

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦЕНТР ЗАОЧНОЇ, ДИСТАНЦІЙНОЇ ТА ВЕЧІРНЬОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ГІДРОАЕРОМЕХАНІКИ

Руденко Костянтин Володимирович

«Розрахункові дослідження теплового стану приміщення кінотеатру з
використанням програмного забезпечення Ansys»

Магістерська робота
зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»
(Енергетичний менеджмент)

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

Керівник роботи:

_____ (підпис)

Хованський Сергій Олександрович

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

К.Т.Н., ДОЦЕНТ

_____ (наукове звання та наукова ступінь)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 67 сторінок, 6 таблиць, 24 рисунки, 19 літературних джерел.

Мета роботи: проведення енергетичного обстеження системи тепlopостачання.

Відповідно до поставленої мети були поставлені та вирішені наступні задачі: проведено енергетичне обстеження системи тепlopостачання (системи повітряного опалення); проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з дійсними та нормативно допустимими значеннями; визначено доцільність та економію заміни традиційного опалення на систему повітряного опалення у залі кінотеатру.

Предметом дослідження є система тепlopостачання залу кінотеатру.

Об'єктом дослідження є використання теплоносіїв кінозалу.

Методи дослідження: числове моделювання теплового стану приміщення, створення тривимірної моделі, побудування розрахункової сітки, опис розрахункової моделі, проведення комп'ютерного розрахунку, економічна доцільність заміни традиційного опалення на систему повітряного опалення та терміни окупності даної системи.

Ключові слова: енергетичне обстеження, розрахункова модель, розрахункова сітка, розрахункова область повітря.

Тема роботи: «Розрахункові дослідження теплового стану приміщення кінотеатру з використанням програмного забезпечення Ansys».

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення

Ra – число Релея;

Pr – критерій Прандтля;

Gr – критерій Грасгофа;

b_0 – коефіцієнт регресії;

t_0 – критерій Стьюдента;

Індекси та скорочення

рис. - рисунок;

табл. – таблиця;

ТЕО — техніко-економічне обґрунтування;

ДБН — державні будівельні норми;

ДСТУ — державний стандарт України;

ПДВ — податок на додану вартість;

ГВП — гаряче водопостачання.

ПЕР — паливно-енергетичні ресурси.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОМАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ.....	7
1.2 Опалення громадських споруд.....	9
1.2.1 Водяне опалення.....	9
1.2.2 Інфрачервоне опалення.....	11
1.2.3 Повітряне опалення.....	13
РОЗДІЛ 2 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПРИМІЩЕННЯ	18
2.1 Створення тривимірної моделі.....	18
2.2 Побудова розрахункової сітки.....	19
2.3 Опис розрахункової моделі.....	24
2.4 Проведення комп'ютерного розрахунку.....	39
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ.....	43
3.1 Загальний аналіз результатів розрахунків.....	43
3.2 Факторний експеримент.....	45
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАМІНИ ТРАДИЦІЙНОГО ОПАЛЕННЯ НА СИСТЕМУ ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ.....	52
4.1 Переваги повітряної системи опалення.....	52
4.2 Терміни окупності установки при встановленні теплового насоса.....	55
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.	57
5.1 Характеристика небезпечних та шкідливих факторів, що можуть виникати під час роботи на об'єкті.....	57
5.2 Техніка безпеки при проведенні вимірювань на об'єкті.....	59
5.3 Дії співробітників кінотеатру під час оголошення сигналу «Увага всім!».....	61
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	66

ВСТУП

Людство з давніх часів використовує енергію в тій або іншій формі її прояву. Людина досить швидко людина усвідомила, що для забезпечення свого розвитку, підтримки й підвищення життєвого рівня їй необхідно все більше і більше видобувати (одержувати, виробляти) і використовувати енергію. Саме тому стільки зусиль інтелектуальних, фізичних, матеріальних і фінансових людство спрямовувало на освоєння нових і вдосконалення існуючих способів, методів, технологій та обладнання для виробництва корисної енергії. Разом із тим стає очевидним, що:

- на планеті запаси корисних копалин поступово виснажуються;
- поновлювані джерела енергії за існуючого розвитку технологій та обладнання не в змозі покрити зростаючі потреби населення;
- атомна енергетика поки що не може забезпечити достатню міру надійності своєї роботи [1].

Оскільки Україна є країною енергодефіцитною, тому основною задачею повинно бути підвищення енергоефективності використання паливно-енергетичних ресурсів. Загальний потенціал енергоощадності в Україні становить близько 40% від обсягу спожитих паливно-енергетичних ресурсів. Розумне й ефективне енерговикористання є ключовим чинником створення нових робочих місць та економічного зростання [1].

Головним чинником ефективності енергозбереження в будівлях є рівень збереження теплової енергії, тому що кількість матеріальних і фінансових ресурсів, які витрачаються на теплову енергію, набагато більші, ніж витрати на системи освітлення, електропостачання та водопостачання. Збереження теплової енергії є центральною задачею енергозбереження будівель. Вирішення якої впливає на організацію роботи інших пов'язаних з цим енергетичних систем. Тому доцільність ефективного використання тепла все більше набирає актуальності [3].

Об'єкт, мета та задачі дослідження

Мета роботи – підвищення ефективності використання теплової енергії приміщень з повітряною системою опалення на основі аналізу їх теплових режимів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: розробити математичну та числову модель теплового стану приміщення, яке обігрівається повітряною системою опалення; провести моделювання процесів аеродинаміки та тепломасообміну в приміщенні для аналізу його теплового стану; на основі розробленої моделі оцінити тепловий стан приміщення; дослідити вплив нестационарних процесів у внутрішньому об'ємі приміщення на його загальний тепловий стан.

Об'єктом дослідження є термодинамічні параметри теплового стану приміщення з повітряною системою обігріву.

1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОМАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

Громадське приміщення - це будівлі, громадські споруди, призначені для розміщення адміністративних, громадських, навчальних, культурних, лікувально-профілактичних, спортивних і побутових установ. У громадських будівлях й спорудах розміщуються установи і підприємства соціального, побутового й культурного призначення [2].

До громадських відносяться будівлі наступних установ:

- охорони здоров'я, фізичної культури й соціального забезпечення (госпіталі, лікарні, поліклініки, санаторії, будинки відпочинку, спортивні будівлі й споруди, інтернати т.д.);
- освіти (дитячі садки і ясла, загальноосвітні школи, профтехучилища, технікуми, вищі навчальні заклади т.д.);
- культури (бібліотеки, музеї, ботанічні сади, Будинки культури, клуби т.д.);
- мистецтва (театри, кінотеатри, цирки, концертні зали, філармонії т.д.);
- науки й наукового обслуговування (академії і філії, науково-дослідні інститути, конструкторські бюро, проектні, проектно-дослідницькі, проектно-технологічні організації т.д.);
- будівництва (проектні, проектно-дослідницькі контори, майстерні, бюро, проектні, архітектурно-планувальні, проектно-конструкторські, проектно-експериментальні т.д.);
- фінансування, кредитування і державного страхування (банки фінансування й кредитування, ощадні банки);
- управління (виконкоми; суди, органи охорони громадського порядку т.д.);
- партійних і громадських організацій (профспілкові організації);
- комунального господарства (готелі, гуртожитки для приїжджих, мотелі, кемпінги, пожежні депо, управління, трести та інші організації комунального господарства) [3].

До цієї групи відносяться також підприємства:

- побутового обслуговування населення (лазні, душові, перукарні, пральні, фотографії, кінолабораторії, приймальні пункти, ательє різного призначення тощо);
- торгівлі й громадського харчування (торговельні центри, магазини, універмаги, криті ринки, ресторани, їдальні, фабрики кухні, кафе, чайні, тощо);
- зв'язку (поштамти, телефонні станції тощо);
- транспорту (залізничні й річкові вокзали, авіавокзали, автодорожні вокзали тощо) [3].

До комунальних будівель відносяться готелі, туристичні бази, мотелі, кемпінги, пансіонати тощо. Ці будівлі, як правило, мають коридорну систему планування. За функціональним призначенням вони близькі до житлових будівель, так як призначені для короткочасного проживання людей.

За кількістю поверхів громадські будівлі підрозділяються на:

- а) малоповерхові - один - два поверхи;
- б) середньої поверховості - 3-5 поверхів без ліфтів;
- в) багатоповерхові - 6-9 поверхів з ліфтами;
- г) висотні - більше 9 поверхів з ліфтами.

Згідно ДБН В.2.2-9-2009 «Громадські будинки та споруди»[2]:

– Розміщення громадських будинків та споруд на земельних ділянках повинно відповідати містобудівним, екологічним, протипожежним, санітарним нормам і здійснюватись згідно з вимогами ДБН 360, ДБН Б.2.4-1, ДБН В.2.3-4, ДБН В.2.3-5, ДСП 173, ДСанПіН 239, СанПіН 2605, СН 1304, СН 3077, СН 1757.

– Площа земельних ділянок для розміщення громадських будинків та споруд приймається відповідно до вимог ДБН 360 та ДБН Б.2.4-1.

– При компактному розміщенні громадських будинків у комплексах і центрах обслуговування, а також розміщення їх в блокованих, кооперованих та багатофункціональних будинках або в умовах реконструкції допускається скорочення нормованої площі ділянки на 25% (для дошкільних навчальних закладів та навчальних закладів – на 20%) без порушення нормативних вимог щодо

допустимих показників озеленення та площі основних елементів функціонального призначення.

– Ділянка для розміщення громадського будинку або комплексу будинків та споруд повинна відповідати вимогам забезпечення їх оптимальної орієнтації і нормативної інсоляції приміщень будинків і їх території (згідно з СанПиН 2605), влаштування зручних підходів, під'їздів і авто стоянок, організації благоустрою з належним рівнем озеленення.

– Для більшості громадських споруд встановлено нормативи робочої площі (не менше 3,5 м² на співробітника), вентиляції та освітлення (до 200 лк на робочому місці).

1.2 Опалення громадських споруд

1.2.1 Водяне опалення

В нашій країні найбільш поширені для громадських будівель водяні системи опалення, які мають значні гігієнічні та технічні переваги в порівнянні з іншими системами. При водяному опаленні відзначається відносно невисока (у порівнянні з паровим опаленням) температура поверхні нагрівання приладів і труб, рівномірна температура приміщень, значний термін служби обладнання, економія теплоти, безшумність дії, простота обслуговування і ремонту. Вода в таких системах послідовно проходить через подаючі магістральні трубопроводи, що подають стояки, опалювальні нагрівальні прилади, а потім, охолонувши, повертається в зворотних стояках і зворотних магістралях до місця нагрівання [4].

Системи водяного опалення бувають з природною циркуляцією, в яких рух води відбувається за рахунок різниці густин охолодженої і гарячої води, і з штучною насосною циркуляцією [4].

