, має обмежені характеристики за швидкістю і пам'яті. Перш за все, це пов'язане з економічною обґрунтованістю введення всієї системи автоматизованого управління. Витрати на потужний комп'ютер можуть звести нанівець ефект від економії енергії за рахунок введення системи. Необхідність одночасного виконання цих вимог змушує відмовитися від універсальної математичної моделі і перейти до спеціалізованої моделі. Така модель дозволяє при скороченні обсягу обчислень не тільки не втратити точності моделювання теплового режиму, але і в результаті використання експериментальних даних підвищити цю точність в порівнянні з універсальною моделлю.

Вихідним матеріалом для розробки спеціалізованої моделі[4] служить універсальна модель. Можна вказати кілька напрямків, за якими може бути здійснено її «звуження» (без втрати, а бажано і з її збільшенням):

1. Скорочення числа незалежних змінних (в завданні проектування це вихідні дані, в завданні управління - вхідні параметри) шляхом переведення їх в фіксовані параметри розрахункової моделі. Наприклад, в моделі для управління випадають група даних, що стосуються геометричних розмірів приміщень будівлі, група

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даних, що характеризують розміри і теплофізичні властивості огорожувальних конструкцій, і багато інших. Це, мабуть, найбільш простий і очевидний шлях переходу до спеціалізованої моделі.

2. Удосконалення алгоритму обчислень в напрямку скорочення часу обчислень і підвищення точності результатів на основі конкретизації постановки завдання. Велика визначеність постановки завдання в разі спеціалізованої моделі в багатьох випадках дає можливість використовувати більш ефективні обчислювальні методи.

3. Підвищення точності моделювання теплового режиму за рахунок використання експериментальних даних. Тут дуже багато можливостей: від простого введення в розрахунок в якості параметрів характеристик, отриманих при натурних вимірах в даному приміщенні, до уточнення в результаті проведення вимірювань деяких припущень у вихідній моделі (наприклад, в універсальній моделі робиться припущення про рівномірність розподілу проникаючої сонячної радіації по внутрішніх поверхнях огорожувальних конструкцій, за результатами вимірювань в конкретному приміщенні, накопичення статистики - це положення може бути уточнено). Велике значення має введення в розрахункову модель уточнених даних, що стосуються величин коефіцієнтів теплообміну на поверхні огорожень. За результатами вимірювань може бути в значній міру підвищена точність обліку теплоакумуючої здатності обладнання і меблів.

З урахуванням викладених вище міркувань завдання розробки математичної моделі теплового режиму приміщення [4] для управління складається з наступних етапів: збір і опрацювання вихідних даних, що включає вивчення проектної документації та особливостей технологічних процесів, що відбуваються в приміщенні; розробка «точної» математичної моделі теплового режиму приміщення і методу її реалізації на основі використання комп'ютера; оцінка методом численного досвіду вкладу окремих складових теплового балансу приміщення і різних теплотехнічних параметрів на величину цільової функції; розробка з урахуванням результатів виконання численного досвіду попередньої математичної моделі теплового режиму приміщення для управління; обґрунтування математичної моделі для управління на основі зіставлення

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результатів розрахунку по ній з результатами розрахунку по «точній» моделі; ідентифікація математичної моделі за результатами натурних експериментів; підвищення адекватності математичної моделі в процесі її функціонування.

1.4 Програмний комплекс ANSYS CFX як один із основних інструментів моделювання у сфері теплоенергетики

При вирішенні тривимірних задач сполученого теплообміну [5] в об'єктах зі складною геометрією, що вимагають детального опису перенесення тепла випромінюванням і конвекцією, безперечні переваги програмного комплексу ANSYS CFX перед іншими пакетами програм. Користувач, складаючи програму розрахунку процесів в конкретному об'єкті, зокрема, має можливість вибрати один з чотирьох методів розв'язання рівнянь радіаційного теплообміну: метод Росселанда; метод π_1 ; метод Discrete Transfer; метод Монте-Карло. Вибір методу забезпечує або прискорення обчислень, або збільшення точності результатів моделювання.

ANSYS CFX [5]- це професійний аналітичний комплекс для рішення термо-, гідро-, газодинамічних задач. У ньому використовується більш 16 моделей турбулентності, комплекс використовує моделі багатофазних потоків. Модель руху твердих частинок (Lagrangian Particle Transport) дозволяє врахувати дискретні домішки в однорідному потоці. Модель багатофазного теплої масообміну дозволяє розраховувати кипіння, випаровування і кавітацію. Застосування рухомих сіток дуже важливо для моделювання мінливої геометрії розрахункової області: опис взаємодії ротор-статор у обертових машинах; компресори, насоси. Для розрахунків процесу горіння використовується ряд моделей, що описують дифузійне, кінетичне і змішане горіння. У тому числі використовуються моделі, засновані на припущенні про вихровий в'язкості; модель з попередньо згенерованої хімічної таблицею; модель горіння з детальної хімією; Flamelet-модель для дифузійного горіння;

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модель для попередньо перемішаного і змішаного горіння; модель для розрахунку утворення окислів азоту; модель для розрахунку виходу сажі; Модель двофазного горіння; модель процесів займання.

В ANSYS CFX [5] успішно вирішуються багато практичних задач. В тому числі, моделюються задачі зовнішньої аеродинаміки транспортних засобів, літальних апаратів, руху середовищ і т. д. Будівельники визначають вітрові навантаження і розраховують вентиляцію камер. Досліджуються течія в каналах, багатофазні течії, визначаються гідравлічні втрати, вирішуються завдання сполученого теплопереносу, завдання розрахунку напруженого стану, міцності.

Програма ANSYS CFX [5] може використовуватися для розрахунку камер горіння, пальників, утворення продуктів горіння і, зокрема, окислів азоту. Можуть моделюватися процеси вибуху, може проводитися оптимізація конструкцій агрегатів, теплообмінників, розраховуватися трубопровідна та запірна арматура, реактори, сепаратори, раціональні режими роботи теплових пристроїв.

Рішення задач в ANSYS CFX [5] проводиться аналогічно рішенням завдань в ANSYS Myltiphysics і проходить ряд стадій (етапів), показаних на рис. 1.1. Геометрія об'єкта повинна створюватися в сторонньої CAD-програмі, і при першому знайомстві це може сприйматися негативно. Але дане незручність компенсується великими можливостями програми з експорту та імпорту даних. Наприклад, зручно виконувати геометричні моделі об'єктів в програмі «SOLIDWORKS», зберігати їх у форматі Parasolid і експортувати в програму ANSYS CFX. Модель виконувалася для приватного розрахунку в складі CAE-аналізу теплової роботи агрегату, і тому включає лише частину штовхаючої нагрівальної печі з методичної та зварювальної зонами. Сітка будується або в додатку пакету CFX-Mesh або в універсальному сітковому пакеті ANSYS ICEM CFD.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

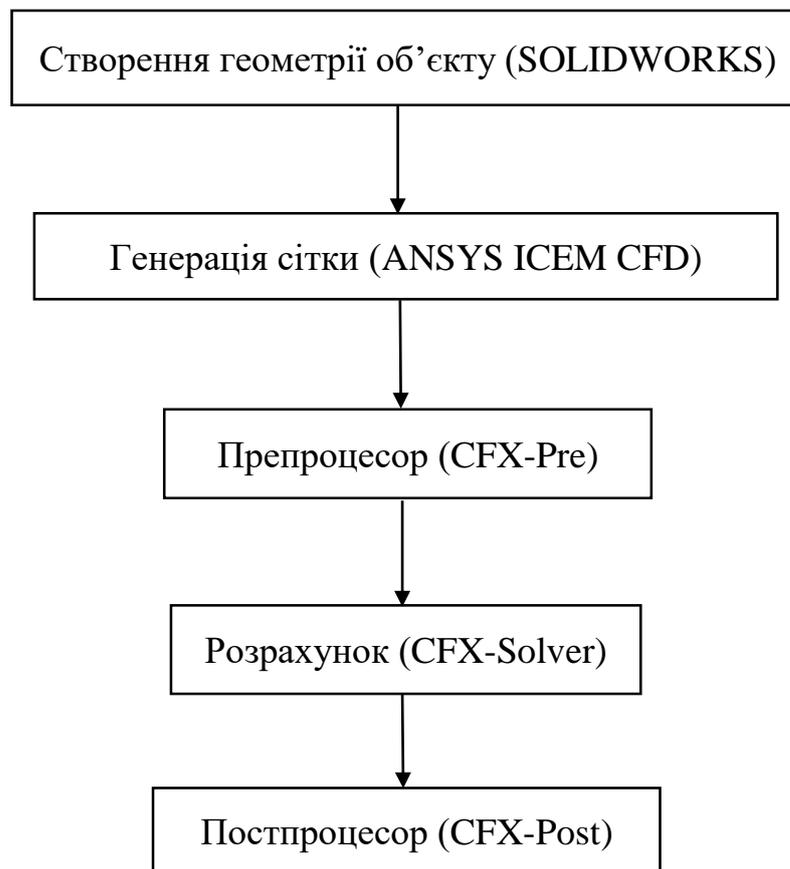


Рисунок 1.1. Послідовність рішення задачі в програмному комплексі ANSYS CFX [5]

Потім в препроцесорі [5] визначається «фізика завдання» - задаються зони типу INLET, через який середовище входить в об'єкт; зони типу OUTLET, через що середовище виходить з об'єкта; зони типу WALL, до яких відносяться поверхні, що обмежують частини об'єкта і т. д. Зони по черзі виділяються курсором, і на них задаються граничні умови.

2. ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПРИМІЩЕННЯ

2.1 Створення тривимірної моделі

Для проведення математичного розрахунку теплового стану приміщення було створено тривимірну модель приватного будинку за допомогою програмного комплексу SolidWorks (рис. 2.1).

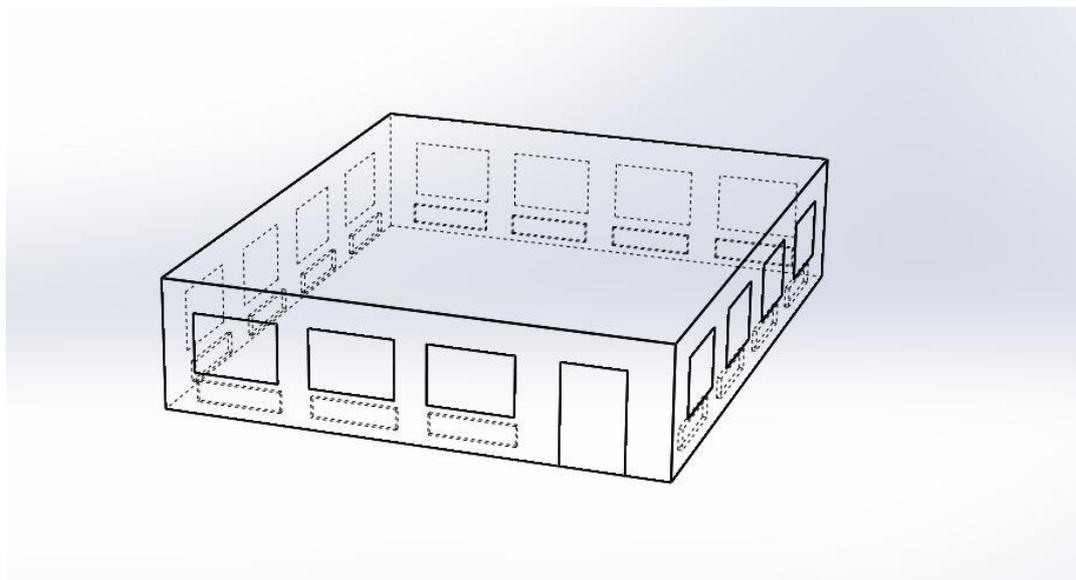


Рисунок 2.1 - Тривимірна модель приватного будинку

Для зручності побудови і зменшення об'єму розрахункової сітки будинок було розділено на дві рівні частини, і для побудови сітки в генераторі ICEM CFD було взято тривимірну модель, яка зображена на рис. 2.2.

						6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			17

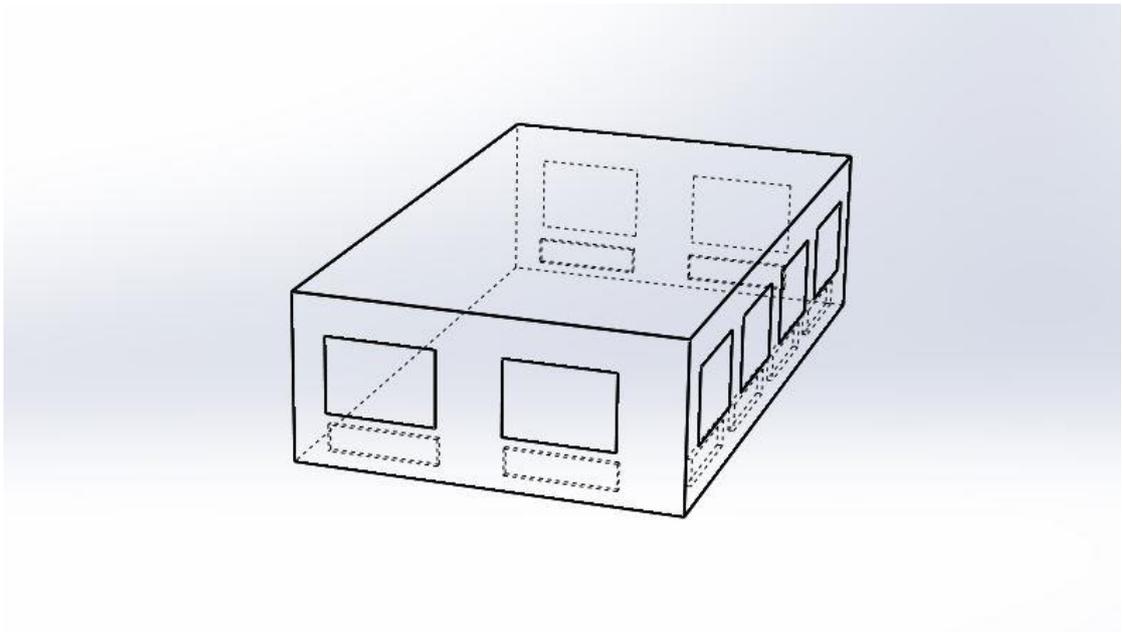


Рисунок 2.2 - Тривимірний модель частини будинку для імпорту в IСЕМ CFD

Розрахунковою областю в даній задачі є внутрішній об'єм повітря в будинку включаючи його заповнення приладами опалення.

2.2 Побудова розрахункової сітки

Побудова розрахункової сітки являється невід'ємною частиною процесу комп'ютерного інженерного моделювання (створення чисельної моделі). Якість розрахункової сітки впливає на точність отриманих результатів, збіжність процесів, об'єм необхідних ресурсів, які будуть затрачені комп'ютером (об'єм оперативної пам'яті) та час необхідний для вирішення задачі.

Після створення тривимірної моделі розрахункової області будувалася розрахункова сітка. Для побудови розрахункової сітки використовувався генератор сіток IСЕМ CFD 16.2, у який була імпортована раніше створена геометрія тривимірної моделі розрахункової області з SolidWorks (рис. 2.3).

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

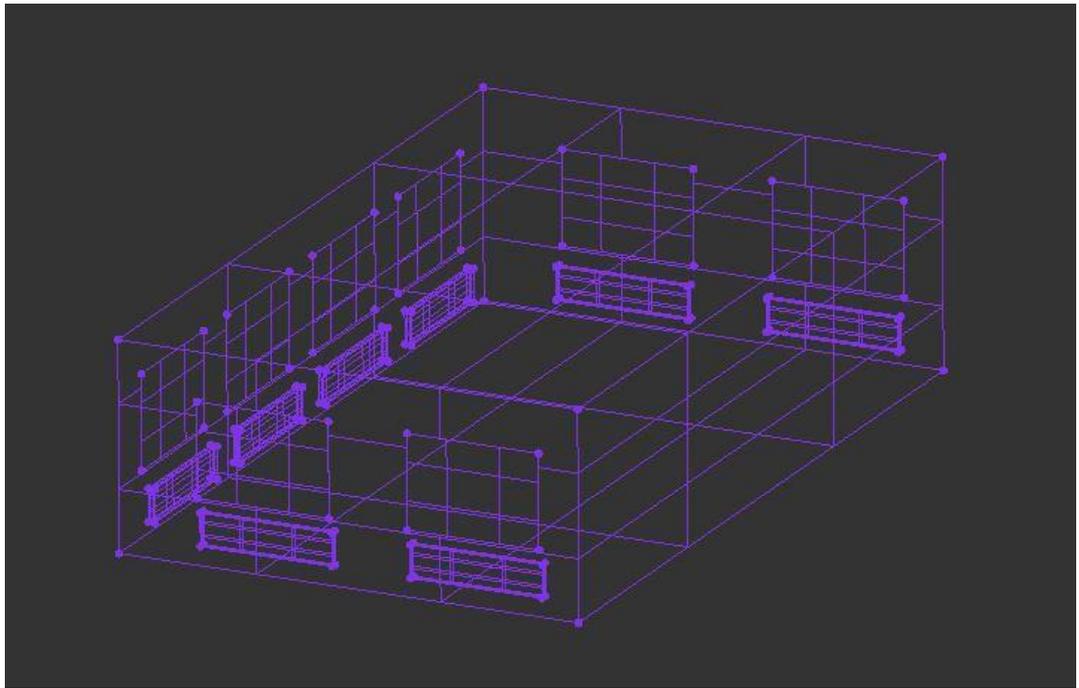


Рисунок 2.3 - Геометрія розрахункової області

Оскільки геометрія розрахункової області є достатньо складною то вона розбивалась на блоки (рис. 2.4).

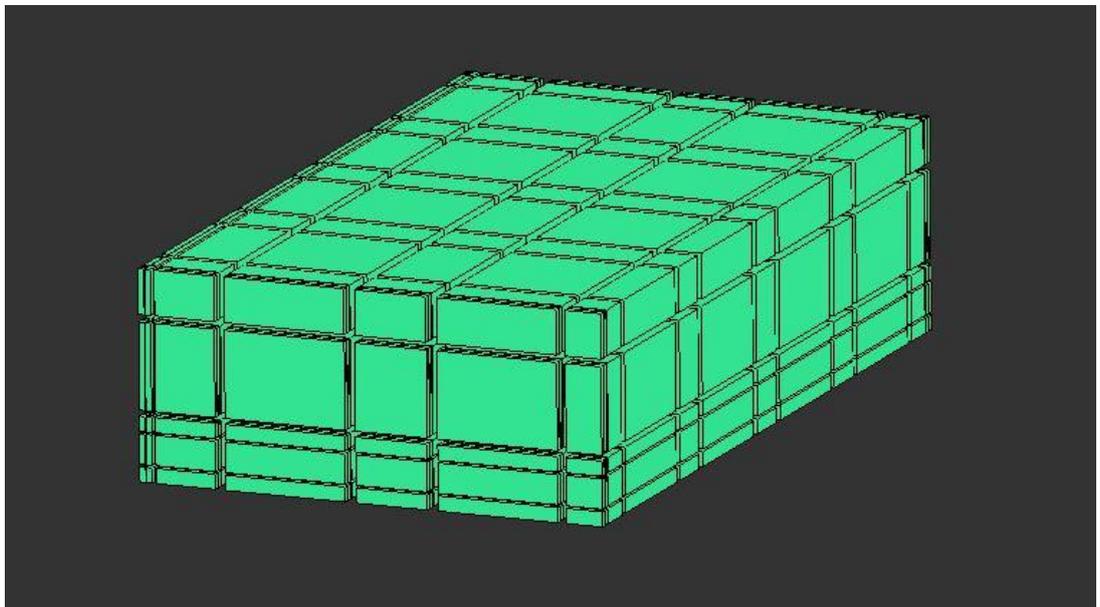


Рисунок 2.4 - Розрахункова область, розбита на блоки

Побудована розрахункова сітка є гексаедерною блочно-структурованою. Сітка є структурованою, тобто складається виключно з шестигранних (об'ємних) елементів – гексаедрів, та має регулярну структуру з явними рядами елементів.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Вибір такого типу сітки пояснюється тим, що дана геометрична модель розрахункової області представляє собою сукупність правильних елементарних об'ємів, для яких прийнятна впорядкована сітка елементів. Кожний блок представляє собою паралелепіпед, ребра і грані якого асоціюються з точками, лініями і поверхнями області геометрії. Для кожного блока будується структурована сітка, яка автоматично переноситься на асоційовану з блоком фігуру, тобто кожен блок розбивається на більш дрібні структурні елементи.

Маючи уявлення про протікання процесів, які будуть досліджуватися в даній задачі визначаємо місця на геометричній моделі де будуть виникати швидкі зміни параметрів (зміна густини потоків, скачки температур, швидкостей і тд.). Для більш точного врахування цих змін подрібнюємо елементи розрахункової сітки (комірки) в місцях дії опалювальних приладів.

Для більш коректного описання пристіночної течії поблизу твердих стінок (місць контакту повітря з твердою поверхнею) проводилося згущення комірок, причому чим ближче до стінки тим комірки більш дрібніші, а чим ближче до внутрішньої зони розрахункової області тим вони крупніші. Крім того для підвищення якості сітки виконаний плавний перехід від комірок малого розміру до великого.

Якість побудованої розрахункової сітки була перевірена засобами візуалізації на наявність візуальних помилок в прообразі розрахункової сітки [5] (наявність занадто вузьких витягнутих комірок, вироджених та скошених комірок), при цьому помилки не виявлені, а це означає, що побудована сітка достатньої якості. Для більш детальної перевірки використовувався пакет опцій ICEM CFD 16.2. Були побудовані діаграми якості за допомогою яких можна виявити неявні помилки в прообразі розрахункової сітки. Для оцінки якості використовувалися наступні критерії: determinant (детермінант), angle (кут між гранями комірок), aspect ratio (коефіцієнт пропорційності), volume (об'єми). Параметр детермінант (determinant) характеризує співвідношення сторін стінок гексаедра (Рис. 2.5).

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

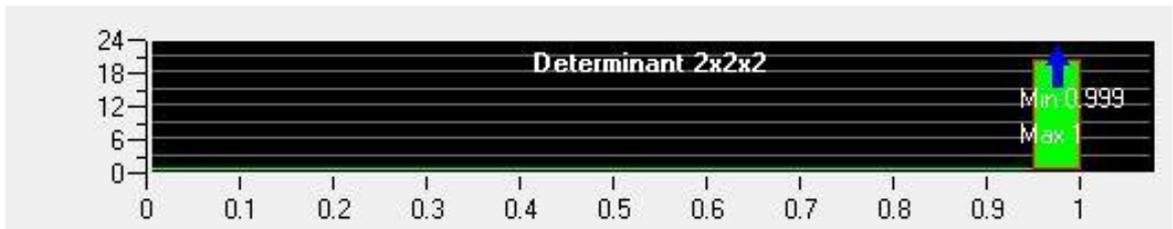


Рисунок 2.5 - Діаграма якості розрахункової сітки (детермінант)

Сітка достатньо гарної якості. Завантажуємо сітку з блоків і зберігаємо її (Рис. 2.6).

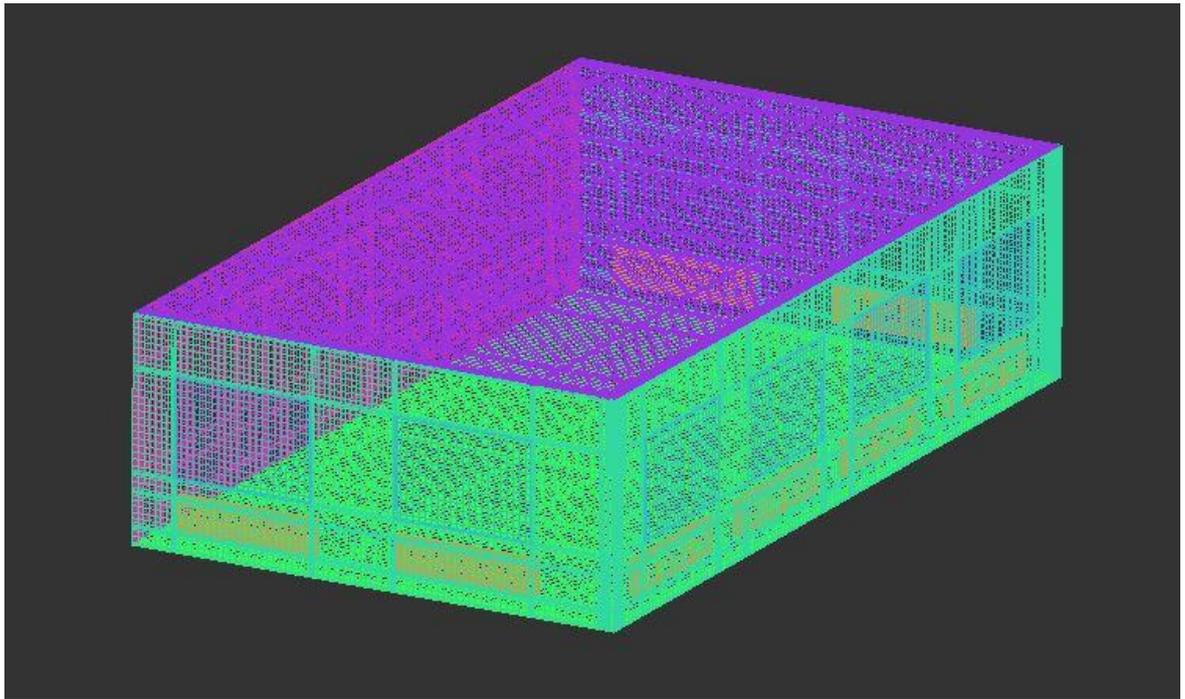


Рисунок 2.6 - Вигляд готової розрахункової сітки

Основні параметри отриманої розрахункової сітки:

- кількість елементів – 1138995 шт;
- кількість вузлів – 1099075 шт.

2.3 Опис розрахункової моделі

Для задання параметрів розрахункової області сітку було імпортовано до Препроцесора CFX-Pre (Рис. 2.7).

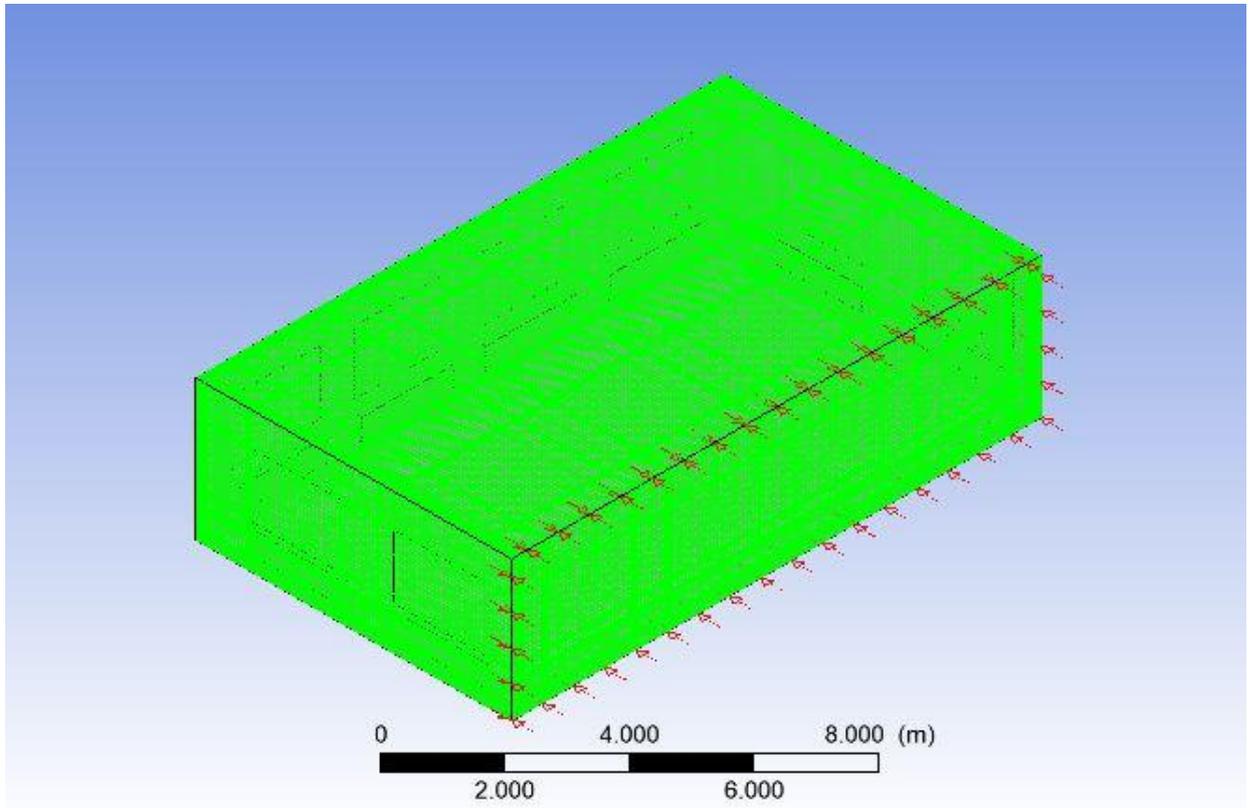


Рисунок 2.7 - Розрахункова область в модулі CFX-Pre

В Препроцесорі задаються умови однозначності (граничні умови) та вибираються математичні моделі, які необхідні для чисельного вирішення задачі (створюється розрахункова модель). В даній задачі розглядався процес (задача) розповсюдження теплоти в розрахунковій області. За допомогою Препроцесора створювалася розрахункова модель складного теплообміну (радіаційно-конвективного) в розрахунковій області, тобто описані процеси конвективного теплообміну, що супроводжуються тепловим випромінюванням. Конвективний теплообмін – спільний процес перенесення теплоти конвекцією та теплопровідністю. Конвекція – це процес перенесення теплоти при переміщенні мікрочастинок тіла в просторі із зони з однією температурою в зону з іншою

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурою. Теплопровідність – процес перенесення теплоти внаслідок хаотичного руху та енергетичної взаємодії між мікрочастинками, з яких складається тіло (молекул, атомів, електронів); вона не залежить від руху тіла або його частин. Теплове випромінювання (променистий теплообмін) – це процес перенесення теплоти електромагнітними хвилями, зумовлений тільки температурою і оптичними властивостями випромінювального тіла. За променистого теплообміну відбувається подвійне перетворення енергії: спочатку внутрішня енергія тіла, що випромінює енергію, перетвориться на променисту енергію, яка передається в середовище, доки на своєму шляху не натрапить на непрозоре тіло, у якому відбувається процес перетворення променистої енергії на внутрішню енергію. В цій задачі розрахунковою областю є об'єм, який займає повітря в приміщенні тому конкретно буде розглядатися процес передачі тепла від поверхонь твердих стінок (опалювальних приладів, стін, підлоги, стелі, дверей, вікна, меблів) до повітря (складна тепловіддача). При цьому теплота переноситься конвекцією завдяки контакту стінок з повітрям, що їх обтікає, і ті самі стінки випромінюють і поглинають енергію, обмінюючись потоками випромінювання з повітрям і навколишніми предметами.

Зазначені вище процеси розповсюдження теплоти в розрахунковій області являються нестационарними (змінюються в часі), тому проведений розрахунок в стаціонарній постановці (приведений до певного моменту в часі). Це пояснюється особливістю комп'ютерного інженерного розрахунку, що буде описаний в підрозділі 2.4.

Для математичного визначення даної задачі задавалися умови однозначності (крайові умови) [5], що містять:

- геометричні умови, які характеризують форму і розміри тіла (розрахункової області);
- фізичні умови, які характеризують фізичні властивості тіла (густина, в'язкість, теплопровідність тощо);
- часові умови, які формують особливості перебігу процесу в часі (задаються для нестационарного процесу);

						6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
							23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

– граничні умови, що характеризують умови протікання процесу на межах тіла (розрахункової області).

Геометричні розміри і форма розрахункової області автоматично визначаються модулем Препроцесор, так як дана геометрична модель представляє собою структуровану сітку, принцип побудови якої описаний в підрозділі 2.2.

Робочим тілом в даній розрахунковій області є повітря, термодинамічні параметри якого наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Термодинамічні параметри повітря

Назва параметру	Розмірність	Чисельне значення
Молярна маса	$\frac{кг}{Кмоль}$	28,96
Густина	$кг/м^3$	1,284
Питома теплоємність ($p = const$)	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	1003,8
Тиск	атм	1
Коефіцієнт теплового розширення	$К^{-1}$	0,00366
Динамічна в'язкість	$Па \cdot с$	$1,725 \cdot 10^{-5}$
Коефіцієнт теплопровідності	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	$2,428 \cdot 10^{-2}$
Коефіцієнт поглинання	$м^{-1}$	0,01
Коефіцієнт розсіювання	$м^{-1}$	0

При вирішенні задачі з моделювання теплового стану приміщення було розраховано нестационарний процес розповсюдження теплоти в розрахунковій області при використанні опалювальних приладів (радіатори). Часові умови для розрахунку даного процесу наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Часові умови

Параметри	Розмірність	Чисельне значення
		Радіатори
Початковий час	хв	0
Крок розрахунку	хв	0,5
Загальний час розрахунку	хв	40

Граничні умови можна задавати трьома способами. В даному випадку застосовувалися граничні умови першого роду. За граничних умов першого роду задавався розподіл температури на поверхні стінки T_c для кожного проміжку часу τ :

$$T_c = f(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

де x, y, z - координати поверхні тіла (рис. 2.13).