Такі системи можуть бути влаштовані з двотрубними (рис 1.1) або однокотрубними (1.2) опалювальними стояками. Двотрубні стояки мають дві труби: одній трубі до нагрівальних приладів підводиться гаряча вода, а з іншого відводиться охолоджена. В однокотрубному стояку вода послідовно надходить у нагрівальні прилади кожного поверху [4].

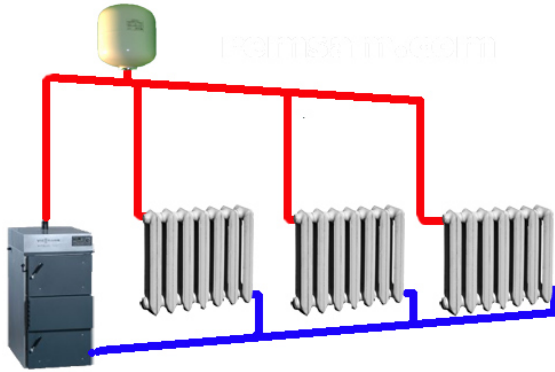


Рис. 1.1 Двотрубна система опалення

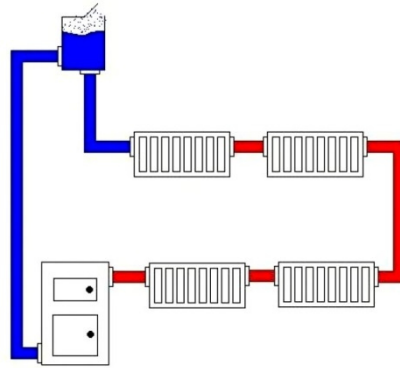


Рис. 1.2 Однокотрубна система опалення

Більш широко поширені системи централізованого водяного опалення з штучною насосною циркуляцією. (рис. 1.3)

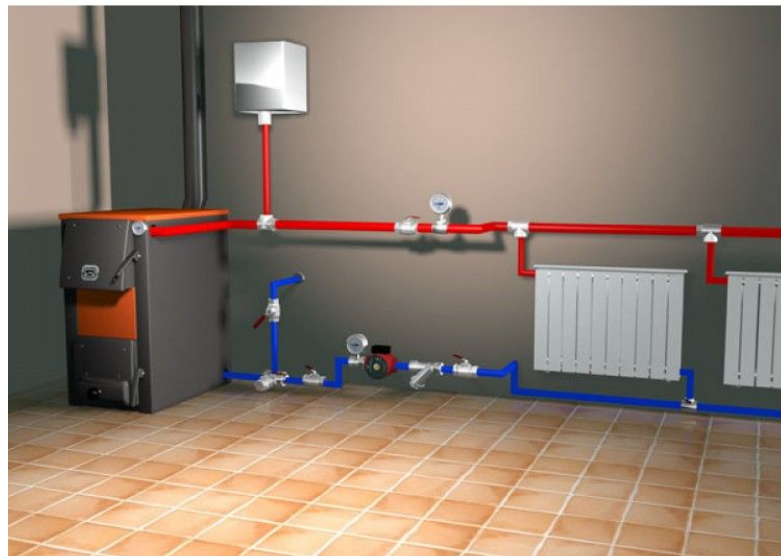


Рис. 1.3 Система опалення з штучною циркуляцією

1.2.2 Інфрачервоне опалення

У традиційних системах парового опалення в якості джерела тепла використовується радіатор. Він нагріває повітря, яке підіймається вгору й за міру охолодження опускається вниз. Одночасно в повітря піднімається пил. Тепле повітря, циркулюючи по приміщенню, нагріває предмети, які там знаходяться. Максимальна температура в приміщенні зазначається у стелі та верхньої частини кімнати, при цьому, поблизу підлоги досить прохолодно. Принципово новий підхід до опалення приміщень [4].

Нагрівальні стельові елементи встановлюються між покривним матеріалом стелі і теплоізоляцією і є абсолютно непомітні. Інфрачервоне теплове випромінювання, яке виходить від стелі нагріває підлогу, стіни, інші поверхні і предмети в приміщенні. Теплі поверхні більш рівномірно розподіляють тепло в просторі. При цьому немає надмірного нагріву повітря, відбувається вирівнювання температури між підлогою та стелею, що дозволяє забезпечити до 40% енергозбереження. Таким чином, досягаються значні переваги: більш висока економічність, безпека, користь [4].

Стельові нагрівачі (рис 1.4) – повністю приховані від очей і непомітне джерело тепла, яке дає приємне відчуття, що нагадує тепло каміна, не спалює кисень, не пересушує повітря, підтримуючи його природну вологість. Ще однією перевагою інфрачервоної системи опалення – це те, що до будівлі не треба прилаштовувати окремого приміщення для котельні, не потрібно обладнати котельню в цокольному поверсі або в підвалі. Відпадає необхідність у трудомісткому і дорогому монтажі системи парового опалення. Відповідно в будинку немає громіздких радіаторів уздовж стін, вони не займають потрібного для меблів простору і не псують інтер'єр [4].



Рис. 1.4 Інфрачервоний стельовий нагрівач

Експлуатаційні витрати можна скоротити, встановивши температуру в приміщенні на 1-30С° нижче, ніж у будинку, де для опалення використовуються звичайні радіатори. Це можливо завдяки тому, що теплове випромінювання не поглинається повітрям і вся енергія від приладу без втрат йде на користь. Зниження температури на 10С° дає 5% енергозбереження. Тепловий режим можна регулювати або терморегуляторами в кожному приміщенні, або централізованою системою терморегуляції за заздалегідь встановленою програмою [4].

Великий асортимент нагрівачів дозволяє гнучко і точно підібрати потужність випромінювання і тип приладу з урахуванням особливостей і конфігурації кожного приміщення [4].

Місце експлуатації:

- Офіси і громадські приміщення. В офісах приємніше працювати, коли не «висить» паперовий пил, що піднімається нагрітим батареями повітрям. Системи управління роблять можливим індивідуальний вибір температури для кожного приміщення офісу.

- Школи і дитячі сади. Для приміщень, призначених для дітей, надзвичайно важливо вибрати зручну та безпечну систему опалення. Інфрачервоні нагрівачі створюють ефект «теплої підлоги», не викликають руху повітря і пов'язаних з цим незручностей: протягів, охолодження людей в приміщенні [4].

Будинок, який опалюється стельової грючою фольгою (рис.1.5) безпечний, оскільки немає радіаторів з їх гострими краями і гарячою поверхнею. Фіранки

можуть досягати поверхні підлоги, а зелені насадження чудово відчують себе в рівномірному теплі і не пересушеному повітрі [4].



Рис.1.5 Гріюча фольга (інфрачервона)

1.2.3 Повітряне опалення

Дане інженерне рішення може являти собою як кондиціонер (спліт-систему - внутрішній і зовнішній блоки), яка працює в режимі опалення, так і цілий комплекс, що складається з джерела тепла (тепловий насос, котел), мережі повітроводів і повітророзподільних пристроїв. Повітряне опалення застосовується як в побутовому сегменті: квартири, котеджі, так і в промисловості (заводи, фабрики, склади тощо). Оскільки повітря є добре контрольованим теплоносієм, системи з використанням зазначеного виду опалення дуже зручні в експлуатації [4].

Система повітряного опалення (рис.1.6) – це ще один вид опалювальної системи нарівні з водяною. Теплоносієм даної системи є повітря, воно переносить енергетичний потенціал з одного середовища в інше.

Повітряне опалення – це комбінація джерела тепла в мережі повітроводів і повітророзподільних пристроїв. Джерелом тепла є газовий генератор або тепловий насос з внутрішнім блоком (гідравлічним модулем), в якому йде обмін енергії між зовнішнім і внутрішнім блоком [4].

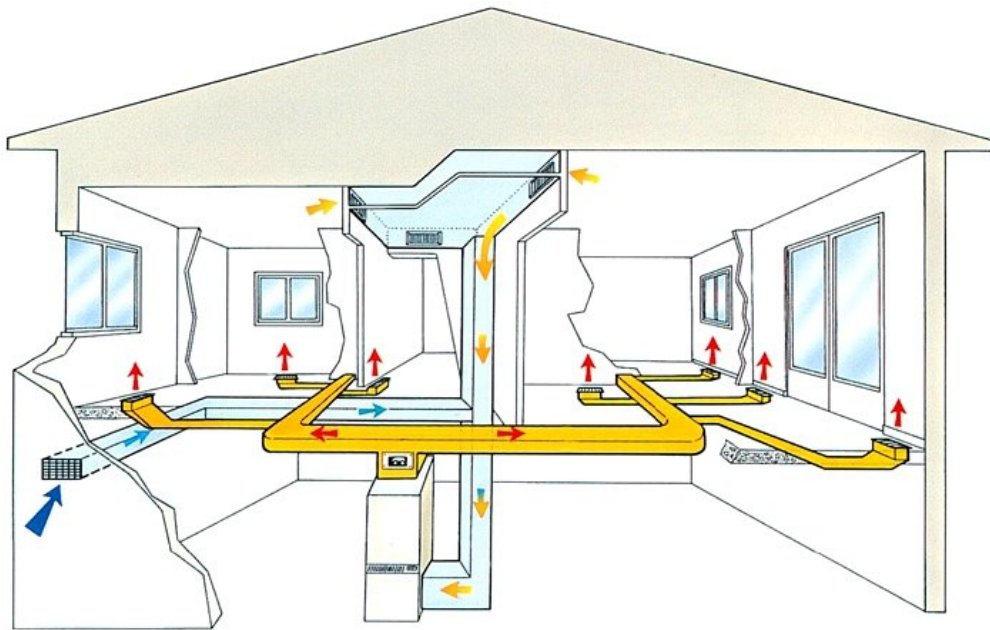


Рис.1.6 Система повітряного опалення

Джерело тепла генерує певну кількість теплоти, необхідної для обігріву того чи іншого приміщення, відповідно, це тепло переноситься повітрям по магістралі повітроводів та поширюється через повітророзподільні пристрої безпосередньо в об'єм приміщення. Так збагачує енергією обслуговуване приміщення [4].

Переваги системи повітряного опалення:

- Оскільки повітря є найбільш контрольованим теплоносієм дуже зручно регулювати температуру в приміщенні.
- Не потрібно встановлювати опалювальні прилади біля вікон, тобто, виключаємо наявність батарей, радіаторів і т. д.
- При відсутності опалювальних приладів приміщення виглядає просторішим з естетичної точки зору, при цьому з'являється можливість реалізації різних дизайнерських рішень.
- Працює взимку на опалення, а влітку на охолодження як система кондиціонування. Так подача теплого і холодного повітря здійснюється за допомогою однієї системи повітроводів, що економить простір [4].

Недоліки повітряного опалення:

– Основний недолік – це певні витрати на використання енергоресурсу у вигляді газу, якщо джерелом тепла є газовий генератор. Через постійне спалювання газу збільшуються витрати на експлуатацію системи.