Оскільки розглядався достатньо вузький проміжок часу (до 1 години), а процес зміни температури стінок достатньо інерційний то приймалося, що температура на поверхні твердих стінок протягом заданого проміжку часу залишається величиною сталою, а рівняння (1) набуває вигляду:

$$T_c = const.$$

Граничні умови на кожному з елементів приведені в табл. 2.3.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3 – Граничні умови

Тверда стінка	Вид граничної умови	Величина граничної умови
Стіни	Коефіцієнт теплопровідності Зовнішня температура	$3,3 \frac{Вт}{м \cdot К}$ -24 °С
Радіатори	Температура на поверхні	50 °С
Підлога	Температура на поверхні	16 °С
Вікна	Коефіцієнт теплопровідності Зовнішня температура	$0,54 \frac{Вт}{м \cdot К}$ -24 °С
Стеля	Коефіцієнт теплопровідності Зовнішня температура	$5,35 \frac{Вт}{м \cdot К}$ -24 °С

Усі тверді стінки були прийняті шорсткими, середнє арифметичне відхилення профілю (Ra) складало 25 мкм.

При розрахунку використовувалась модель гравітації, яка дозволяє врахувати процес вільної (природної) конвекції в замкнутому об'ємі, що обумовлена дією масових (об'ємних) сил. Масові сили – сили, що прикладені до всіх частинок речовини і діють під впливом зовнішніх силових полів (поле гравітації). Природна конвекція виникає під час теплообміну внаслідок теплового розширення нагрітого біля поверхні тепловіддачі повітря (різниці густин нагрітих і холодних об'ємів середовища). Інтенсивність теплового розширення повітря характеризується температурним коефіцієнтом об'ємного (теплового) розширення [7]:

$$\beta = \frac{1}{v} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{P=const},$$

де $v = \frac{1}{\rho}$ - питомий об'єм повітря, $\frac{м^3}{кг}$;

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

ρ - густина повітря, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Для повітря коефіцієнт об'ємного розширення можна наближено отримати, користуючись рівнянням Клапейрона [7]:

$$\beta = \frac{1}{T}.$$

Запишемо значення коефіцієнта об'ємного розширення через різницю питомих об'ємів та густини [7]:

$$\beta \approx \frac{1}{v} \cdot \frac{v - v_p}{t - t_p} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p \cdot (t - t_p)}, \frac{1}{\text{К}},$$

де v_p - питомий об'єм, ρ_p - густина, t_p - температура холодного повітря;

v - питомий об'єм, ρ - густина, t - температура прогрітого повітря.

Наявність різниці густин призводить до того, що на будь-який одиничний об'єм прогрітого повітря діятиме підймальна сила F_{Π} , яка дорівнює алгебраїчній сумі виштовхувальної архімедової сили $A = \rho_p \cdot g$ і сили ваги $G = \rho \cdot g$ [7]:

$$F_{\Pi} = A - G = g \cdot (\rho_p - \rho) = \beta \cdot \rho_p \cdot g \cdot (t - t_p), \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

Підймальна сила F_{Π} переміщує прогріте повітря вгору так і виникає природна конвекція. В даній задачі наша розрахункова область побудована в просторових координатах X, Y, Z (рис. 2.13), тому для врахування моделі гравітації по координатній осі Y було задано значення прискорення вільного падіння g :

$$Y = -g = -9,81, \text{м/с}^2.$$

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Задавалися слiдуючі значення швидкостi руху повітря в приміщенні на початку прогрівання:

$$U_x = 0, \text{ м/с};$$

$$U_y = 0, \text{ м/с};$$

$$U_z = 0, \text{ м/с}.$$

Швидкiсть по всiм трьом координатам рiвна нулю, отже в даній задачі розглядалося переміщення повітря залежно від рiзницi температур на поверхнях твердих стiнок (опалювальні прилади, стiни, стеля, пiдлога і тд.).

Для вирiшення задачі використовувалась модель теплообміну в постановці (Thermal Energy), що включає сукупність транспортних рiвнянь: нерозривності, iмпульсу, повної енергiї (збереження енергiї). Зазначені рiвняння в подальшому використовуються для вирiшення теплового енергетичного рiвняння. Рiвняння нерозривності, iмпульсу, збереження енергiї в стаціонарній структурі (операторному вигляді) мають вигляд:

- рiвняння нерозривності [8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U) = 0,$$

де U - вектор швидкості $U_{x,y,z}, \text{ м/с}$.

- рiвняння iмпульсу [8]:

$$\frac{\partial (\rho \cdot U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M,$$

де τ - молекулярний тензор напруження (напруження зсуву), $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

В даному рівнянні тензор τ пов'язаний зі швидкістю відносної деформації [8]:

$$\tau = \mu \cdot \left(\nabla \cdot U + (\nabla \cdot U)^T - \frac{2}{3} \cdot \delta \cdot \nabla \cdot U \right),$$

де δ - матриця ідентичності (функція Кронекера Дельта).

– рівняння повної енергії [8]:

$$\frac{\partial(\rho \cdot h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \cdot h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E.$$

В цьому рівнянні h_{tot} - повна ентальпія, що пов'язана зі статичною ентальпією $h(T, p)$ [8]:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \cdot U^2.$$

Параметр $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ характеризує роботу в'язких зусиль і називається в'язкісним терміном роботи. Параметр $U \cdot S_M$ характеризує роботу впливу зовнішніх джерел імпульсу і в даному випадку не враховується.

Для того щоб отримати альтернативну форму енергетичного рівняння знаходимо значення механічної енергії [8]:

$$K = \frac{1}{2} \cdot U^2.$$

Механічне енергетичне рівняння отримано як скалярний добуток U з рівнянням імпульсу [8]:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \cdot K) = -U \cdot \nabla p + U \cdot (\nabla \cdot \tau) + U \cdot S_M.$$

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо відняти дане рівняння від рівняння повної енергії то отримаємо теплове енергетичне рівняння [8]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \cdot h) = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot T) + U \cdot \nabla p + \tau : \nabla \cdot U + S_E.$$

Параметр $\tau : \nabla \cdot U$ завжди є додатним і названий в'язкими втратами. З подальшими допущення, що описані вище, отримуємо спрощене теплове енергетичне рівняння [8]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \cdot h) = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot T) + \tau : \nabla \cdot U + S_E.$$

Дане рівняння також може бути отримане з попереднього рівняння якщо h фактично інтерпретується як внутрішня енергія [8]:

$$e = h - \frac{P}{\rho}.$$

Тоді рівняння теплової енергії запишеться в даному вигляді (еквівалентне рівняння теплової енергії) [8]:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot U \cdot e) = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot T) - p \cdot \nabla \cdot U + \tau : \nabla \cdot U + S_E.$$

Дане рівняння еквівалентне рівнянню теплової енергії коли не враховується параметр $-p \cdot \nabla \cdot U$ і h інтерпретується як e . Основним параметром являється статична ентальпія хоч фактично представляє собою внутрішню енергію. Визначальним параметром являється $\frac{P}{\rho}$ за допомогою якого підбираються значення з таблиць ентальпії.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для випадку, що розглядається, для потоків з низькими значеннями числа Маха параметри $\frac{\partial p}{\partial t}$ та $U \cdot \nabla p$ не враховуються оскільки мають дуже незначний вплив.

В даній задачі рівняння теплової енергії хоч і являється спрощеним, але дозволяє добре описати протікання теплообмінних процесів у газовому середовищі (повітря).

Окрім цього модель теплообміну (Thermal Energy) доповнюється моделлю вихрової дифузії (Eddy Diffusivity) [8]. Дана розрахункова модель розроблена на основі гіпотези Бусінеска [9]. Ця гіпотеза пояснює зростання величини гідравлічного тертя при переході від ламінарного режиму руху до турбулентного. Бусінеск висунув гіпотезу проте що в турбулентних потоках виникає особлива властивість – турбулентна в'язкість μ_t . За Бусінеском в узагальнений закон Ньютона замість звичайної (молекулярної) в'язкості μ необхідно підставляти суму $\mu + \mu_t$. Також окрім турбулентної в'язкості був введений показник турбулентної теплопровідності λ_t , яка характеризує турбулентний перенос теплоти. Турбулентна в'язкість визначається з врахуванням турбулентного напруження як [9]:

$$\mu_t = -\frac{\overline{\rho u_i u_j}}{\overline{\partial u_i / \partial x_j}},$$

де $\overline{u_i u_j}$ - осереднений добуток пульсацій швидкостей по координатам;

$\overline{\rho u_i u_j}$ - напруженість Рейнольдса, характеризує турбулентне перенесення імпульсу в приграничному шарі.

Турбулентна теплопровідність визначається з врахуванням турбулентного теплового потоку як [9]:

$$\lambda_t = \frac{\rho c_p \overline{u_j T}}{\overline{\partial T / \partial x_j}},$$

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\overline{u_j T}$ - осереднений добуток пульсацій швидкості та температури;

$\rho c_p \overline{u_j T}$ - параметр що визначає турбулентний перенос теплоти.

Разом з величинами μ_t та λ_t в розрахунках використовуються кінематична турбулентна в'язкість $\nu_t = \mu_t / \rho$ та турбулентна температуропровідність $a_t = \lambda_t / (\rho c_p)$. Це дозволяє перейти до безрозмірних критеріїв [6]:

– турбулентне число Прандтля:

$$\text{Pr}_t = \frac{\nu_t}{a_t} = \frac{\mu_t c_p}{\lambda_t};$$

– турбулентне число Шмідта:

$$\text{Sc}_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t}.$$

Дані критерії характеризують співвідношення процесів турбулентного переносу імпульсу, речовини та тепла в повітрі. Так як коефіцієнти μ_t та λ_t теоретично розрахувати неможливо то для цього і використовується модель вихрової дифузії (Eddy Diffusivity) на основі гіпотези Бусінеска. В даній моделі задавалися наступні значення турбулентних критеріїв:

$$\text{Pr}_t = 0,9;$$

$$\text{Sc}_t = 0,9.$$

Вибір даних значень критеріїв пояснюються численними експериментальними дослідженнями, які показали, що дані числа для газових середовищ (повітря) можуть набувати значень від 0,7 до 1,0 по поверхні пограничного шару, найбільш точне значення при заданих умовах наближається до 0,9.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Бусінеск знайшов співвідношення між напруженостями Рейнольдса та в'язкими зусиллями тензора деформації через параметр турбулентної в'язкості [7]:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right).$$

За даною гіпотезою потоки скаляра Рейнольдса лінійно зв'язані зі скалярним градієнтом [8]:

$$-\overline{\rho u_i \varphi} = \Gamma_t \frac{\partial \Phi}{\partial x_i},$$

де φ - загальна скалярна змінна;

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} - \text{вихрова (турбулентна) дифузійна здатність, } \frac{кг}{м \cdot с}.$$

Наведені вище рівняння можуть описати турбулентні коливання за допомогою функцій скупих змінних і тільки якщо відома турбулентна в'язкість. $k-\varepsilon$ модель турбулентності з двома рівняннями використовує показник турбулентної в'язкості μ_t . Тоді згідно наведеної гіпотези рівняння імпульсу запишеться як [8]:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M,$$

де S_M - сума масових сил, $\frac{кг}{м^2 \cdot с^2}$;

$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ - ефективна в'язкість.

Модифікований тиск визначається як [7]:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k},$$

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ - параметр, що характеризує розбіжність швидкостей (в

даній задачі не враховується так як використовується тільки для нестискуваних речовин (вода)).

Рівняння енергії відповідно поданої моделі запишеться як [8]:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})] + S_E.$$

Аналогічно наведемо транспортне рівняння для додаткових змінних [8]:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_\Phi + \frac{\mu_t}{\sigma_\Phi} \right) \right] + S_\Phi,$$

де Γ_Φ - динамічна дифузійна здатність додаткової змінної, $\frac{K\mathcal{L}}{M \cdot C}$;

Φ - додаткова змінна, $\frac{K\mathcal{L}}{M^3}$.

Слід зазначити те, що хоч і трансформація параметрів молекулярної дифузії може являтися неточною, але турбулентні параметри є правильними згідно моделі вихрової дифузії (Eddy Diffusivity). Крім того, оскільки турбулентна дифузія являється набагато більшою ніж молекулярна то незначні помилки в останній ігноруються.

Модель переміщення повітря в розрахунковій області описувалася рівняннями Нав'є-Стокса осередненими за числом Рейнольдса. Відповідно до цієї модель швидкість U_i розкладається на два компонента: компонент осередненої швидкості \overline{U}_i та компонент зміни в часі u_i [8]:

$$U_i = \overline{U}_i + u_i.$$

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Осереднений компонент швидкості визначається як [8]:

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt,$$

де Δt - проміжок часу, що являється великим відносно турбулентних коливань, але малим відносно проміжку часу для якого вирішуються рівняння, s .

Відповідно до цього запишемо енергетичне рівняння Нав'є-Стокса, що осереднене за числом Рейнольдса [8]:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \right] + S_E.$$

Аналогічно додаткова змінна Φ розкладається на осереднений компонент $\bar{\Phi}$ та компонент зміни у часі ϕ і записується Нав'є-Стокса, що осереднене за числом Рейнольдса для додаткової змінної [8]:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j \phi} \right) \right] + S_\phi.$$

В заданій розрахунковій області будуть протікати турбулентні режими течії. Турбулентність складається із коливань в області потоку в часі та просторі. Турбулентність – це складний процес тому що являється тривимірним, нестійким, залежить від багатьох факторів і значний ефект на специфіку потоків. Турбулентність виникає коли сили інерції в речовині стають значними порівняно з силами внутрішнього тертя і характеризуються великими числами Рейнольдса. Пряме чисельне моделювання турбулентних потоків потребує обчислювальної потужності такої, яка на багато порядків являється більшою ніж буде доступною в найближчому майбутньому. А для того щоб включити ефекти турбулентності використовують методи, що включають моделі турбулентності.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В розглядуваній задачі для вирішення рівнянь Нав'є-Стокса [8] осереднених за числом Рейнольдса використовується $k - \varepsilon$ модель турбулентності. Дана модель заснована на гіпотезі дифузії градієнта для того, щоб пов'язати зусилля Рейнольдса із швидкісними градієнтами та турбулентною в'язкістю. Турбулентна в'язкість змодельована як функція, що залежить від турбулентної швидкості та турбулентної шкали відстаней. Турбулентна шкала відстаней залежить від властивостей області турбулентності та кінетичної енергії турбулентності k (визначається як дисперсія коливань швидкості). Дана модель пов'язує турбулентну в'язкість та кінетичну енергію турбулентності через відношення [8]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

де $C_\mu = 0,09$ - константа моделі турбулентності.

При використанні цієї моделі система рівнянь руху доповнюється двома диференціальними рівняннями, що описують перенесення відповідно кінетичної енергії турбулентності k і швидкості дисипації ε [8]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb};$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b});$$

де $C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3$ - константи моделі турбулентності.

Зсув турбулентності із-за впливу сил внутрішнього тертя моделюється як [8]:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right).$$

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В розглядуваній задачі враховувалося перенесення тепла випромінюванням (радіаційний теплообмін). Запишемо рівняння, що враховує розповсюдження тепла випромінювання має вигляд [8]:

$$\frac{dI_v(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = \left(-(K_{av} + K_{sv})I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + K_{av}I_b(\nu, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} dI_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}')\Phi(\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}')d\Omega' + S \right),$$

де ν - частота випромінювання;

\mathbf{r} - радіус-вектор;

\mathbf{s} - направляючий вектор;

s - довжина проміню випромінювання;

K_{av} - коефіцієнт поглинання;

K_{sv} - коефіцієнт розсіювання;

I_b - інтенсивність випромінювання чорного тіла;

I_v - спектральна інтенсивність випромінювання, що залежить від довжини та напрямку дії променя випромінювання;

T - абсолютна температура;

Ω - тілесний кут;

Φ - функція внутрішнього розсіювання;

S - інтенсивність джерела випромінювання.

Враховуючи залежності від трьох просторових та двох координат, довжини та частоти випромінювання формальне вирішення рівняння розповсюдження теплоти випромінюванням є трудомістким. Тому для його вирішення застосовуються моделі спектральних та направляючих залежностей.

Для формування направляючих залежностей апроксимації використовуємо модель Монте-Карло. Модель Монте-Карло передбачає, що інтенсивність випромінювання пропорційна диференціальному кутовому потоку фотонів. Тобто поле випромінювання представляє собою газ фотонів. Для цього газу існує ймовірність, що фотон поглинеться при заданій частоті, а ймовірність поглинання

										Арк.
										37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	6.144.09 БР 00 ПЗ					

залежить від коефіцієнту поглинання речовини. Тоді інтенсивність випромінювання пропорціональна відстані яку проходить фотон в одиниці об'єму за одиницю часу. Тобто пучок фотонів, який випущений нагрітою поверхнею, має певну енергію та масу. Далі він проходить через об'єм повітря, який поглинає або розсіює пучок. Коли енергія фотона в результаті поглинання повітрям або стінкою стає менше певного значення то фотон «вмирає».

Для спектральної апроксимації застосуємо «сіру» модель (Grey). Сіра спектральна модель передбачає, що вся радіаційна кількість теплоти майже однорідна по спектру. Тоді виходить, що радіаційна інтенсивність однакова для всіх частот випромінювання, тобто необхідно вирішувати всього одне рівняння радіаційної передачі (розповсюдження тепла випромінюванням), що наведено вище. Вихідні дані коефіцієнтів поглинання та розсіювання середовища бралися із табл. 2.1.

2.4 Проведення комп'ютерного розрахунку

Наступний етап – проведення комп'ютерного розрахунку. Для його проведення файл із вже заданими параметрами було імпортовано до програмного продукту CFX-Solver Manager. Даний продукт є програмою для ітеративного обчислення, яка вирішує задані в розрахунковій моделі рівняння методом поступових наближень. Спочатку поставлена задача було розрахована в стаціонарному режимі. Потім результати стаціонарного розрахунку були використані як початкові дані для нестационарного розрахунку. Контроль за вирішенням заданих рівнянь проводився візуально (рис. 2.8, 2.9, 2.10).

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

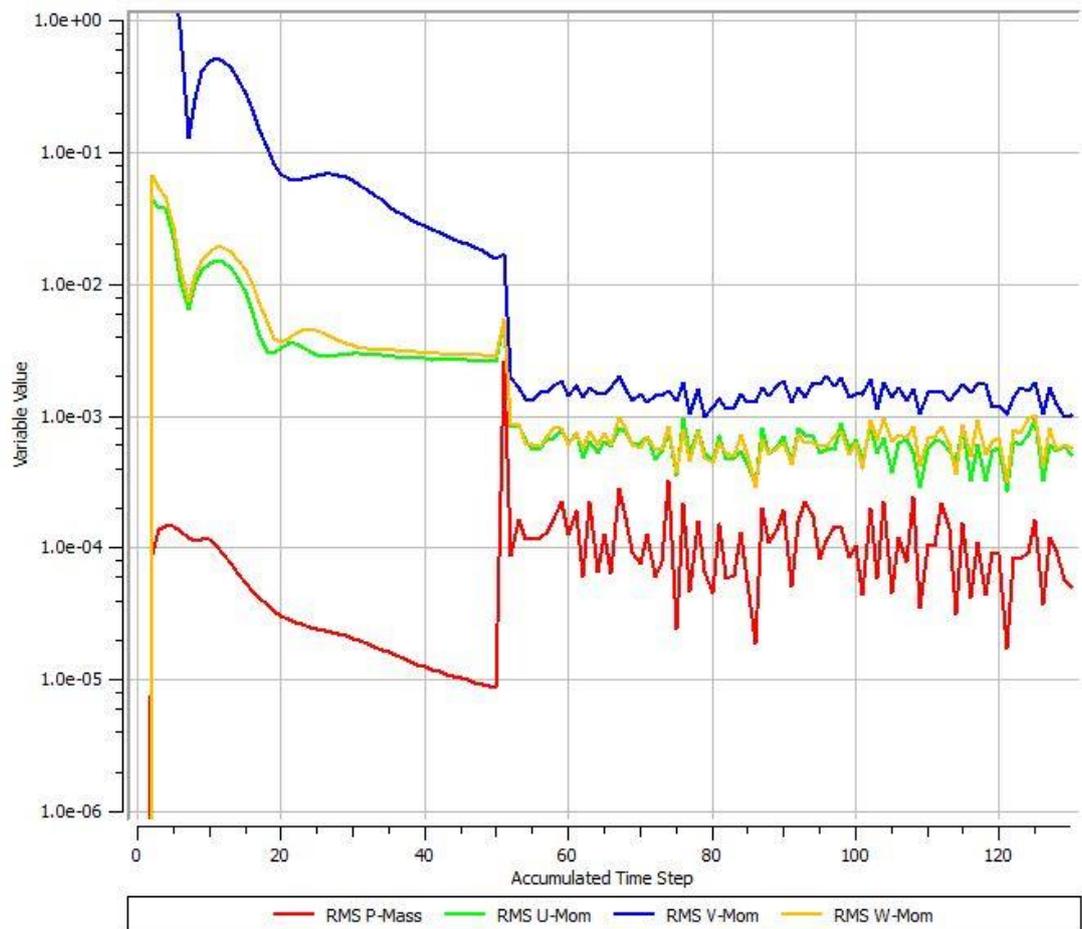


Рисунок 2.8 – Контроль за вирішенням рівнянь швидкості та масової витрати

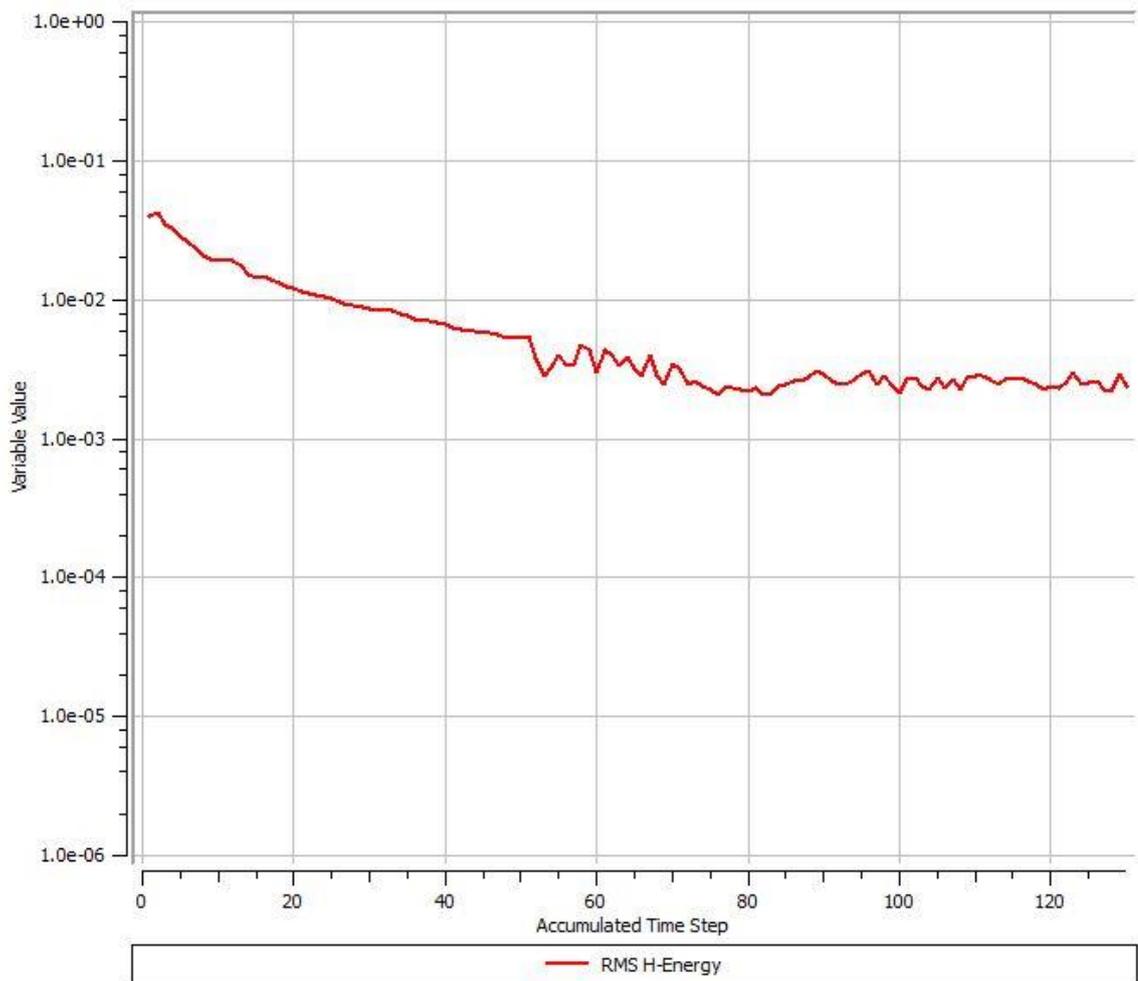


Рисунок 2.9 – Контроль за вирішенням рівнянь енергетичного балансу

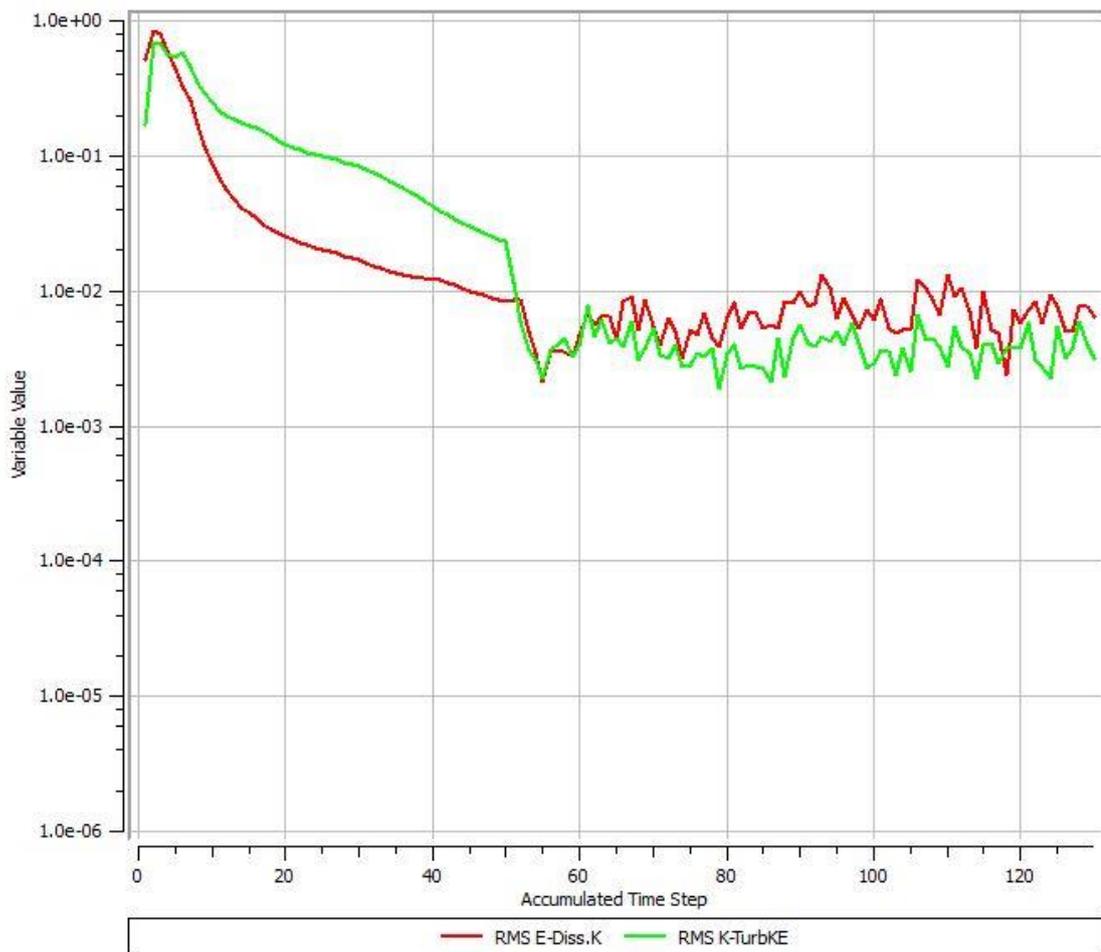


Рисунок 2.10 – Контроль за вирішенням рівнянь

Було задане значення критерію точності вирішення рівнянь $1.0e-04$ (10^{-4}) по середньоквадратичному відхиленню (RMS), що є достатнім для інженерних розрахунків.

3. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ

3.1 Загальний аналіз результатів розрахунків

Результатом комп'ютерного розрахунку математичної моделі теплового комфорту будинку стали основні параметри в розрахунковій області при виході на стаціонарний режим процесу складної тепловіддачі (тобто за досягнення максимальної і стабільної у часі температури повітря). Основні гідромеханічні та теплофізичні параметри були осереднені по об'єму розрахункової області. В табл. 3.1 наведені основні геометричні, гідромеханічні, теплофізичні та оптичні параметри розрахункової області при досягненні стаціонарного режиму (теплової рівноваги).

Таблиця 3.1 – Основні геометричні, гідромеханічні та теплофізичні параметри розрахункової області

Назва параметру	Розмірність	Чисельне значення
1	2	3
Ширина приміщення	<i>м</i>	6
Висота приміщення	<i>м</i>	3
Довжина приміщення	<i>м</i>	7
Визначальний геометричний розмір	<i>м</i>	6,495
Густина	$\text{кг}/\text{м}^3$	1,284
Динамічна в'язкість	$\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$1,725 \cdot 10^{-5}$
Швидкість	<i>м/с</i>	$5,4086 \cdot 10^{-3}$

Продовження таблиці 3.1

1	2	3
Коефіцієнт теплового розширення	K^{-1}	$3,66 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт теплопровідності повітря	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	$2,428 \cdot 10^{-2}$
Питома теплоємність повітря ($p = const$)	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	$1,0038 \cdot 10^3$
Число Рейнольдса (Re)	-	2614
Число Прандтля (Pr)	-	$7,1316 \cdot 10^{-1}$
Число Грасгофа (Gr)	-	$9,3314 \cdot 10^{11}$
Число Релея (Ra)	-	$1,9652 \cdot 10^{11}$
Абсолютний коефіцієнт розсіювання	$м^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Адвективний час	$с$	$1,2008 \cdot 10^3$
Середньо об'ємна температура	$^{\circ}C$	5,0569

Як вже згадувалося в приміщенні відбувається процес вільної термогравітаційної конвекції. Визначальними параметрами цього процесу [7] є безрозмірні числа (критерії) Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr) та Релея (Ra). Критерій Прандтля характеризує теплофізичні властивості повітря в приміщенні та є однаковим при різних типах опалення. Критерій Грасгофа характеризує відношення підйімальної сили, яка виникає внаслідок різниці густин в різних точках розрахункової області (теплового розширення), до сили в'язкісного тертя. Під час вільної конвекції режим руху повітря характеризується числом Релея. Результати експерименту демонструють, що в приміщенні незалежно від типу опалення число Релея $Ra = Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$, а це означає, що режим руху повітря є турбулентним[7].

Для оцінки більш повної картини процесів, які відбуваються в приміщенні при різних типах опалення, окрім параметрів осереднених по об'єму розрахункової

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

області наведемо максимальні та мінімальні значення основних розрахункових параметрів в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Максимальні та мінімальні значення параметрів розрахункової області

Назва параметру	Розмір- ність	Радіатори	
		min	max
Статична ентропія	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	66	83,2
Інтенсивність випромінювання	$\frac{Вт}{м^3}$	5,41	287
Швидкість U (координата X)	$м/с$	-0,0107	0,0102
Швидкість V (координата Y)	$м/с$	-0,069	0,0196
Швидкість W (координата Z)	$м/с$	-0,0102	0,0110
Тиск	ат	$-5,93 \cdot 10^{-3}$	0,37
Турбулентна кінетична енергія	-	$3,75 \cdot 10^{-7}$	$9,95 \cdot 10^{-5}$
Швидкість дисипації	-	$9,4 \cdot 10^{-11}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$
Турбулентна в'язкість	$Па \cdot с$	$7,83 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$
Статична ентальпія	$\frac{Дж}{кг}$	$1,86 \cdot 10^4$	$2,37 \cdot 10^4$

Отримані значення швидкостей по трьом просторовим координатам дозволяють охарактеризувати особливості руху повітря в приміщенні. Значення швидкостей руху повітря по координатам X та Z (по ширині та довжині приміщення) змінюються в незначному діапазоні. Значення швидкостей по координаті Y (по висоті приміщення) мають значні коливання при опаленні радіаторами, а при використанні «теплої підлоги» прослідковується достатньо стабільні значення по всьому об'єму приміщення. Така різниця швидкостей обумовлена тим, що різниця температур поверхонь тепловіддачі та повітря значно

більша при опалюванні радіаторами. Тобто більша різниця температур (температурний напір) інтенсифікує процес вільної термогравітаційної конвекції, виникає більша різниця густини повітря в різних точках приміщення і нагріте повітря швидше піднімається вгору (вздовж координати Y).

3.2 Аналіз результатів розрахунків при опаленні за допомогою радіаторів

Проведемо візуалізацію розподілу температури по об'єму приміщення (стан теплової рівноваги) при прогріванні за допомогою радіаторів рис. 3.1.