– Найкомфортнішим видом опалення є перенесення тепла з нижньої зони у верхню (вгорі прохолодніше, а внизу тепліше). Але система повітряного опалення діє навпаки – якщо повітророзподільні пристрої встановлені з стелі або зі стіни, то виходить, що верхня зона приміщення в теплі, а нижня – в холоді. У такому разі комфортні параметри мікроклімату не дотримуються. Вихід – подавати тепле повітря від підлоги, при правильному проектуванні і реалізації системи можна досягти потрібних параметрів.

– Для обігріву потрібно велика кількість повітря, відповідно, широкі повітроводи (великого перерізу), які потрібно приховувати в стелевому просторі, за рахунок чого значно збільшується опуск стелі у приміщенні. При цьому можуть виникнути труднощі з архітектурою та дизайном.

– Погана інерція. Система повітряного опалення є однією з найбільш неінерційних – це говорить про те, що під час роботи цієї системи людина відчуває певне тепло, але при вимиканні системи приміщення дуже швидко охолоджується. Це великий недолік повітряного опалення порівняно з водяним, при якому радіатор навіть після відключення системи ще деякий час може віддавати тепло.[4]

Електричні системи повітряного опалення

Найпростіша і неперевершена по дешевизні система електричного повітряного опалення - звичайний тепловентилятор (рис.1.7). Витрачаючи потужність близько 2 кВт, він швидко нагріває повітря, проганяючи його через розжарену спіраль. На жаль, крім низької енергоефективності, така схема погіршує склад повітря в приміщенні, спалюючи кисень. Різноманітні теплові гармати (рис.1.8) та електричні конвектори з обдувом низькотемпературного теплообмінника уже більш цікаві. Вони, будучи поєднаними з системами рекуперації тепла, вже можуть створити в будинку цілком

комфортний клімат. Витрати енергії будуть дещо меншими, ніж у разі застосування електричного котла [4].



Рис.1.7 Тепловентилятор



Рис. 1.8 Теплова гармата

Однак системи прямого обігріву все одно обходяться занадто дорого. На щастя, вже багато років існують повітряні теплові насоси для опалення, найпростішим з яких є звичайний віконний кондиціонер. Вони витрачають тепло не на нагрівання повітря, а на перекачування тепла з більш холодної вулиці. Як варіант - насоси можуть забирати тепло у води або ґрунту [4]. Розглянемо принципові схеми роботи повітряних теплових насосів. Точніше, джерела тепла в них:

- Ґрунт-повітря. У ґрунту нижче рівня промерзання температура постійна круглий рік і зростає із збільшенням глибини. Досить занурити в ґрунт кілька глибинних зондів або горизонтальний колектор - і можна цілий рік отримувати тепло для обігріву повітря в будинку. Геотермальні насоси найбільш універсальні. Їх основна проблема - це дорожнеча як самого пристрою, так і його монтажу. Вода-повітря. Якщо у вас високий рівень проточних ґрунтових вод - завдання різко спрощується. Досить, спрощено кажучи, вирити неглибокий колодязь і занурити в нього зонд-теплообмінник. Та ж схема може бути використана, якщо поруч є незамерзаюча природна водойма. Обмеження: вода є не скрізь [4].

Повітря-повітря

Існує дві основні категорії пристроїв:

- 1. Мультиспліт системи застосовуються для підтримки клімату в невеликих будинках. Обмеження пов'язане з тим, що довжина магістралі не може

бути нескінченно великою: компресор повинен прокачувати через трубки фреон, а стінки труби надають йому помітний опір.

- 2. Канальні кондиціонери - це типова, канонічна система повітряного опалення. Від одного внутрішнього блоку теплового насоса повітря каналами-повітроводами розводиться по всіх приміщеннях.

Загальна проблема пристроїв - залежність ступеня їх ефективності від температури на вулиці [4].

2.1 Створення тривимірної моделі

Для проведення чисельного експерименту моделі теплового стану приміщення була створена тривимірна модель приміщення за допомогою програмного продукту SolidWorks (рис. 2.1).

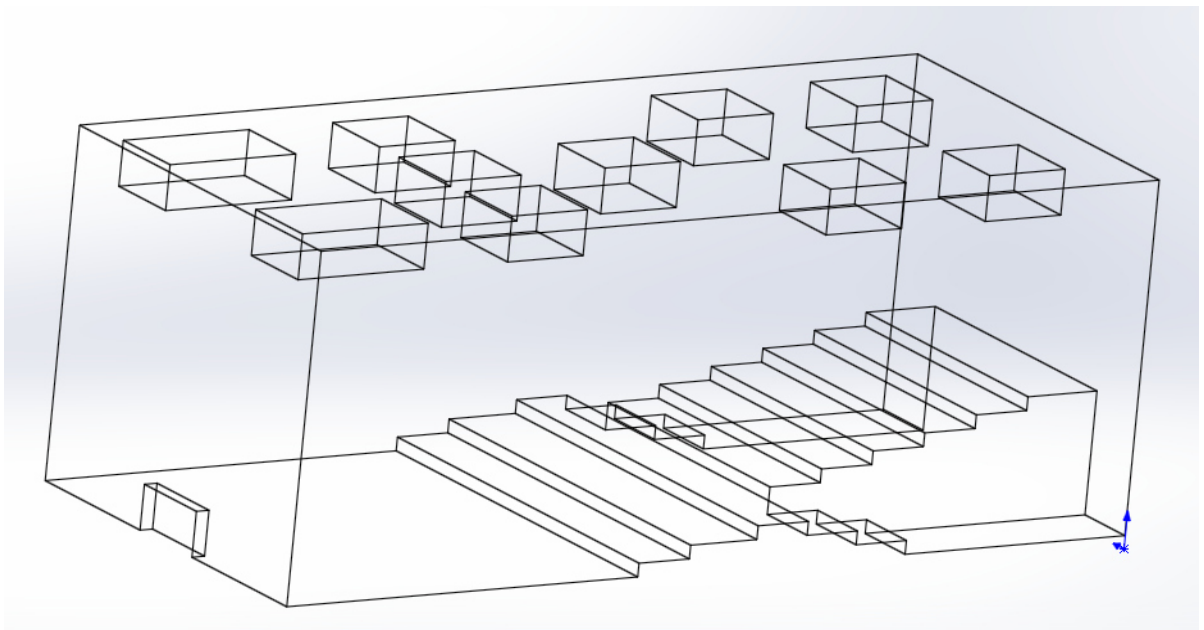


Рисунок 2.1 – Тривимірна модель приміщення

Розміри моделі приміщення наближені до реальних умов $20\text{м} \times 10\text{м} \times 10\text{м}$. При проектуванні опалювального приладу для зменшення розміру розрахункової сітки було створено гексаедр ($1\text{м} \times 1\text{м} \times 1\text{м}$), а не весь прилад.(рис. 2.2.)

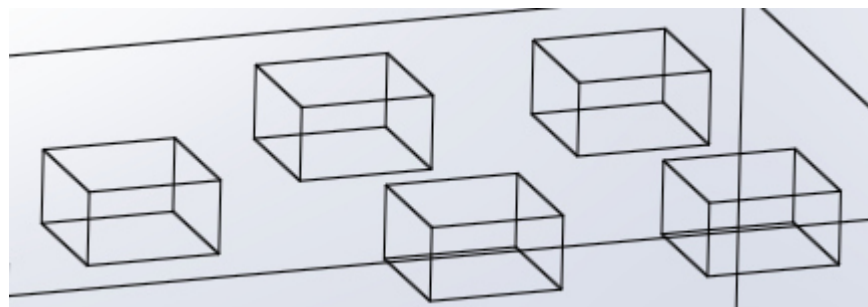


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд спроектованих опалювальних приладів

Розрахунковою областю в даній розрахунковій задачі є об'єм приміщення, який складається з області повітря та сходинок.

2.2 Побудова розрахункової сітки

Для виконання чисельного дослідження побудована розрахункова сітка. Побудова розрахункової сітки – це процес ділення розрахункової області на велику кількість окремих комірок. Розрахункова сітка – це основа всього розрахунку. Якщо сітка не якісна, то розрахунок може мати велику похибку або не запуститися взагалі [5].

Комірками сітки є багатогранники, зазвичай тетраедри, гексаедри, призми або піраміди (рис. 2.3). Кромки цих осередків (комірок) є лініями розрахункової сітки, а точки, розташовані на кромках, або в центрі осередків (комірок), – вузли розрахункової сітки. В результаті чисельного розв'язання рівнянь математичної моделі саме у вузлах розрахункової сітки і визначаються шукані параметри течії [5].

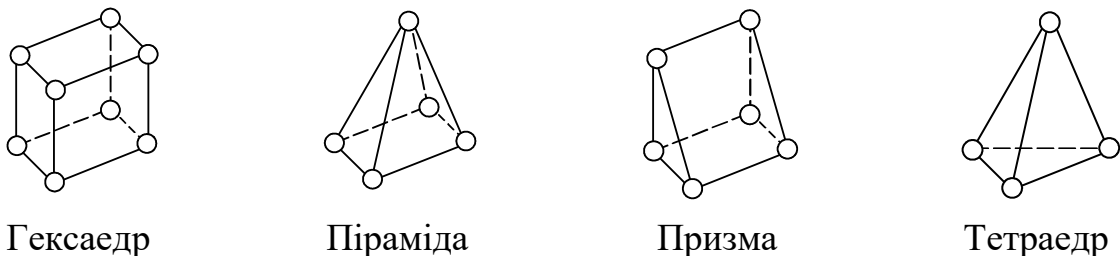


Рисунок 2.3 – Типові форми осередків (комірок) сітки

Основна вимога до розрахункової сітки – вона повинна бути досить густою, щоб визначити фізичні ефекти, які мають місце усередині розрахункової області. Для досягнення рівномірної точності розрахунку вузли сітки повинні якомога більш густіше розташовуватися у місцях значної зміни параметрів течії, зокрема у стінок. Крім того, при побудові сітки необхідно уникати отримання надмірно витягнутих або перекошених осередків (комірок), форма яких занадто сильно

відрізняється від правильних багатогранників. Якість розрахункової сітки впливає на точність отриманих результатів, збіжність результату, об'єм необхідних ресурсів, які будуть затрачені комп'ютером (об'єм оперативної пам'яті) та час необхідний для вирішення задачі [5].

Для побудови розрахункової сітки використовується генератор сіток ICEM CFD 14.5, у який були імпортовані раніше створені геометрії тривимірної моделі з SolidWorks.

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 тощо). Для більш точного врахування цих змін подрібнюємо елементи розрахункової сітки поблизу граничних поверхонь (рис. 2.4).

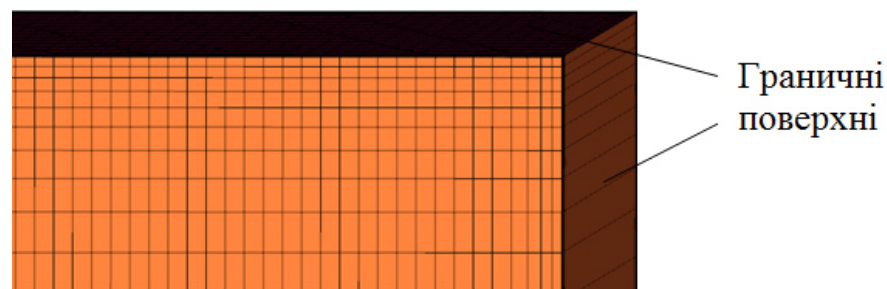


Рисунок 2.4 Структура подрібнення розрахункової сітки повітря поблизу граничних поверхонь

Для більш коректного описання пристіночної течії поблизу твердих стінок (місць контакту повітря з твердою поверхнею або верхні з поверхнею) проводилося згущення комірок, при чому 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. Згущення комірок збільшує об'єм сітки, але це необхідний захід [5].

Дана розрахункова сітка є блочно-структурованою гексаедрною. Побудована сітка є структурованою (упорядкованою), тобто складається виключно з шестигранних (об'ємних) елементів – гексаєдрів та має регулярну структуру з

явними рядами елементів. Вибір такого типу сітки пояснюється тим, що дана геометрична модель розрахункової області представляє собою сукупність достатньо 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 [5].

Після побудови розрахункової сітки проводять перевірку на якість. Спочатку проводилася візуальна перевірка якості побудованої розрахункової сітки на наявність візуальних помилок в прообразі розрахункової сітки (наявність занадто вузьких витягнутих комірок, вироджених та скошених комірок). Якщо помилки були не виявлені це ще не означає, що побудована сітка якісна. Для більш детальної перевірки використовувався пакет опцій ICEM CFD 14.5. Однією з найбільш ефективних є діаграма якості за допомогою якої можливо виявити неявні помилки в прообразі сітки (в більшості випадків так звані від'ємні об'єми), а також знайти елементи, які мають погану якість (в більшості випадків це гексаедричні елементи з занадто гострими чи тупими кутами) [5].

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).

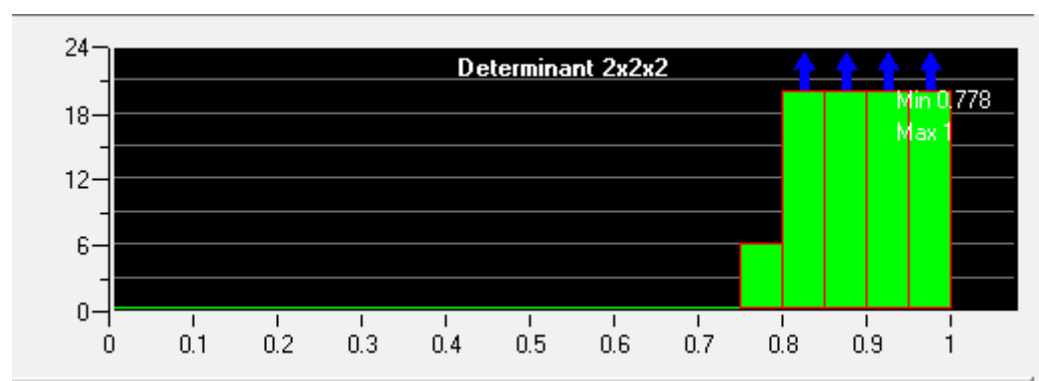


Рисунок 2.5 – Діаграма якості (детермінант) області повітря

Значення детермінанту 1 свідчить про те, що всі елементи сітки співрозмірні, а 0 буде вказувати, що елемент вироджується в одному або більше краях, а негативні значення – перевернуті елементи. Відношення довжини сторін стінок гексаедра повинно бути не меншим за 0,3 [5]. У нашому випадку мінімальне значення такого відношення складає 0,778. Дана діаграма показує, що якість сітки є задовільною.

Перевіряємо кут між гранями комірок (рис. 2.6).

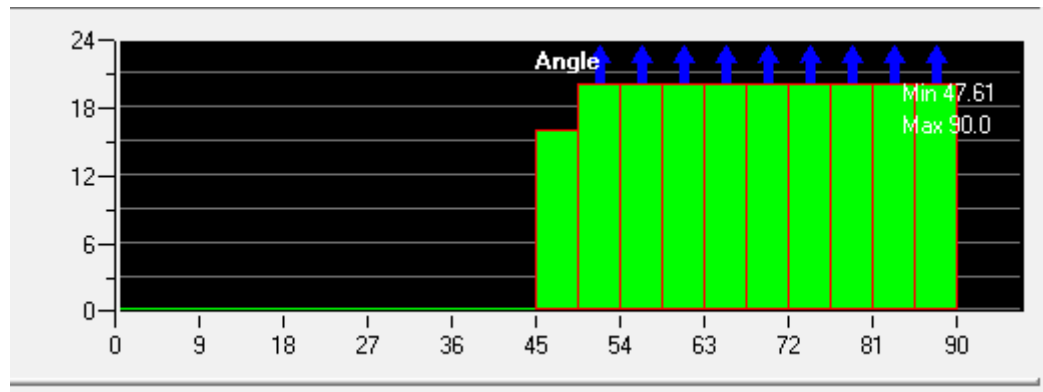


Рисунок 2.6 – Діаграма якості (кут між гранями комірок) область повітря

Для отримання задовільної якості розрахункової сітки параметр angle (кут між гранями комірок) повинен бути не меншим за 9° [5]. Аналіз даної діаграми показує, що найменший кут між гранями комірок складає 47° . Можна стверджувати, що скошені комірки відсутні.

Витягнутість контрольних об'ємів гексаєдрів визначається за допомогою критерію якості aspect ratio (коефіцієнт пропорційності) на рис. 2.7.

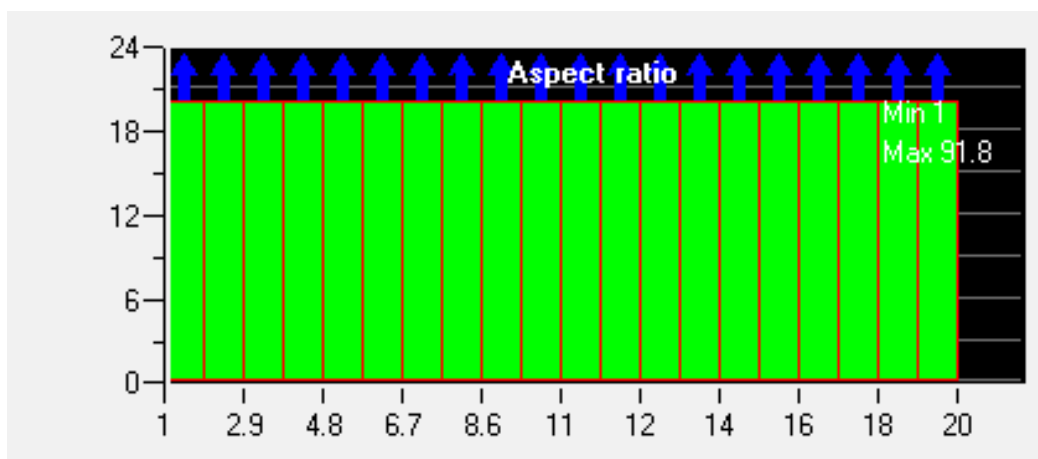


Рисунок 2.7 – Діаграма якості (коефіцієнт пропорційності) області повітря
(до стор. 22)

Коефіцієнт пропорційності – це максимальне значення відношення площ граней комірок (відношення довжини елемента до його товщини), показує як витягнутий контрольний об'єм, згідно рекомендацій [5] його значення має бути не більшим за 100. Дана діаграма задовольняє умови якості.

Вигляд розрахункової сітки в продукті ICEM CFD 14.5 представлений на рис. 2.8

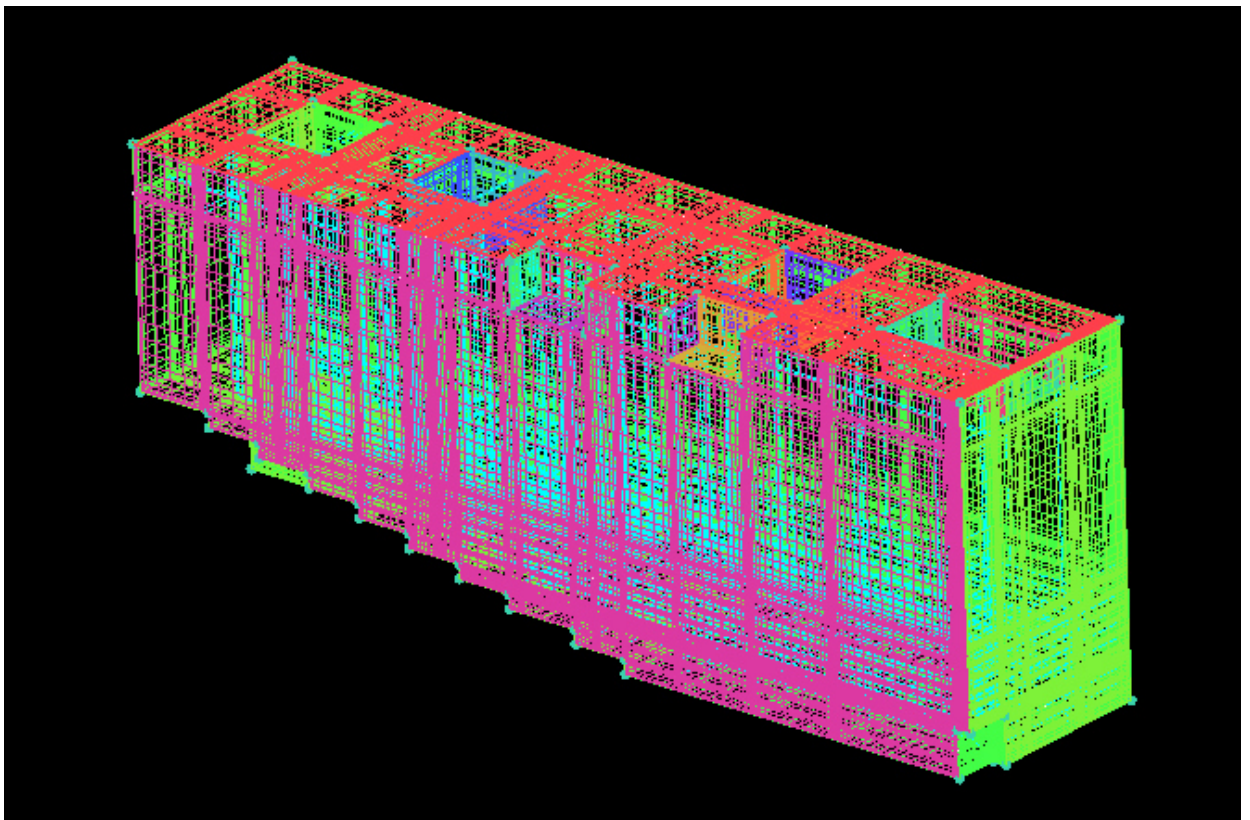


Рисунок 2.8 – Вигляд розрахункової сітки області повітря

Основні параметри отриманої розрахункової сітки області повітря:

– кількість елементів N_{el}^{nov} – 833535 шт;

– кількість вузлів N_g^{nov} – 795927 шт.