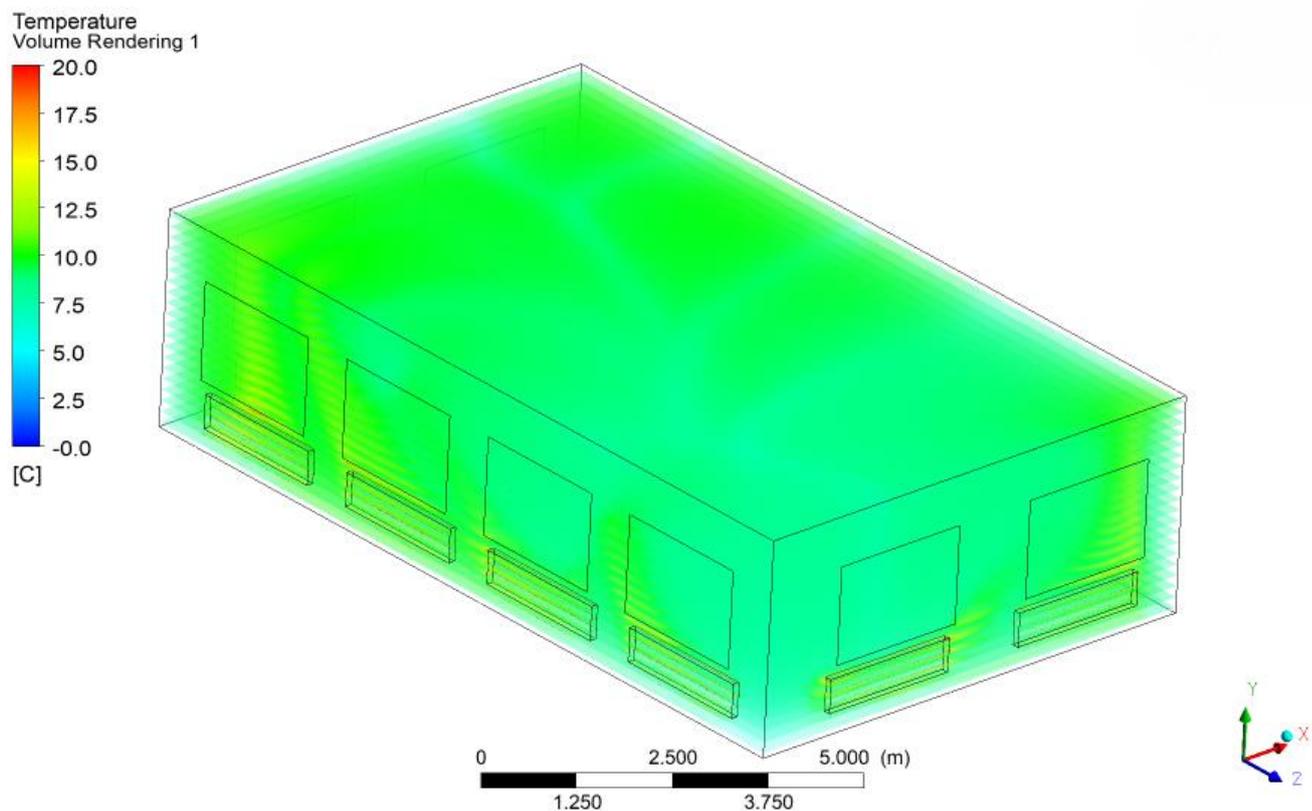


Рисунок 3.1 – Розподіл температури по об'єму приміщення (прогрівання за допомогою радіаторів)

З даного рисунку помітно два важливих фактори. По-перше температура повітря зростає по висоті приміщення. Цей фактор пов'язаний із явищем

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

термогравітаційної конвекції та впливом поверхні холодних дверей. По-друге температура повітря в приміщенні нижча зі сторони вікна особливо під стелею. Це пов'язано з тим, що нагріте поверхнею тепловіддачі радіаторів повітря піднімаючись вгору треться від одного радіатора об поверхню стіни, а від другого радіатора об більш холодну поверхню віконного скла, втрачаючи більше тепла.

Розподіл температури в об'ємі приміщення тісно пов'язаний із характером руху повітря, його швидкістю, зонами вихроутворення та застою. Тому наведемо візуалізацію швидкості руху повітря в об'ємі приміщення в стаціонарному режимі рис. 3.2. Так як різниця температур поверхні тепловіддачі радіаторів та повітря в приміщенні значна то процес термогравітаційної конвекції є інтенсивним. Це означає, що прогріте опалювальними приладами повітря швидко піднімається вгору при цьому воно треться спочатку об поверхню стіни (вікна), а потім об поверхню стелі, майже повністю втрачаючи свою швидкість, і лише потім повітря розповсюджується по об'єму приміщення. Тобто повітря в приміщенні повільно переміщується, виникають застійні зони, що є причиною тривалого процесу прогрівання за допомогою радіаторів.

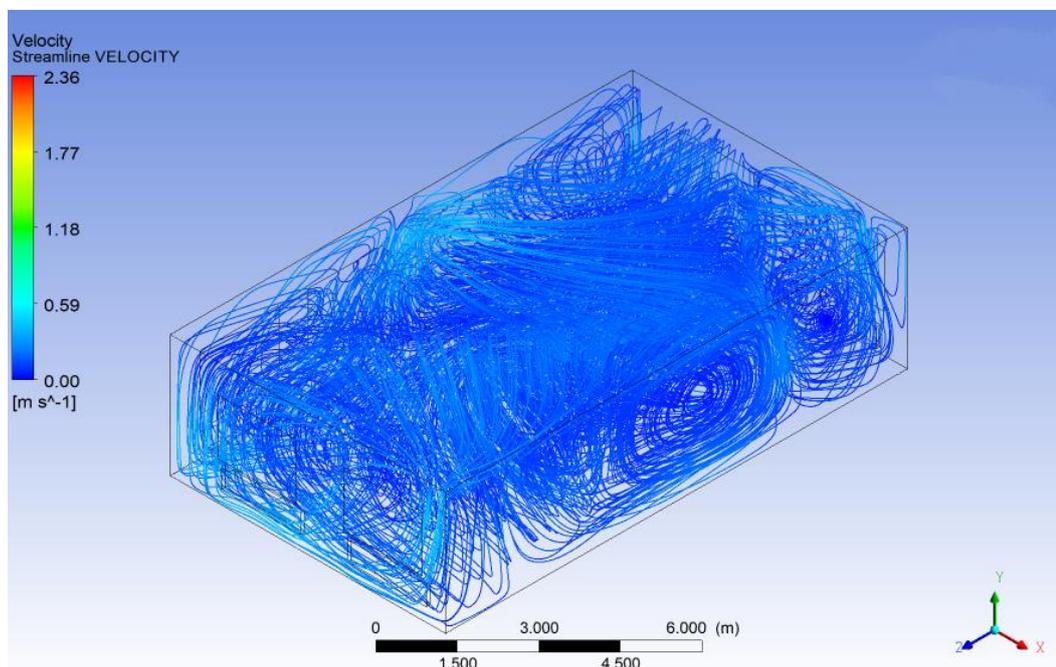


Рисунок 3.2 – Швидкість руху повітря в об'ємі приміщення (опалення радіаторами)

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Розглянемо характер процесу прогрівання приміщення у часі при опаленні радіаторами рис. 3.3.

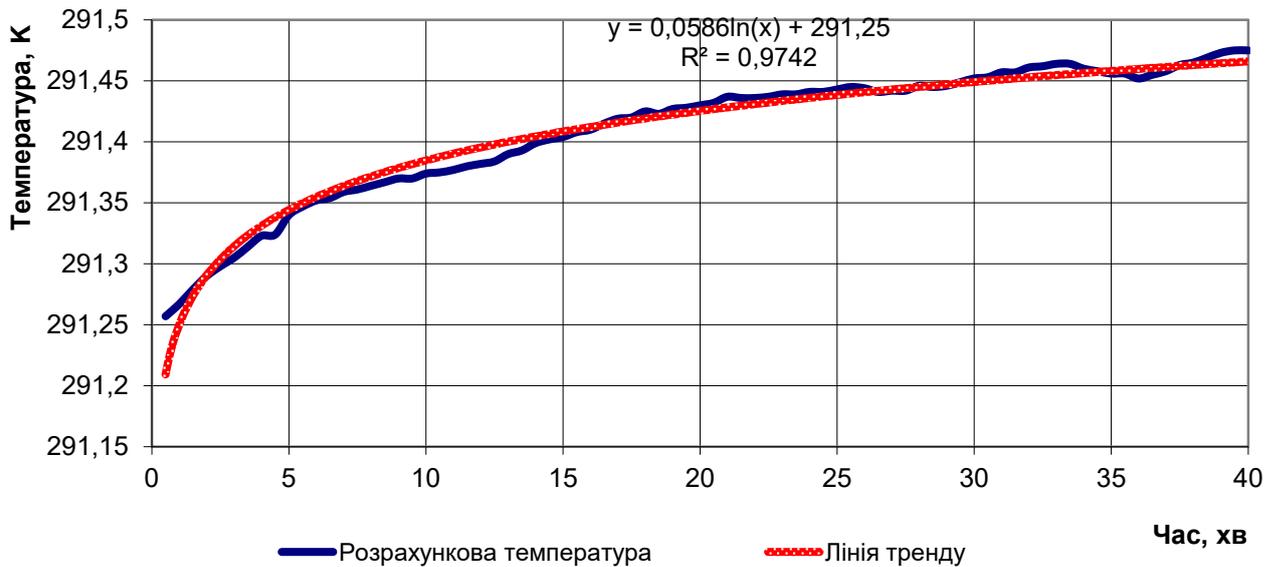


Рисунок 3.3 – Прогрівання приміщення у часі

В результаті експерименту спостерігається, що процес прогрівання приміщення в часі є наближеним до логарифмічного і в загальному випадку описується залежністю:

$$T^V = C \cdot \ln(\tau) + T_{II}^V,$$

де T^V - осереднена по об'єму температура повітря в приміщенні в момент часу прогрівання τ , К;

C - константа;

τ - час прогрівання приміщення, с;

T_{II}^V - осереднена по об'єму температура в приміщенні до початку його прогрівання, К.

В нашому випадку даний процес описується наступною залежністю:

$$T^V = 0,0586 \cdot \ln(\tau) + 291,25.$$

При чому значення показника достовірності апроксимації складає $R^2 = 97,42\%$.

Проведемо візуалізацію розподілу температури по висоті приміщення. Для того, щоб розглянути даний розподіл була створена умовна поверхня по довжині приміщення. Візуалізація розподілу температури по висоті приміщення при прогріванні радіаторами (стан теплової рівноваги) наведена на рис. 3.4.

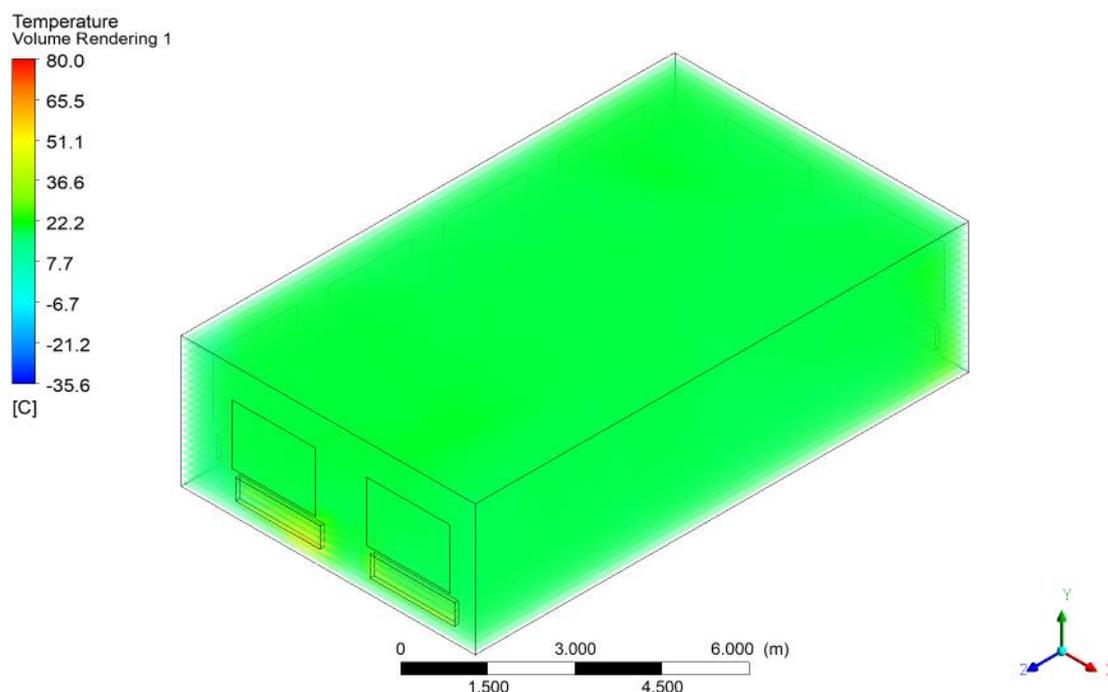


Рисунок 3.4 – Розподіл температури по висоті приміщення

Візуалізація розподілу температури по висоті приміщення підтверджує те, що розподіл є нерівномірним. По висоті приміщення можна виділити декілька температурних зон, які в процесі прогрівання дещо змінюють свої розміри. Поблизу опалювальних приладів виникають незначні теплі зони (тепловий прошарок в декілька сантиметрів), обумовлений передачею тепла теплопровідністю. Поблизу вікна виникає холодний прошарок, який обумовлює незначне відхилення в сторону прогрітого повітря, що піднімається від опалювального приладу, і також це зменшує теплий прошарок під стелею у порівнянні з другим опалювальним приладом. Наявність холодної зони вздовж підлоги пояснюється рухом повітря вздовж підлоги рис. 3.5.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

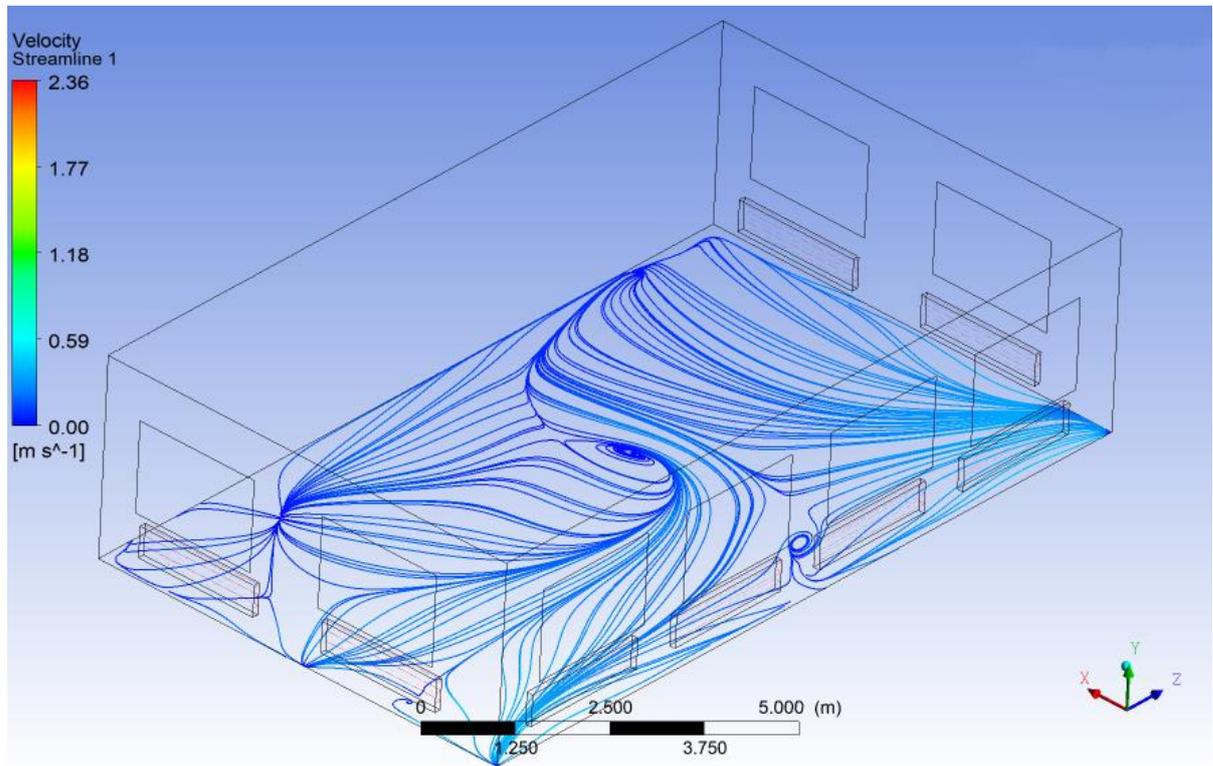


Рисунок 3.5 – Рух повітря вздовж підлоги

З рис. 3.5 помітно, що в приміщенні виникають вихрові зони утворені конвективним теплообміном повітря в приміщенні. Це явище пов'язано із розташуванням опалювальних приладів. Тобто розміщення опалювальних приладів біля внутрішньої стіни супроводжується несприятливим для здоров'я людей рухом холодного повітря вздовж підлоги.