Розрахункова модель приміщення має 833535 елементів, тому у ході комп'ютерного розрахунку буде задіяно приблизно 8Гб оперативної пам'яті.

2.3 Опис розрахункової моделі

Для задавання параметрів розрахункової області розрахункова сітка була імпортована в модуль Препроцесор CFX-Pre (рис. 2.23).

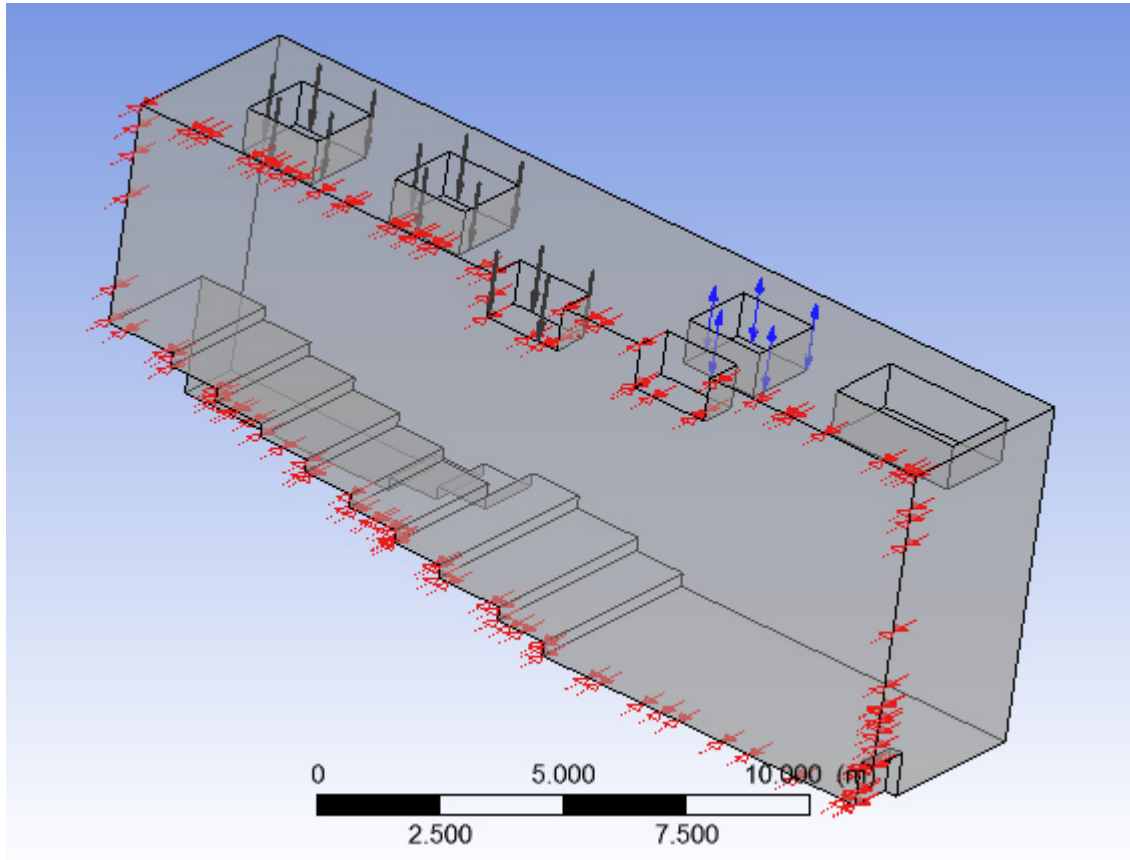


Рисунок 2.9 – Розрахункова область в Препроцесорі

В Препроцесорі задаються умови однозначності (крайові умови) та вибираються математичні моделі, які необхідні для чисельного вирішення задачі (створюється розрахункова модель). За допомогою Препроцесора створювалася розрахункова модель складного теплообміну (радіаційно-конвективного) в розрахунковій області, тобто описані процеси конвективного теплообміну, що супроводжуються тепловим випромінюванням. Конвективний теплообмін – процес перенесення теплоти як конвекцією так і теплопровідністю. Конвекція – це процес перенесення теплоти при переміщенні мікрочастинок тіла в просторі із зони з однією температурою в зону з іншою 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) до повітря (складна тепловіддача). При цьому теплота переноситься конвекцією завдяки контактів 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);
- 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	<i>атм</i>	1
Коефіцієнт теплового розширення	$К^{-1}$	0,00366
Динамічна в'язкість	<i>Па·с</i>	$1,725 \cdot 10^{-5}$
Коефіцієнт теплопровідності	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	$2,428 \cdot 10^{-2}$
Коефіцієнт поглинання	$м^{-1}$	0,01
Коефіцієнт розсіювання	$м^{-1}$	0

Часові умови для розрахунку нестационарного процесу наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Часові умови

Параметри	Розмірність	Чисельне значення
Початковий час	хв	0
Крок розрахунку	хв	0,17
Загальний час розрахунку	хв	180

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 :

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

де x, y, z – координати поверхні тіла (рис. 2.23).

Оскільки розглядався невеликий проміжок часу, 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:

$$T_c = \text{const.}$$

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

Таблиця 2.3 – Граничні умови

Тверда стінка	Температура поверхні, К (°С)
Стеля	288 (15)
Стіни	288 (15)
Сходи	288 (15)

Усі тверді стінки були прийняті шорсткими, середнє арифметичне відхилення профілю (R_a) складало 50 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 [6]:

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

де $v = \frac{1}{\rho}$ – питомий об'єм повітря, м³/кг; ρ – густина повітря, кг/м³.

Для повітря коефіцієнт об'ємного розширення можна наближено отримати, користуючись рівнянням Клапейрона [6]:

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

Запишемо значення коефіцієнта об'ємного розширення через різницю питомих об'ємів та густини [6]:

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

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 $G = \rho \cdot g$ [6]:

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

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. 2.9), тому для врахування моделі гравітації по координатній осі Y було задано значення прискорення вільного падіння g :

$$Y = -g = -9,81 \text{ м/с}^2$$

Задавалися наступні значення швидкості руху повітря в приміщенні на початку прогрівання:

$$U_X = 0 \text{ м/с};$$

$$U_Y = 0 \text{ м/с};$$

$$U_Z = 0 \text{ м/с}.$$

Швидкість по всім трьом координатам рівна нулю, отже в даній задачі розглядалося переміщення повітря залежно від різниці температур на поверхнях твердих стінок (опалювальні прилади, стіни, стеля, підлога і тд.).

Для вирішення задачі використовувалась модель теплообміну в постановці, що включає сукупність транспортних рівнянь: нерозривності, імпульсу, повної енергії (збереження енергії). Зазначені рівняння в подальшому використовуються для вирішення теплового енергетичного рівняння. Рівняння нерозривності, імпульсу, збереження енергії в стаціонарній структурі (операторному вигляді) мають вигляд:

– рівняння нерозривності [7]:

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

де U – вектор швидкості $U_{X,Y,Z}$, м/с.

– рівняння імпульсу [7]:

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

де τ – молекулярний тензор напруження (напруження зсуву), $\frac{\kappa \varepsilon}{M \cdot C^2}$.

В даному рівнянні тензор τ пов'язаний зі швидкістю відносної деформації [7]:

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

де δ – матриця ідентичності (функція Кронекера Дельта).

– рівняння повної енергії [7]:

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

В цьому рівнянні h_{tot} – повна ентальпія, що пов'язана зі статичною ентальпією $h(T,p)$ [7]:

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

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 [7]:

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

Механічне енергетичне рівняння отримано як скалярний добуток U з рівнянням імпульсу [7]:

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

Якщо відняти дане рівняння від рівняння повної енергії то отримаємо теплове енергетичне рівняння [7]:

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

Параметр $\frac{\tau}{\nabla} \cdot U$ завжди є додатнім і названий в'язкими втратами. З подальшими допущення, що описані вище, отримуємо спрощене теплове енергетичне рівняння [7]:

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

Дане рівняння також може бути отримане з попереднього рівняння якщо h фактично інтерпретується як внутрішня енергія [7]:

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

Тоді рівняння теплової енергії запишеться в даному вигляді (еквівалентне рівняння теплової енергії) [7]:

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

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.

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 доповнюється моделлю вихрової дифузії [7]. Дана розрахункова модель розроблена на основі гіпотези Бусінеска [8]. 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 [8]:

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

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

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

Турбулентна теплопровідність визначається з врахуванням турбулентного теплового потоку як [8]:

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

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 [5]:

– турбулентне число Прандтля:

$$Pr_t = \frac{\nu_t}{a_t} = \frac{\mu_t c_p}{\lambda_t};$$

– турбулентне число Шмідта:

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t}.$$

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 на основі гіпотези Бусінеска. В даній моделі задавалися наступні значення турбулентних критеріїв:

$$Pr_t = 0,9;$$

$$Sc_t = 0,9.$$

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.

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

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

За даною гіпотезою потоки скаляра Рейнольдса лінійно зв'язані зі скалярним градієнтом [7]:

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

де φ – загальна скалярна змінна;

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

Наведені вище рівняння можуть описати турбулентні коливання за допомогою функцій скупих змінних і тільки якщо відома турбулентна в'язкість. k - ϵ модель турбулентності з двома рівняннями використовує показник турбулентної в'язкості μ_t . Тоді згідно наведеної гіпотези рівняння імпульсу запишеться як [7]:

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

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

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

Модифікований тиск визначається як [7]:

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

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 [7]:

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

Аналогічно наведемо транспортне рівняння для додаткових змінних [7]:

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

де Γ_Φ – динамічна дифузійна здатність додаткової змінної, $\frac{кг}{м \cdot с}$;

Φ – додаткова змінна, $кг/м^3$.

Слід зазначити те, що хоч і трансформація параметрів молекулярної дифузії може являтися неточною, але турбулентні параметри є правильними згідно моделі вихрової дифузії. 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 [7]:

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

Осереднений компонент швидкості визначається як [7]:

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

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

Відповідно до цього запишемо енергетичне рівняння Нав'є-Стокса, що осереднене за числом Рейнольдса [7]:

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

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 [7]:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\Gamma - \rho \bar{u}_j \bar{\phi})] + S_\phi.$$

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.