Для того щоб проаналізувати розподіл температури по висоті приміщення були створені умовні поверхні

Умовні поверхні будувалися по висоті приміщення з кроком в $\Delta h_1 = 0,1\text{м}$, а для більш коректного описання розподілу температури поблизу стінок підлоги і стелі з кроком в $\Delta h_2 = 0,01\text{м}$. Значення температури по висоті приміщення осереднювалося за площею умовної поверхні. Графічно проілюструємо розподіл температури по висоті приміщення у часі при опаленні радіаторами на рис. 3.6-3.10.

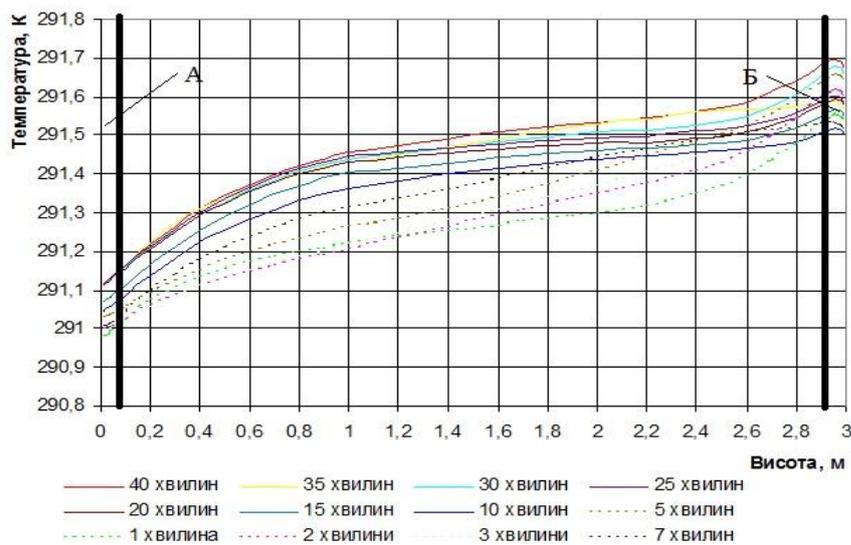


Рисунок 3.6 – Розподіл температури по висоті приміщення

Аналіз рис. 3.6 показує, що температура зростає по висоті приміщення і це обумовлено явищем термогравітаційної конвекції (більш тепле повітря піднімається вгору). При наближенні до пристіночної зони підлоги (А) температура повітря швидко знижується, відповідно при віддаленні від підлоги по висоті прослідковується спочатку швидке зростання температури до висоти одного метра, далі з висотою зростання температури стає більш пологим, а при наближенні до стелі зростання температури стає більш швидким і наближається до свого максимуму на відстані 4-5 сантиметрів від стелі. При наближенні до пристіночної зони стелі (Б) температура повітря починає знижуватися і це явище обумовлене впливом більш холодних стінок стелі об які треться повітря втрачаючи тепло. Так як вплив пристіночних зон стелі та підлоги незначний при розподілі температури по висоті (до 5 сантиметрів) то в подальшому аналізі нехтуються.

Для того, щоб більш коректно описати розподіл температури повітря по висоті приміщення у часі розглянемо спочатку відрізок часу прогрівання за перші 10 хвилин рис. 3.7.

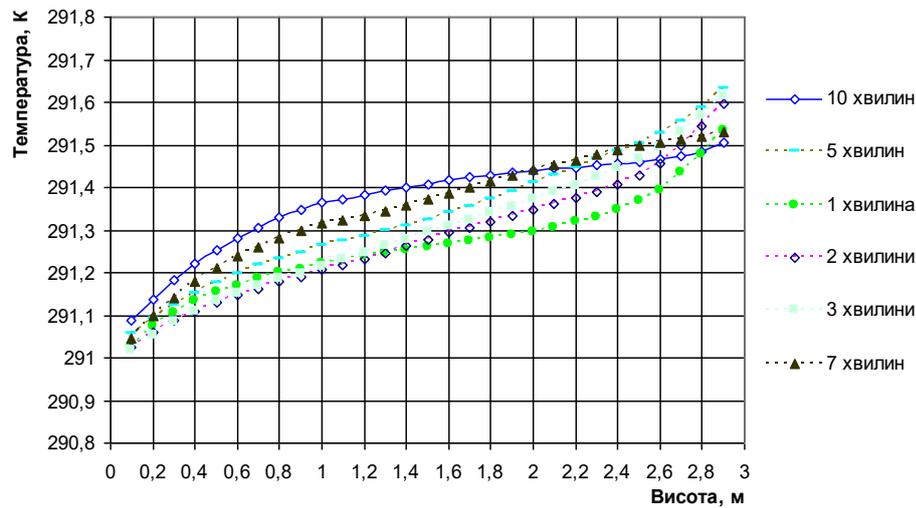


Рисунок 3.7 – Розподіл температури по висоті приміщення за перші 10 хвилин прогрівання

За перші 10 хвилин прогрівання неможливо встановити чітку залежність розподілу температури по висоті приміщення. В перші хвилини прогрівання розподіл температури близький до лінійного потім він наближається до логарифмічного, а потім до поліноміального різних порядків.

Представимо подані залежності в безрозмірному вигляді використовуючи показник безрозмірної температури по висоті приміщення, що знаходиться за формулою:

$$\theta_F^h = \frac{T^h}{T_F},$$

де T^h - осереднена по площі температура повітря на конкретній висоті h в момент часу прогрівання τ , K .

Введемо поняття безрозмірної висоти, що знаходиться за формулою:

$$\bar{h} = \frac{h}{H},$$

де H - висота від поверхні підлоги до стелі (максимальна висота в приміщенні), м.

Тоді розподіл температури по висоті у безрозмірному вигляді представимо на рис. 3.8.

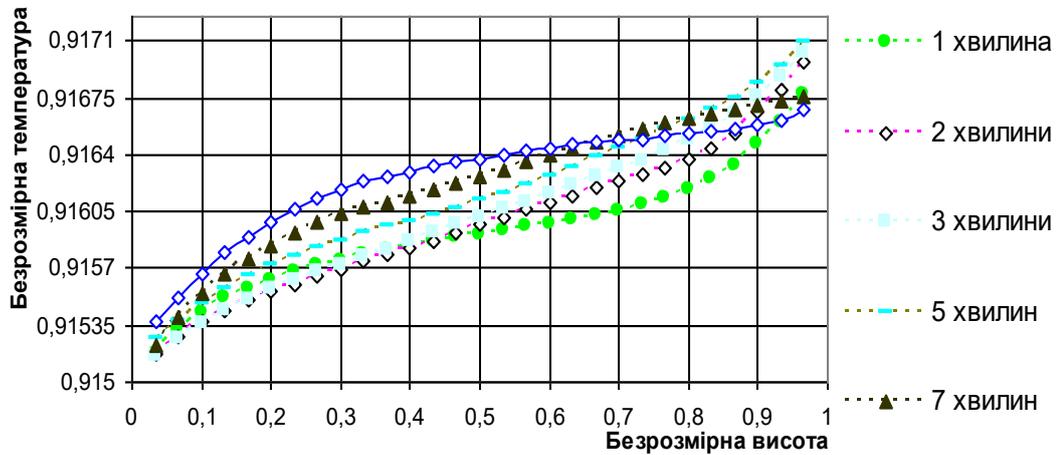


Рисунок 3.8 – Розподіл температури по висоті у безрозмірному вигляді (перші 10 хвилин прогріву)

Розглянемо характер розподілу температури по висоті приміщення у період 10-40 хвилин прогрівання рис. 3.9.

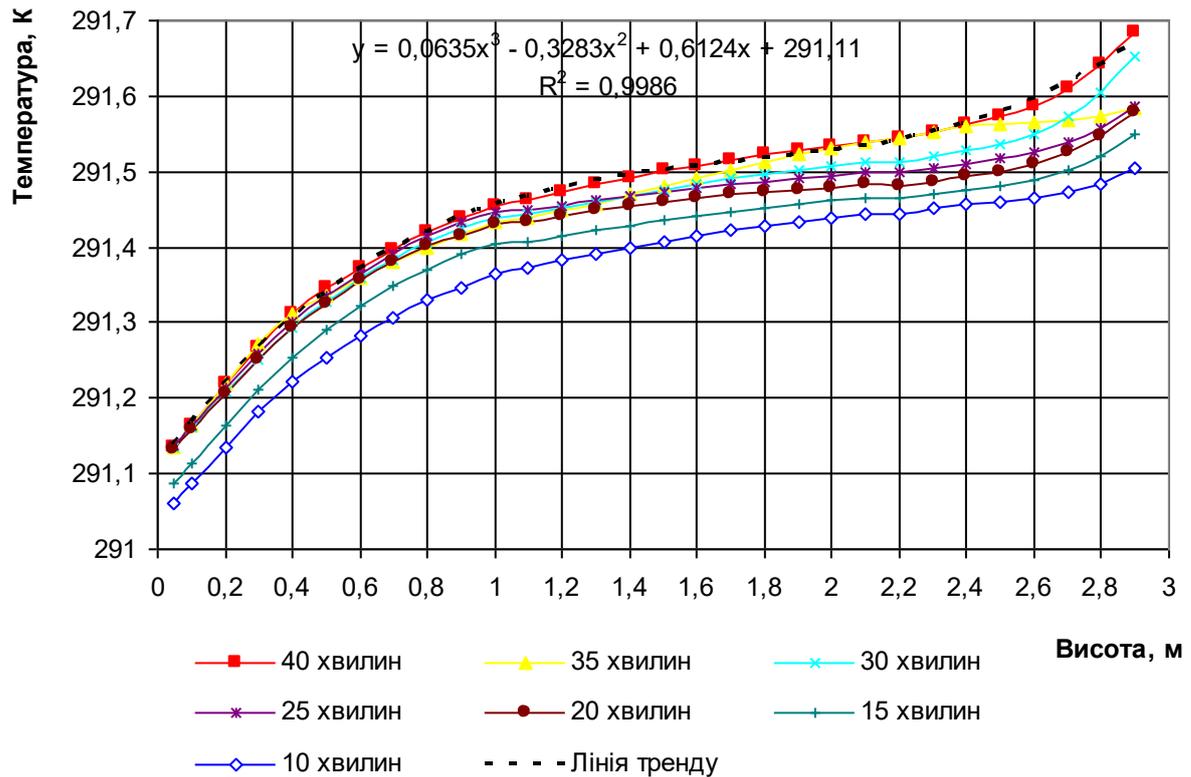


Рисунок 3.9 – Розподіл температури по висоті приміщення в період прогрівання 10-40 хвилин

Встановлено, що після 10-ої хвилини прогрівання приміщення розподіл температури по висоті набуває певної стабільної тенденції.

Результати експерименту демонструють, що розподіл температури по висоті приміщення в часі близький до поліноміального рівняння третього порядку і в загальному випадку описується залежністю:

$$T^h = C_1 \cdot h^3 - C_2 \cdot h^2 + C_3 \cdot h + T_{II}^h,$$

де C_1, C_2, C_3 - константи;

T_{II}^h - осереднена по площі мінімальна температура повітря по висоті приміщення (поблизу підлоги) до моменту прогрівання, K .

В нашому випадку даний процес описується наступною залежністю:

$$T^h = 0,0635 \cdot h^3 - 0,3283 \cdot h^2 + 0,6124 \cdot h + 291,11.$$

При чому значення показника достовірності апроксимації складає $R^2 = 99,86\%$.

Тоді розподіл температури по висоті у безрозмірному вигляді представимо на рис. 3.10.

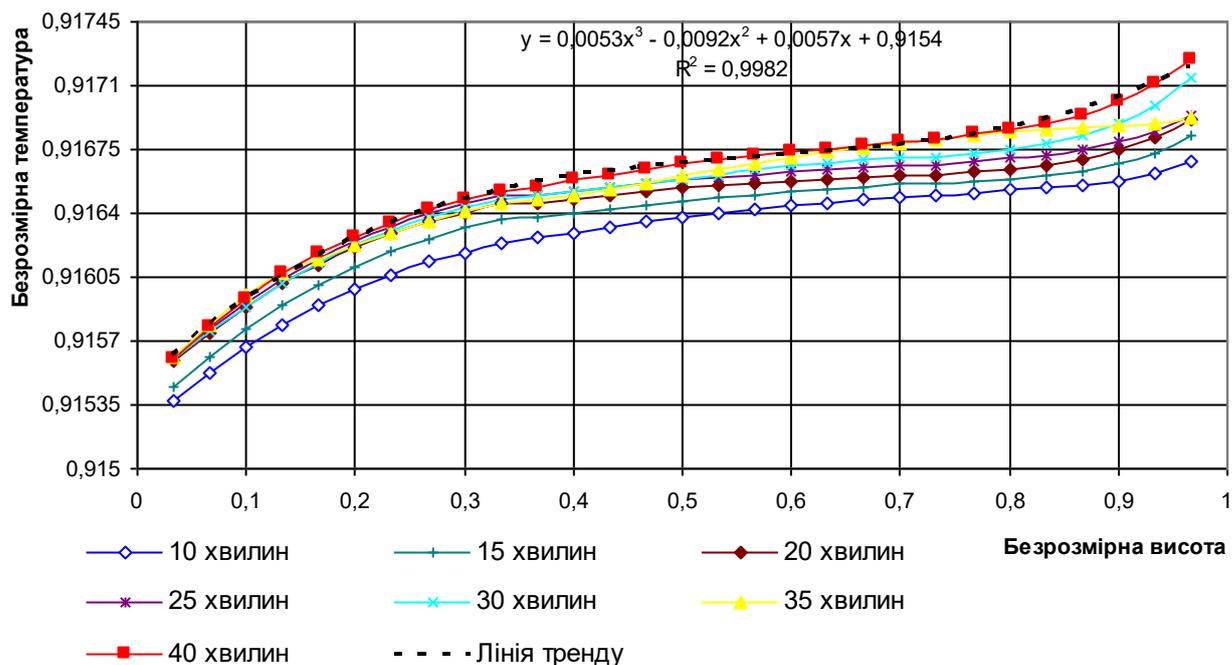


Рисунок 3.10 – Розподіл температури по висоті у безрозмірному вигляді (прогрівання 10-40 хвилин)

Тоді в безрозмірному вигляді узагальнений випадок прогрівання приміщення в часі буде описуватися наступною залежністю:

$$\theta_F^h = C_1 \cdot \bar{h}^3 - C_2 \cdot \bar{h}^2 + C_3 \cdot \bar{h} + \frac{T_{II}^h}{T_F}$$

Для даного приміщення такий процес описується залежністю:

$$\theta_F^h = 0,0053 \cdot \bar{h}^3 - 0,0092 \cdot \bar{h}^2 + 0,0057 \cdot \bar{h} + 0,9154.$$

3.3 Аналіз результатів розрахунку після заміни склопакетів на більш енергоефективні

Під час аналізу розподіли температурного поля було чітко помітно, що найбільші втрати теплової енергії відбуваються саме через склопакети, що помітно на рис. 3.11

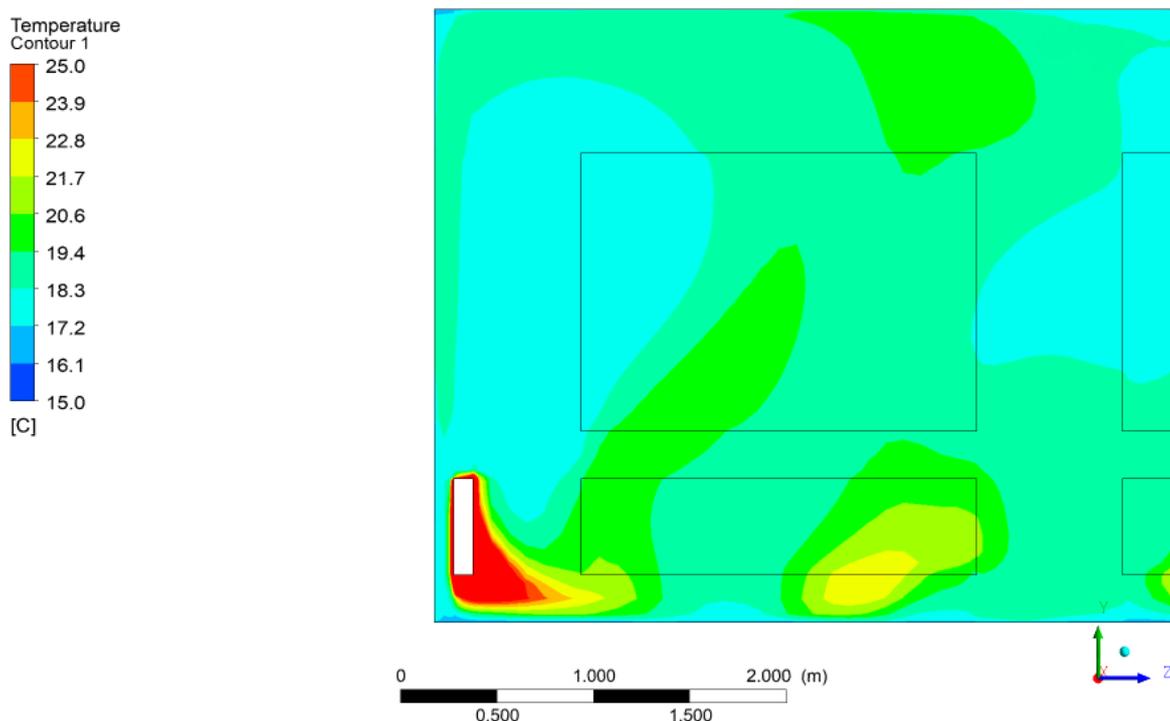


Рисунок 3.11 – Розподіл температур біля склопакета до заміни

Було вирішено провести розрахунок і візуально показати вплив заміни на швидкість руху повітря (рис. 3.13) і розподіл температур (рис 3.12). В розрахунковій моделі було задано досить жорсткий клімат і змодельовано встановлені склопакети формули 4-10-4-10-4, які відповідають коефіцієнту опору теплопередачі $0,54 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$. Замінили дані склопакети на нові з формулою 4Solar-16Ar-4-12Ar-4i, які в свою чергу відповідають коефіцієнту опору теплопередачі $1,14 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$.