В розглядуваній задачі для вирішення рівнянь Нав'є-Стокса осереднених за числом Рейнольдса використовується k - ε 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 [7]:

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

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 [7]:

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

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

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 [7]:

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

В розглядуваній задачі враховувалося перенесення тепла випромінюванням (радіаційний теплообмін). Запишемо рівняння, що враховує розповсюдження тепла випромінювання має вигляд [7]:

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

де ν – частота випромінювання;

r – радіус-вектор;

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 залежить від коефіцієнту поглинання речовини. Тоді інтенсивність

випромінювання пропорційна 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. 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

Для проведення комп'ютерних розрахунків використовувалась комплексна програма CFX-Solver Manager 14.5. Дана програма представляє собою ітеративний обчислювач, який вирішує задані в розрахунковій моделі рівняння методом поступових наближень. Спочатку була вирішена дана задача в стаціонарній постановці. Контроль за вирішенням заданих рівнянь проводився візуально (рис. 2.10, 2.11, 2.12, 2.13).

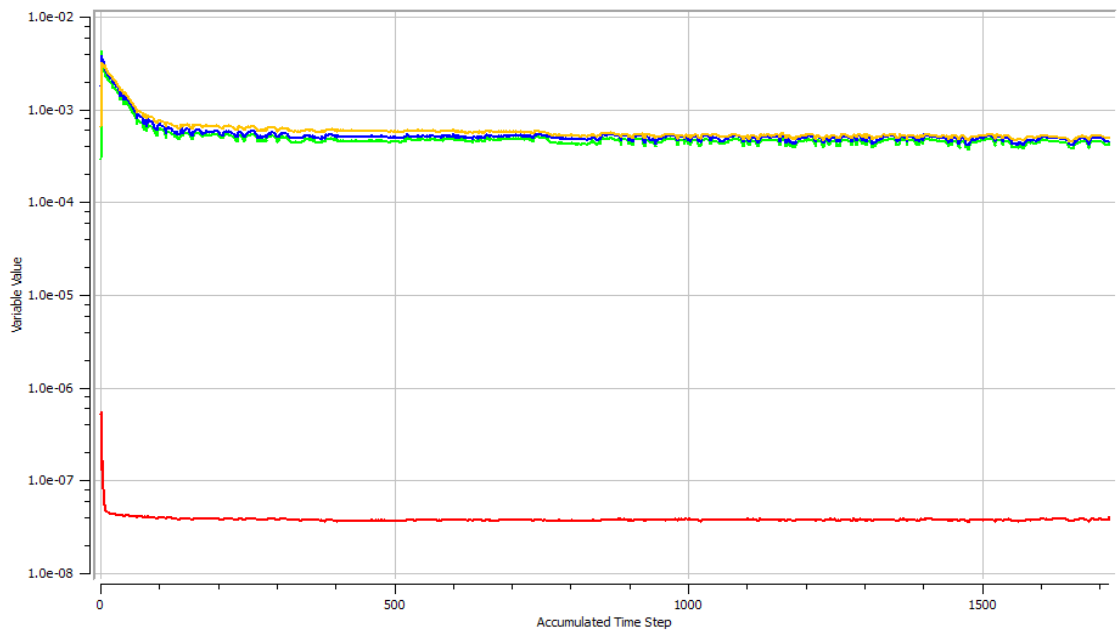


Рисунок 2.10 – Контроль за вирішенням рівнянь швидкості та масової витрати

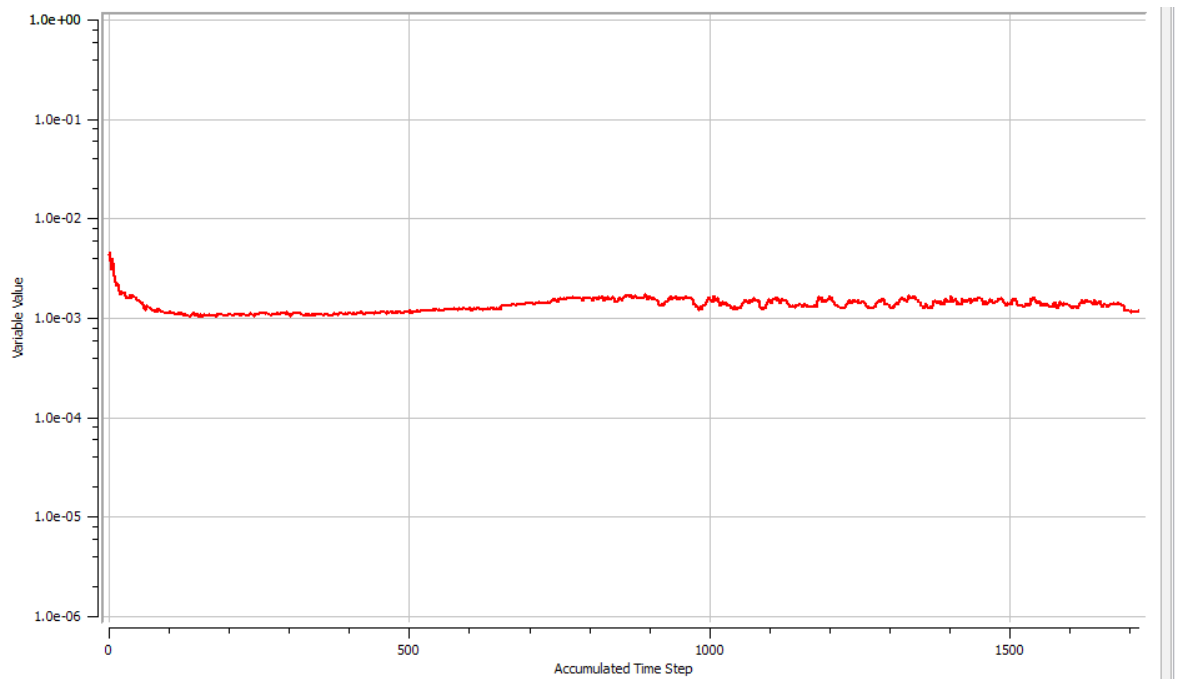


Рисунок 2.11 – Контроль за вирішенням рівнянь енергетичного балансу

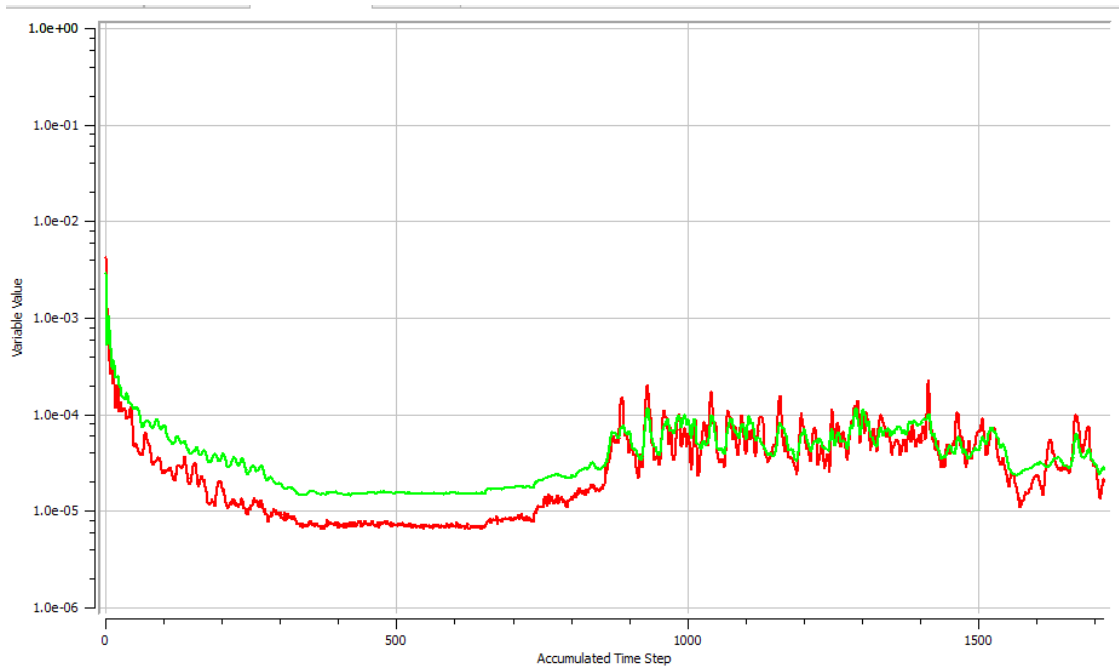


Рисунок 2.12 – Контроль за вирішенням рівнянь

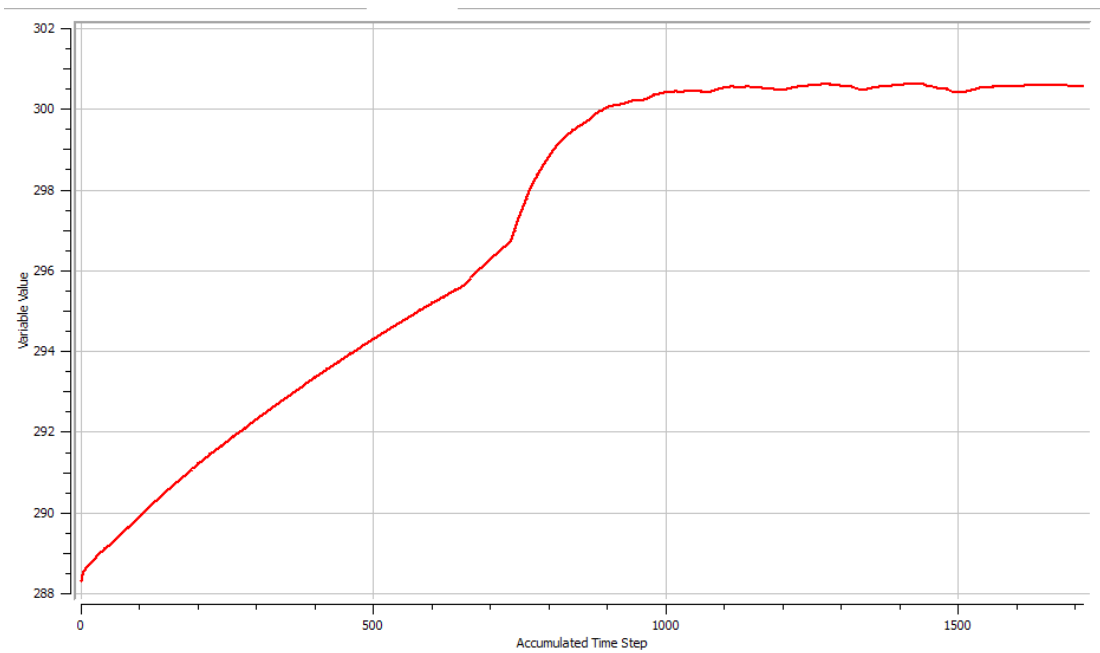


Рисунок 2.13 Контроль за температурою

Було задане значення критерію точності вирішення рівнянь $1.0e-04$ (10^{-4}) по середньоквадратичному відхиленню (RMS), що є достатнім для інженерних розрахунків. Після вирішення задачі в стаціонарній постановці результати стаціонарного розрахунку були прийняті як початкові наближення нестаціонарної задачі для отримання більш точних даних та пришвидшення процес обчислень.

Нестационарна задача була розрахована з кроком розрахунку заданим в табл. 2.3. Для кожного кроку розрахунку було задано 10 ітерацій, тобто отримані значення для кожного моменту часу бралися за результатом десятого наближення, що виявилось достатнім для отримання точних даних.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ

3.1 Загальний аналіз результатів розрахунків

В результаті чисельного дослідження теплового стану приміщення були отримані 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 розрахункових областей при досягненні стаціонарного режиму (теплової рівноваги) при температурі теплоносія 30 °С.

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

Назва параметру	Розмірність	Чисельне значення
Мінімальний розмір	<i>м</i>	20
Максимальний розмір	<i>м</i>	29,6
Визначальний геометричний розмір	<i>м</i>	29,6
Густина	<i>кг/м³</i>	1,284
Динамічна в'язкість	<i>кг/(м·с)</i>	$1,725 \cdot 10^{-5}$
Коефіцієнт теплопровідності	<i>Вт/(м·К)</i>	$2,428 \cdot 10^{-2}$

повітря		
Продовження таблиці 3.1		
Питома теплоємність повітря $p=const$	$Дж/(кг\cdot K)$	$1,0038\cdot 10^3$
Число Рейнольдса (Re)	-	$6,1151\cdot 10^5$
Число Прандтля (Pr)	-	0,7131
Число Релея (Ra)	-	$2,74\cdot 10^{13}$
Абсолютний коефіцієнт розсіювання	m^{-1}	$1,0\cdot 10^{-2}$
Адвективний час	c	29,31
Середньо об'ємна температура	$^{\circ}C$	17,75

Як вже згадувалося в приміщенні відбувається процес вільної термогравітаційної конвекції. Визначальними параметрами при вільній термогравітаційній конвекції 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 підйимальної 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 число Релея $Ra=Gr\cdot Pr > 2\cdot 10^7$, а це означає, що режим руху повітря є турбулентним.

Температура повітря по об'єму приміщення майже не змінюється і при виході на стаціонарний режим майже стала у часі (змінюється не суттєво).

Рівні та інтервали варіації факторів представлені в таблиці 3.2.

3.2 Факторний експеримент

Таблиця 3.2 - Рівні та інтервали варіації факторів

Рівні та інтервали варіації факторів	Фактори		
	Витрата повітря обігрівача $\frac{m^3}{год}$	Температура потoku повітря на виході із повітрообігрівача	Температура огороджувальних конструкцій (навколишнього середовища)
Кодове позначення	x_1	x_2	x_{3n}
Основний рівень ($x_{i,0}$)	13500	50	-8
Інтервал варіації	10500	30	16
Верхній рівень (+)	24000	80	8
Нижній рівень (-)	3000	20	-24

Умови проведення дослідів у кодовому вигляді записано у вигляді таблиці (матриці) планування експерименту, що залежить лише від числа факторів та рівнів кожного фактору.

Для визначення коефіцієнтів регресії було проведено 8 досліджень. Матриця планування трьохфакторного експерименту і результати досліджень представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Матриця планування трьохфакторного експерименту і результати досліджень

Номер дослід у	Планування				Розрахунок				Результат
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+	-	-	-	+	+	+	-	-5,4
2	+	+	-	-	-	-	+	+	36,1
3	+	-	+	-	-	+	-	+	12,7
4	+	+	+	-	+	-	-	-	47,3
5	+	-	-	+	+	-	-	+	13,9
6	+	+	-	+	-	+	-	-	26,15
7	+	-	+	+	-	-	+	-	18,2
8	+	+	+	+	+	+	+	+	27,66

Отримані коефіцієнти регресії [15]:

$$b_0 = \frac{-5,4 + 36,1 + 12,7 + 47,3 + 13,9 + 26,15 + 18,2 + 27,66}{8} = 22,076;$$

$$b_1 = \frac{-5,4 + 36,1 - 12,7 + 47,3 - 13,9 + 26,15 - 18,2 + 27,66}{8} = 12,226;$$

$$b_2 = \frac{-5,4 - 36,1 + 12,7 + 47,3 - 13,9 - 26,15 + 18,2 + 27,66}{8} = 10,926;$$

$$b_3 = \frac{-5,4 - 36,1 - 12,7 - 47,3 + 13,9 + 26,15 + 18,2 + 27,66}{8} = -0,599;$$

$$b_{12} = \frac{-5,4 - 36,1 - 12,7 + 47,3 + 13,9 - 26,15 - 18,2 + 27,66}{8} = 5,326;$$

$$b_{13} = \frac{-5,4 - 36,1 + 12,7 - 47,3 - 13,9 + 26,15 - 18,2 + 27,66}{8} = -6,799;$$

$$b_{23} = \frac{-5,4 + 36,1 - 12,7 - 47,3 - 13,9 - 26,15 + 18,2 + 27,66}{8} = 3,601;$$

$$b_{123} = \frac{-5,47 + 36,1 + 12,7 - 47,3 + 13,9 - 26,15 - 18,2 + 27,66}{8} = 7,051.$$

Величина і знак коефіцієнту показують вплив даного фактору в загальний результат при переході з нульового на верхній або нижній рівень фактору.

Для визначення погрішності коефіцієнтів регресії було проведено додаткові експерименти та використано формулу для визначення середньоквадратичного відхилення та середньоквадратичної помилки

$$\sigma \approx S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

де n – кількість паралельних дослідів.

$$S^2 = \frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 (-5,4 - (-5,35))^2 + (-5,4 - (-5,32))^2 + (-5,4 - (-5,3))^2 = 0,002.$$

Після цього було визначено дисперсію відтворення всієї матриці

$$S_{\text{від}}^2(\bar{y}) = \frac{N \sum_{i=1}^n s^2(\bar{y})}{nN},$$

де n – кількість паралельних дослідів,

N – кількість дослідів або кількість рядків матриці планування.

$$S_{\text{eid}}^2(\bar{y}) = \frac{8 \cdot (-5,4 - (-5,35))^2 + (-5,4 - (-5,32))^2 + (-5,4 - (-5,3))^2}{38} = 0,002;$$

$$S_{\text{eid}}(\bar{y}) = 0,040.$$

Властивості складання діагональної матриці такі: діагональні елементи рівні між собою, тому всі рівняння регресії визначаються з однаковою точністю:

$$S_{bi} = \frac{S_{\text{eid}}}{\sqrt{N}},$$

$$S_{bi} = \frac{0,040}{\sqrt{8}} = 0,014.$$

Знаходимо значимість коефіцієнтів за критерієм Стьюдента:

$$t_0 = \frac{b_i}{S_{bi}},$$

$$t_0 = \frac{22,076}{0,014} = 1545,016; t_1 = \frac{12,226}{0,014} = 855,659; t_2 = \frac{10,926}{0,014} = 764,678;$$

$$t_3 = \frac{-0,599}{0,014} = -41,904; t_{12} = \frac{5,326}{0,014} = 372,760; t_{13} = \frac{-6,799}{0,014} = -475,813;$$

$$t_{23} = \frac{3,601}{0,014} = 252,035; t_{123} = \frac{7,051}{0,014} = 493,485.$$

Для рівня значення $q=0,05$ та числа степенів свободи $f=2$ значення критерію Стьюдента 4,3.

Таким чином, коефіцієнти t_{13}, t_{23} не значимі і їх потрібно виключити із рівняння, після цього воно отримує вигляд:

$$y=22,076+12,226x_1+10,926x_2+(-0,599x_3)+5,326x_1x_2+7,051x_1x_2x_3.$$

Причинами незначимості коефіцієнтів регресії є:

- вузький інтервал варіювання, тому сильно впливаючий фактор не завдає свого впливу на процес;
- параметр оптимізації процесу не залежить від варіювання фактору.

Повертаємося до натуральних показників:

$$y=22,076+12,226 \cdot \frac{x_1-x_{1,0}}{\Delta x_1}+10,926 \cdot \frac{x_2-x_{2,0}}{\Delta x_2}+(-0,599) \cdot \frac{x_3-x_{3,0}}{\Delta x_3}+5,326 \cdot \frac{x_1-x_{1,0}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_2-x_{2,0}}{\Delta x_2}+7,051 \cdot \frac{x_1-x_{1,0}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_2-x_{2,0}}{\Delta x_2} \cdot \frac{x_3-x_{3,0}}{\Delta x_3}$$

$$y=0,00061x_1+0,214x_2+0,913x_3+0,000011x_1x_2+0,0000014x_1x_2x_3-4,602.$$

Отримане рівняння описує вплив витрати повітря обігрівача, температури потоку повітря на виході з повітрообігрівача та температури огорожувальних конструкцій (навколишнього середовища) на температуру повітря в приміщенні та дозволяє визначити оптимальний режим роботи кондиціонеру.

За допомогою системи комп'ютерної ANSYS CFD-Post було отримане графічне зображення наступних залежностей:

- вплив температури потоку повітря на температуру повітря в приміщенні зображено на рис. 3.14

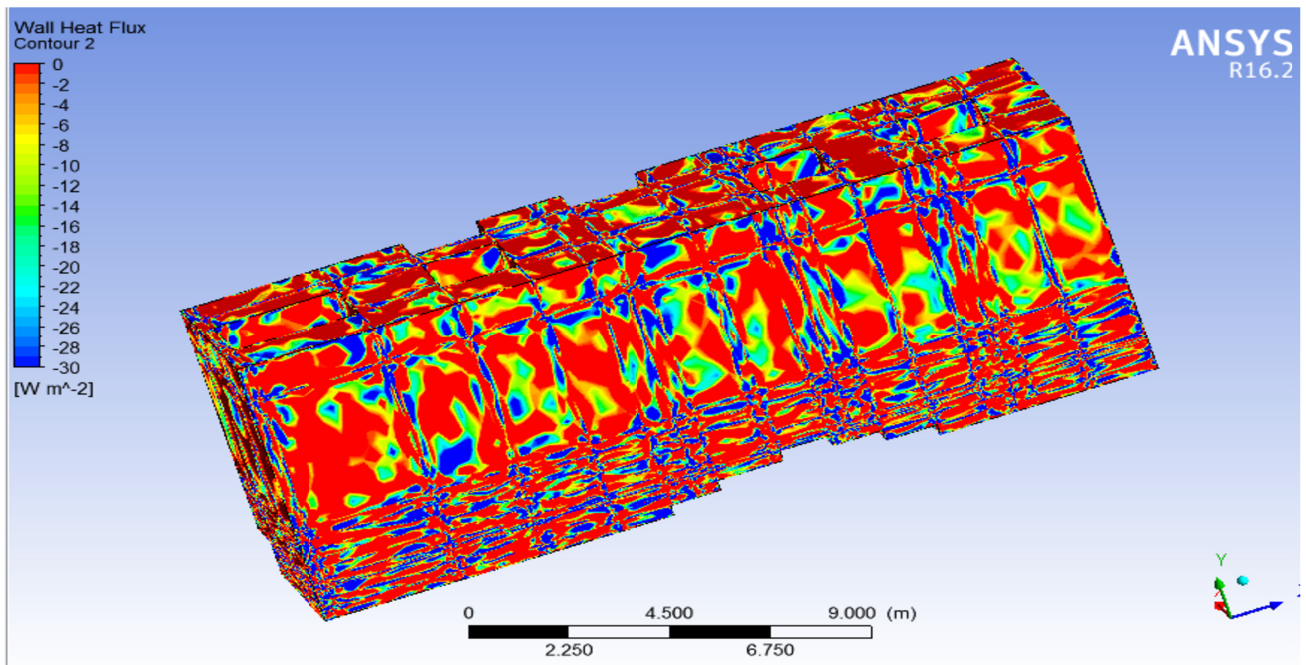


Рисунок 3.14 – Залежність зміни температури в середині кінозалу

- Залежність температури в кінозалі від витрати повітря на виході з повітрообігрівача зображено на рис. 3.15.