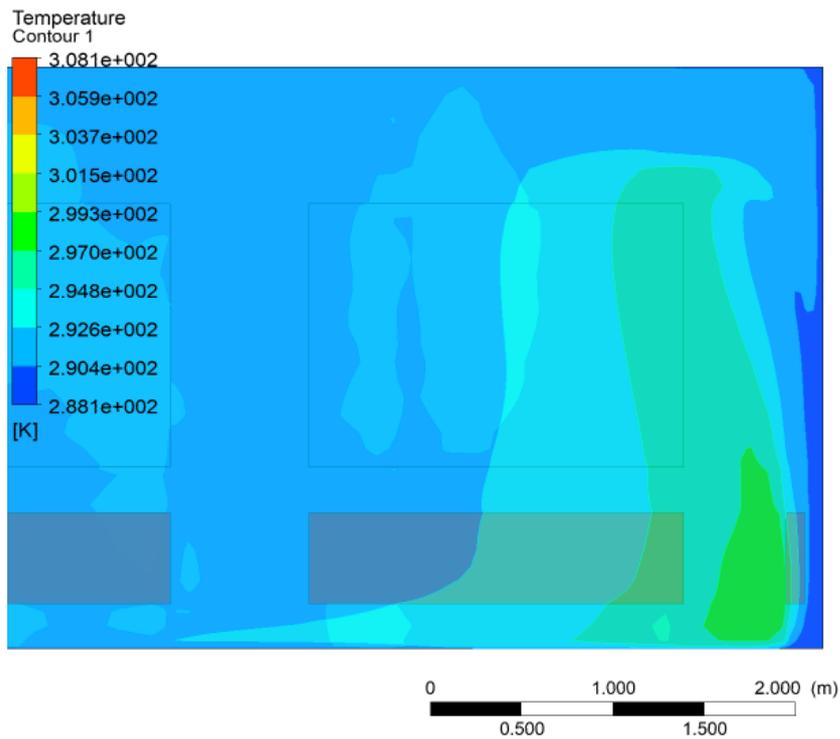


Рисунок 3.12 – Розподіл температур біля склопакета після заміни

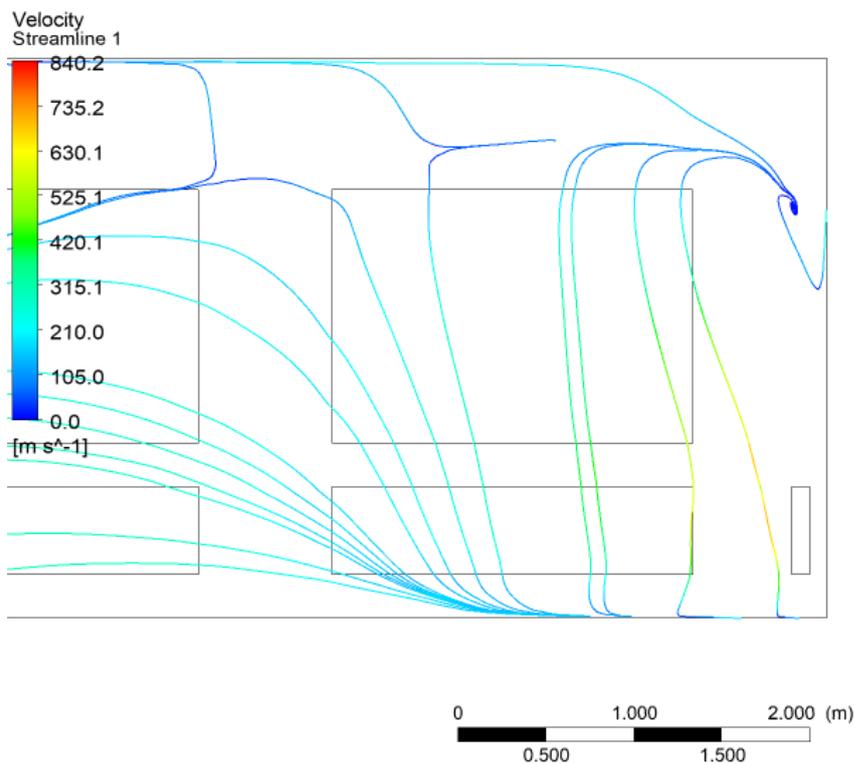


Рисунок 3.13 – Швидкість руху повітря після заміни

Оскільки зона холодних температур зменшилась, то можна вважати ефективним моделювання заміни склопакету.

4. УЛАШТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК БЛИСКАВКОЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

4.1 Основі можливі наслідки влучання блискавки в будівлі і споруди

Блискавка [10] – розряд електричної енергії між хмарами або між хмарою і землею. У більшості випадків нижня частина грозових хмар заряджається негативно, а верхня — позитивно. Так утворюється як би гігантський заряджений конденсатор, однією обкладкою якого служить грозове поле, а інша земля. У міру концентрації зарядів збільшується, напруженість електричного поля цього конденсатора при досягненні величини 300 кВ м створюється умова для виникнення блискавки. Коли напруженість електричного поля у хмарі або між нижньою зарядженою областю і землею досягає пробійного значення, виникає блискавка. Блискавки поділяються на лінійні, плескаті, кулясті і чоткові. Лінійні блискавки спостерігають часто, а кулясті та чоткові – дуже рідко.

Блискавки – велика загроза для життя людей. Ураження блискавкою [10] можливо як при перебуванні просто неба, так і в закритому приміщенні. Частіше страждають люди що знаходяться під час грози на відкритій місцевості, переходять від дощу під деревами і поблизу від працюючого електроустаткування (включеного в мережу телевізора, радіоприймача або увімкненого мобільного телефону). Високі дерева – часта мішень для блискавок. На реліктових деревах-довгожителів легко можна знайти численні шрами від блискавок. Вважається, що одиночне дерево, частіше вражається блискавкою, хоча в деяких лісових районах шрами від блискавок можна побачити майже на кожному дереві.

Безпосередня небезпечна дія [10] блискавки – це пожежі, механічні пошкодження, травми та загибель людей і тварин, а також пошкодження електричного і електронного устаткування. Наслідками удару блискавки можуть

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути вибухи і виділення небезпечних продуктів – радіоактивних і отруйних хімічних речовин, а також бактерій та вірусів. Удари блискавки можуть бути особливо небезпечні для електронних систем.

Щодо блискавкозахисту об'єкти поділяються на звичайні та спеціальні. Звичайні об'єкти: промислові підприємства, тваринницькі і птахівничі будівлі і споруди, житлові і адміністративні будівлі, універмаги, банки, страхові компанії, дошкільні установи, школи [11], лікарні, притулки для старих, музеї і археологічні пам'ятники, спортивні споруди тощо.

Спеціальні об'єкти[10]:

- об'єкти, що становлять небезпеку для безпосереднього оточення (нафтопереробні підприємства, заправні станції, підприємства з виробництвом і зберіганням вибухових речовин);
- об'єкти, що становлять небезпеку для екології (хімічні заводи, атомні електростанції, біохімічні фабрики і лабораторії);
- об'єкти з обмеженою небезпекою (пожежонебезпечні підприємства, електростанції, підстанції і лінії електропередавання, засоби зв'язку);
- інші об'єкти (будови вище 60 м, об'єкти, що будуються).

Основними характеристиками будівлі (споруди), яка піддається дії блискавки, є[10]:

- конструкція (приміром, дерево, цегла, бетон, залізобетон, сталеві каркаси);
- функція (житловий будинок, офіс, ферма, театр, готель, школа, лікарня, музей, церква, в'язниця, універмаг, банк, завод, промислова зона, спортивна арена);
- мешканці та вміст (люди й тварини, наявністьгорючих й негорючих матеріалів, вибухонебезпечних й вибухобезпечних матеріалів, електричних й електронних систем, з низькою або високою витримуваною напругою);
- приєднані лінії (живильні лінії, телекомунікаційні лінії, трубопроводи);
- наявні засоби захисту, або ті, що запроваджуються (приміром, засоби захисту для зменшення фізичних пошкоджень й небезпеки для життя, засоби захисту для зменшення відмов внутрішніх систем);
- межі поширення небезпеки (будівля (споруда) з утрудненою евакуацією).

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В таблиці 4.1 наведено приклади дії блискавки на різні типи об'єктів.

Таблиця 4.1 Дія блискавки на різні типи об'єктів [10]

Тип будівлі (споруди) відповідно до призначення та/або вмісту	Дія блискавки
1	2
Житловий будинок	Пробій електричних установок, пожежа та пошкодження матеріалів. Пошкодження, зазвичай обмежуються будівлями (спорудами), які є у точці удару, або є на шляху струму блискавки. Відмова електричного й електронного обладнання та встановлених систем (приміром, телевізори, комп'ютери, модеми, телефони тощо).
Сільськогосподарська споруда	Насамперед, ризик пожежі та небезпечної крокової напруги, а також пошкодження матеріалів. Окрім того, ризик припинення електропостачання й небезпека для життя тварин внаслідок відмови електронних систем керування вентиляцією, подачі кормів тощо.
Театр Готель Школа Універмаг Спортивна зона	Пошкодження електричних установок (приміром, електричного освітлення) може призвести до паніки. Відмова пожежної сигналізації, що призводить до запізнення вжиття заходів боротьби з пожежею [11].
Банк Страхова компанія Торговельна компанія тощо	Як зазначено вище, плюс проблеми внаслідок втрати зв'язку, відмов комп'ютерів та втрат даних.
Лікарня Будинок для людей похилого віку В'язниця	Як зазначено вище, плюс проблеми, що виникають із хворими, та утруднення порятунку людей, переміщення яких обмежено.
Промисловість	Додаткові впливи залежно від вмісту підприємств, що призводить до пошкоджень: від легких до таких, що є неприйнятними, та втрата продукції.

Продовження таблиці 4.1

1	2
Музеї й археологічні майданчики Церква	Втрата культурної спадщини, яку не відновити.
Телекомунікації Електростанції	Неприйнятні втрати можливості надання громадських послуг.
Хімічний завод Нафтопереробний завод Атомна електростанція Біохімічні лабораторії та заводи	Пожежа й невідповідне функціонування підприємства зі згубними наслідками для локального й глобального довкілля.

4.2 Необхідність та економічне обґрунтування захисту від блискавки

Належить оцінити необхідність захисту від блискавки будівлі (споруди), аби зменшити соціальні втрати. Для того, аби оцінити, потрібен чи ні захист від блискавки будівлі (споруди), належить здійснити оцінювання ризику відповідно до процедур, вміщених у ДСТУ EN 62305:2012. Належить взяти до уваги такі ризики відповідно до типів втрат [10]:

- R1 : ризик втрат людського життя або тимчасової інвалідності;
- R2: ризик втрати громадських послуг;
- R3: ризик втрати культурного надбання;
- R4: належить оцінити ризик економічних втрат у разі необхідності економічного обґрунтування захисту від блискавки.

Захист від блискавки є необхідним, якщо ризик R (від R1 до R3) є вищим за припустимий рівень RT [10]:

$$R > RT \quad (3.1)$$

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

У цьому випадку належить вжити заходів захисту для зниження ризику R (від R1 до R3) до припустимого рівня RT [10]:

$$R \leq RT \quad (3.2)$$

Якщо виникає понад один тип втрат, умова 3.2 має задовольнятися для кожного типу втрат. Величини допустимого рівня ризику RT, коли блискавка може стати причиною втрат соціального значення, встановлюються компетентним національним органом.

Окрім оцінювання необхідності захисту від блискавки будівлі (споруди), яка підлягає захисту, може бути корисним оцінити економічні вигоди від вжиття заходів захисту для зниження економічних втрат. У цьому випадку необхідно оцінити ризик R4 економічних втрат. Оцінювання ризику R4 дозволяє проаналізувати вартість економічних втрат за наявності засобів захисту та без них.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Захист від блискавки є рентабельним, якщо сума вартості C_{RL} залишкових втрат за ужиття заходів захисту та вартості C_{PM} засобів захисту є меншою за вартість CL загальних втрат без ужиття заходів захисту:

$$C_{RL} + C_{PM} < CL \quad (3.3)$$

4.3 Заходи захисту

Заходи захисту може бути застосовано [10] для зниження ризику відповідно до типу пошкодження. Можливі заходи захисту включають:

- відповідне ізолювання струмопровідних частин, доступних для дотику;
- еквіпотенціалізація за допомогою сітчастої системи уземлення;
- фізичні обмеження й попереджувальні написи;
- еквіпотенційні сполучення блискавки (ЕВ).

Заходи захисту для запобігання [10] фізичному пошкодженню. Захист забезпечується системою захисту від блискавки, яка включає у себе такі особливості:

- систему перехоплення;
- систему доземних провідників;
- систему земляного закінчення;
- еквіпотенційні сполучення блискавки (ЕВ);
- електричне ізолювання (і, отже, роздільну відстань) від зовнішньої LPS.

Заходи захисту для [10] зменшення відмов електричних та електронних систем. Можливі заходи захисту включають:

- заходи із заземлення та сполучення;
- магнітне екранування;
- прокладення ліній;
- ізолювальні інтерфейси;
- координувана система SPD.

Ці заходи можуть уживатися поодиночі або у поєднанні.

										Арк.
										62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	6.144.09 БР 00 ПЗ					

4.4 Розрахунки встановлення блискавкозахисту

Блискавковідвід [12] – пристрій, що сприймає удар блискавки і відводить її струм у землю. Блискавковідвід забезпечує захист від прямих ударів блискавки. Захисна дія блискавковідводу заснована на властивості блискавки уражати найбільш високі і добре заземлені металеві спорудження. У загальному випадку блискавковідвід складається з опори, блискавкоприймача, безпосередньо сприймаючого удар блискавки, струмовідводу, по якому струм блискавки передається в землю, заземлювача, що забезпечує розтікання струму блискавки в землі. У деяких випадках функції опори, блискавкоприймача і струмовідводу об'єднуються (використання труб або ферм).

З'єднання блискавкоприймачів [12] зі струмовідводами і струмовідводів із заземлювачем повинні виконуватися, як правило, зварюванням, а при неприпустимості вогневих робіт дозволяється виконання болтових з'єднань з перехідним опором не більше 0,05 Ом при обов'язковому щорічному контролі останнього перед початком грозового сезону.

Зона захисту блискавковідводу [12] – простір, усередині якого будинок і спорудження захищене від прямих ударів блискавки з надійністю не нижче:
зона захисту типу А – 99,5%;
зона захисту типу Б – 95%.

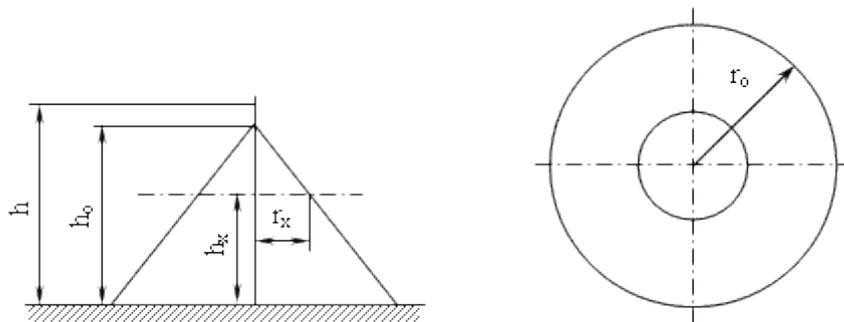


Рисунок 4.1 – Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу [12]

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

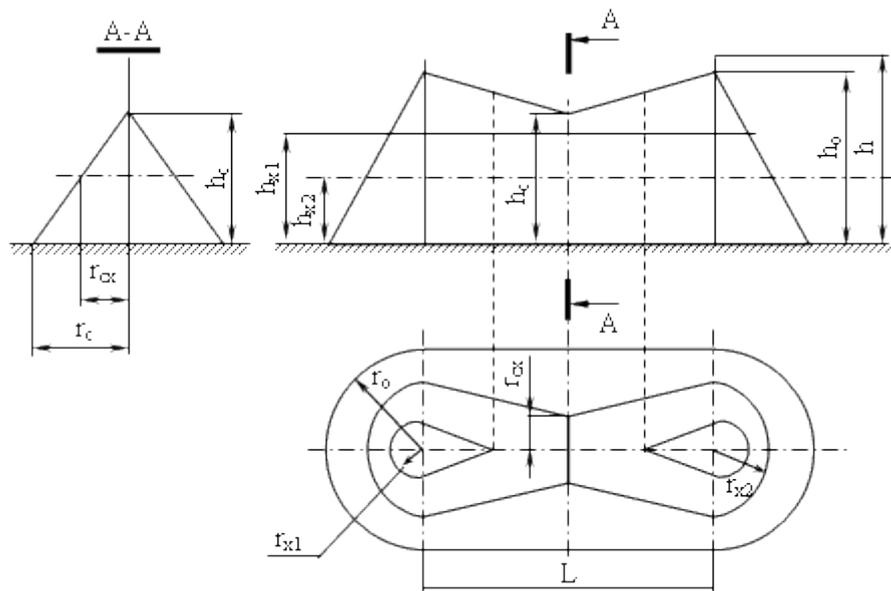


Рисунок 4.2 – Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу [12]

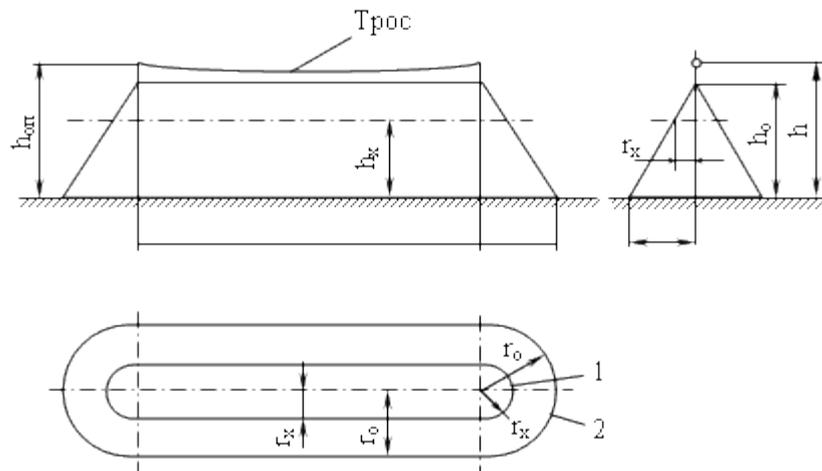


Рисунок 4.3 – Зона захисту одиночного тросового блискавковідводу [12]

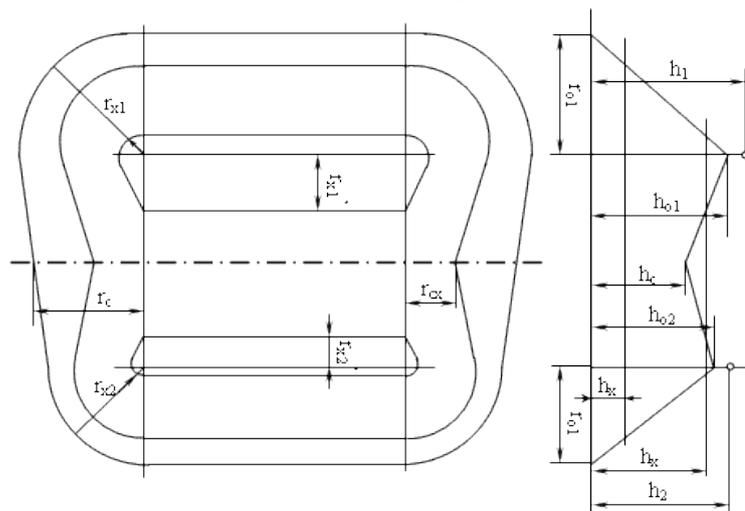


Рисунок 4.4 – Зона захисту подвійного тросового блискавковідводу [12]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Конструктивно блискавковідводи розділяються за наступними видами [12]:

- стрижневі (бувають одиночні (рис. 4.1), подвійні (рис. 4.2), багаторазові) – з вертикальним розташуванням блискавкоприймача. Стрижневі блискавкоприймачі повинні бути виготовлені зі сталі будь-якої марки перетином не менше 100 мм², довжиною не менше 200 мм і захищені від корозії лудінням, цинкуванням або фарбуванням;
- тросові (бувають одиночні (рис. 4.3) і подвійні (рис. 4.4)) – з горизонтальним розташуванням блискавкоприймача. Тросові блискавкоприймачі повинні бути виконані зі сталевих багатодротових канатів перетином не менше 35 мм²;
- сітки – багаторазові горизонтальні блискавкоприймачі, що перетинаються під прямим кутом і укладаються зверху на будинок, що захищається.

Блискавковідвід, що стоїть окремо – блискавковідвід, опора якого встановлена на землі на деякому видаленні від об'єкта, що захищається.

Одиночний блискавковідвід – одинична конструкція стрижневого або тросового блискавковідводу.

Подвійний (багаторазовий) блискавковідвід [12] – два (або більше) стрижневих або тросових блискавковідводи, що утворюють одну загальну зону захисту.

Заземлювач блискавкозахисту [12] – один або декілька провідників, що знаходяться у зіткненні з землею і призначені для відводу в землю струмів блискавки або обмеження перенапруг, що виникають на металевих корпусах, устаткуванні, комунікаціях при близьких розрядах блискавки. Заземлювачі поділяються на природні і штучні.

Природні заземлювачі [12] – заглиблені в землю металеві і залізобетонні конструкції будинків і споруджень.

Штучні заземлювачі [12] – спеціально прокладені в землі контури, що складаються з вертикальних і горизонтальних заземлювачів.

Конструкція заземлювача [12] не розраховується, а повинна відповідати вимогам, викладеним у РД. Опір струму промислової частоти не нормується, а

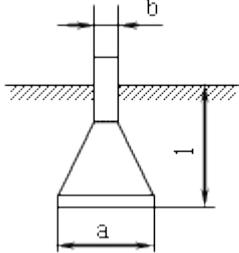
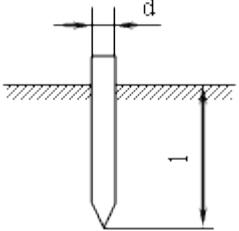
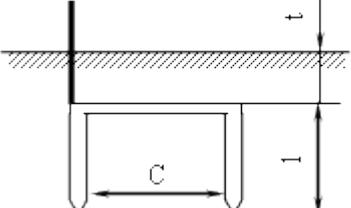
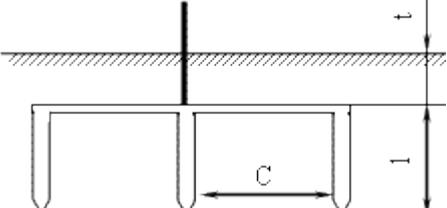
									Арк.
									65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	6.144.09 БР 00 ПЗ				

замірюється при введенні заземлювача в експлуатацію. Надалі він вимірюється для блискавкозахисту I і II категорій 1 раз у рік, III категорії – 1 раз у 3 роки перед початком грозового сезону. Замірне значення не повинно перевищувати результати вимірів при введенні в експлуатацію більш ніж у 5 разів.

Конструкції заземлювачів, що рекомендуються, приведені в таблиці 4.2.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						66
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Таблиця 4.1 — Конструкції заземлювачів, що рекомендуються [12]

Заземлювач	Ескіз	Розміри, м
Залізобетонний підножник	1. 	$a \geq 1,8$ $b \geq 0,4$ $l \geq 2,2$
Залізобетонна паля	2. 	$d = 0,25 \div 0,4$ $l \geq 5$
Сталевий двострижневий: смуга розміром 40×4 мм; стрижні діаметром $d=10 \div 20$ мм	3. 	$t \geq 0,5$ $l = 3 \div 5$ $c = 3 \div 5$
Сталевий тристрижневий: смуга розміром 40×4 мм; стрижні діаметром $d=10 \div 20$ мм	4. 	$t \geq 0,5$ $l = 3 \div 5$ $c = 5 \div 6$

Враховуючи розмаїтість технологічних [12] процесів, висувати однакові вимоги до блискавкозахисту всіх об'єктів недоцільно. Тому всі будинки і спорудження за блискавкозахистом класифіковані. В основу класифікації будинків і споруджень за ступенем небезпеки і можливістю ураження їх блискавкою

покладена імовірність виникнення вибуху або пожежі, а також масштаби можливих руйнувань.

На підставі цього всі будинки і спорудження підрозділяються на три категорії [12], що позначаються I, II, III (найбільш небезпечна I).

I категорія [12] – виробничі будинки і спорудження з зонами класу 0, 1, 20, 21 по всій території країни. Кожне ураження об'єкта I категорії викликає вибух, створює підвищену небезпеку руйнувань і жертв не тільки для даного об'єкта, але і для розташованих поруч.

До II категорії відносяться [12]:

- виробничі будинки і спорудження з зонами класів 2, 22 з середньорічною тривалістю гроз 10 годин і більше на рік;
- зовнішні установки з зонами класу 2 на всій території країни;
- будинки обчислювальних центрів, у тому числі розташованих у міській забудові в місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 годин на рік і більше.

Удар блискавки в об'єкт II категорії створює небезпеку вибуху тільки при збігу з технологічною аварією або моментом спрацювання дихальних і аварійних клапанів.

До III категорії відносяться [12]:

- будинки і спорудження з пожежонебезпечними приміщеннями або будівельними конструкціями низької вогнестійкості;
- об'єкти, ураження яких становить небезпеку електричного впливу на людей і тварин: великі суспільні будинки, тваринницькі будівлі, високі спорудження типу труб, веж, монументів;
- дрібні будівлі в сільській місцевості, де найчастіше використовуються горючі конструкції і де невелика вартість будівель дозволяє виконати блискавкозахист спрощеними способами.

До III категорії віднесені об'єкти, наслідки ураження яких не зв'язані з вибухами.

						6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
							68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

При використанні стрижневих і тросових блискавковідводів додатково визначається тип зони захисту блискавковідводу. Тип зони захисту залежить від очікуваної кількості уражень N у рік будинку.

Середньорічна тривалість гроз (у годинах) у заданому пункті на території СНД визначається за картою, приведеною на рис. 5. Підрахунок очікуваної кількості N для будинків і споруд проводиться за формулами, приведеними раніше.

Для будинків і споруд з приміщеннями, що вимагають улаштування блискавкозахисту I і II або I і III категорій, блискавкозахист виконується за I категорією. Якщо площа приміщень I категорії блискавкозахисту становить менше 30% площі всіх приміщень будинку, блискавкозахист всього будинку допускається виконувати за II категорією незалежно від категорії інших приміщень. При цьому на ввіді в приміщення I категорії повинен бути передбачений захист від заносу високого потенціалу по підземних і наземних (надземних) комунікаціях [12].

Для будинків і споруджень з приміщеннями, що вимагають улаштування блискавкозахисту II і III категорій, блискавкозахист виконується за II категорією. Якщо площа приміщень II категорії блискавкозахисту становить менше 30% площі всіх приміщень будинку, блискавкозахист всього будинку допускається виконувати за III категорією, незалежно від категорії інших приміщень. При цьому на ввіді в приміщення II категорії повинен бути передбачений захист від заносу високого потенціалу по підземних і наземних (надземних) комунікаціях.

Для будинків і споруджень, не менше 30% площі яких приходиться на приміщення, що вимагають улаштування блискавкозахисту за I, II і III категоріями, блискавкозахист виконується як описано вище. Для будинків і споруджень, більше 70% площі яких становлять приміщення, що не підлягають блискавкозахисту, а іншу частину займають приміщення, що вимагають улаштування блискавкозахисту за I, II і III категоріями, повинен бути передбачений тільки захист від заносу високих потенціалів по комунікаціях, що вводяться в приміщення [12].

Будинки і спорудження, віднесені за улаштуванням блискавкозахисту до I і II категорій, повинні бути захищені від прямих ударів блискавки, вторинних її

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проявів і заносу високого потенціалу через наземні (надземні) і підземні металеві комунікації.

Будинки і спорудження [12], віднесені за улаштуванням блискавкозахисту до III категорії, повинні бути захищені від прямих ударів блискавки і заносу високого потенціалу через наземні (надземні) металеві комунікації.

Зовнішні установки, віднесені за улаштуванням блискавкозахисту до II категорії, повинні бути захищені від прямих ударів і вторинних проявів блискавки.

Зовнішні установки, віднесені [12] за улаштуванням блискавкозахисту до III категорії, повинні бути захищені від прямих ударів блискавки.

Усередині будинків великої площі (шириною більше 100 м) необхідно виконувати заходи щодо вирівнювання потенціалу.

Для захисту від прямих ударів [12] блискавки слід максимально використовувати як природні блискавковідводи існуючих високих споруджень, так і блискавковідводи інших розташованих поруч споруджень.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В результаті виконання випускної бакалаврської роботи отримані наступні результати:

1. Розроблено розрахункову модель, що дозволяє отримати інформацію про розподіл температури, швидкості руху повітря, наявність вихроутворень та зон застою в процесі прогрівання змодельованого приміщення.

2. Проаналізовано розподіл температурних полів та полів швидкостей руху повітря, та фактичний вплив втрат теплової через неенергоєфективні склопакети на рух теплого повітря в приміщенні.

3. Отримані залежності зміни температури (осередненої по об'єму та висоті приміщення) від часу прогрівання приміщення у вигляді формул та графіків.

За допомогою розробленої моделі можна оцінювати дотримання санітарно-гігієнічних норм і забезпечення комфортних умов для нормальної життєдіяльності людей, а також підібрати найбільш енергоєфективні варіанти утеплення приміщення. Також отримані результати та подальші дослідження нестационарних процесів прогрівання приміщень можуть бути в майбутньому використані при розробці систем автоматичного регулювання систем опалення.

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Комплексна державна програма енергозбереження України [Електронний ресурс], <https://ips.ligazakon.net/document/FIN41650>
2. Пріоритетні напрямки використання біопалива і біоетанолу [Електронний ресурс], <http://eco.com.ua/content/prioritetni-napryamki-vikoristannya-biopaliva-i-bioetanolu>
3. Теплогазопостачання та вентиляція : навч. посіб. / О. Т. Возняк, О. О. Савченко, Х. В. Миронюк та ін. ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2013. – 276 с.
4. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
5. Компьютерное проектирование. ANSYS : [учебное пособие] / М. А. Денисов : Изд-во Урал, ун-та, 2014. - 77 с.
6. Константинов С.М. Теплообмін: Підручник. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка»: Інрес, 2005. – 304 с.:іл.
7. Лабай В.Й. Тепломасообмін: Підручник для ВНЗ. – Львів: Тріада Плюс, 2008. – 260 с.
8. ANSYS CFX 12.1 Solver Theory. Release 12.1 [Електронний ресурс], 2009. – 270 с – Режим доступу до ресурсу:
<http://orange.engr.ucolans.edu/Documentation12.1/121/CFX/xthry.pdf>.
9. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов/ Ф.Ф Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с., ил.
10. ДСТУ EN 62305:2012 «Блискавкозахист».
11. Ляховка А.В. Енергетичне обстеження ОЗЗСО «Мутинська загальноосвітня школа І-ІІІ ступенів» [Текст] / А. В. Ляховка, С. О. Хованський // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма ІV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 19-22 квітня 2020 р.: у 2-х ч. / Редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. — Суми : СумДУ, 2020. — Ч.2. — С. 180.
12. Блискавкозахист [Електронний ресурс], <http://edu-mns.org.ua/avtomat/lessons/26/index.html>

					6.144.09 БР 00 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		