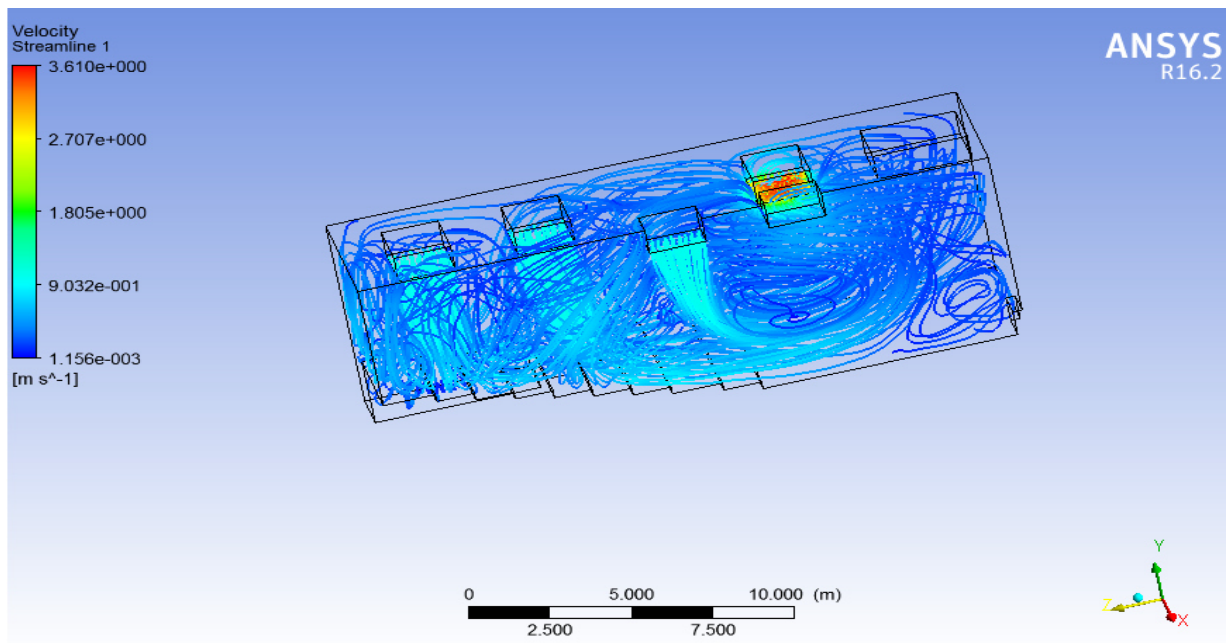


Рисунок 3.15 – Залежність температури в кінозалі від витрати повітря на виході з повітрообігрівача а) витрата повітря 3000м³/год; б) витрата повітря 24000м³/год

- Вплив витрати повітря на виході з повітрообігрівача на температуру повітря в приміщенні зображено на рис. 3.16.

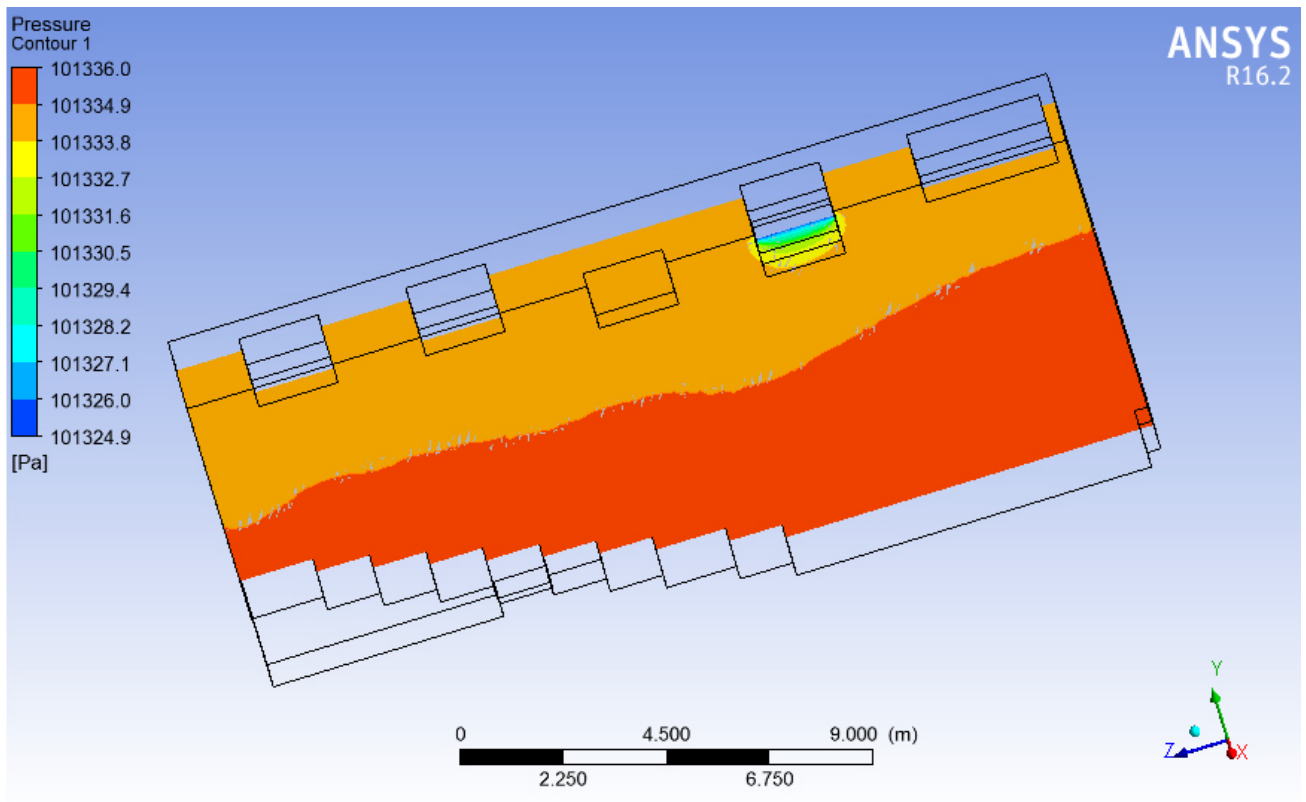


Рисунок 3.16 – Вплив витрати повітря на виході з кондиціонера на температуру повітря в приміщенні.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАМІНИ ТРАДИЦІЙНОГО ОПАЛЕННЯ НА СИСТЕМУ ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ

4.1 Переваги повітряної системи опалення

Повітряне опалення має багато спільного з іншими видами централізованого опалення. І повітряне, і водяне опалення засновані на принципі передачі тепла опалювальним приміщенням шляхом охолодження теплоносія. У центральній системі повітряного опалення, як і в системах водяного, і парового опалення, є генератор тепла — центральна установка для нагрівання повітря і теплопроводи — канали для переміщення теплоносія повітря[9].

Відмінністю є те, що в системі повітряного опалення відсутні опалювальні прилади: гаряче повітря передає акумульоване їм тепло безпосередньо опалювальному приміщенню, змішуючись з внутрішнім повітрям і рухаючись уздовж поверхні огорожень. Радіус дії повітряного опалення може бути звужений до одного приміщення, опалювального одним або декількома водяними або паровими повітрянагрівачами. В цьому випадку повітряне опалення стає місцевим і перетворюється, по суті, у водяне або парове опалення (але потужність повітрянагрівача значно більше потужності одного звичайного опалювального приладу і в приміщенні може бути створена інтенсивна циркуляція повітря)[9].

Для повітряного опалення характерне також підвищення санітарно-гігієнічних показників повітряного середовища приміщення. Можуть бути забезпечені рухливість повітря, сприятлива для нормального самопочуття людей, рівномірність температури приміщення, а також зміна, очищення і зволоження повітря. Крім того, при устрої системи повітряного опалення досягається економія металу[9]. Можливість поєднання повітряного опалення з припливною вентиляцією в холодний період, з охолодженням приміщень в літній період зближує повітряне опалення з вентиляцією і кондиціонуванням повітря і визначає

область його застосування в промислових, цивільних і сільськогосподарських будівлях[9].

Властивість гарячого повітря швидко нагрівати приміщення використовується при здійсненні періодичного або чергового опалення[9].

Разом з тим повітряне опалення не позбавлене істотних недоліків. Як відомо, площа поперечного перетину і поверхні повітропроводів із-за малої теплоакumuлюючої здатності повітря у багато разів перевищують перетин і поверхню водопроводів[9]. У мережі значної довжини повітря помітно охолоджується, не дивлячись на те, що повітропроводи покривають тепловою ізоляцією. По цих причинах застосування центральної системи повітряного опалення порівняно з іншими системами за приведеними витратами може опинитися економічно недоцільним. У розгалуженій мережі багатоповерхової будівлі можливе також порушення в процесі експлуатації розподілу повітря по приміщеннях, що і показав досвід застосування повітряного опалення в житлових будівлях в 60-х роках минулого сторіччя[9]. Місцеве повітряне опалення не має перерахованих недоліків, проте не позбавлене негативних рис, обумовлених розміщенням опалювального устаткування безпосередньо в приміщенні. Необхідність усунення опалювальних приладів з приміщення може перешкоджати використанню місцевого повітряного опалення. Якщо до того ж потрібно забезпечити ряд приміщень припливною вентиляцією, то тільки при центральній системі повітряного опалення спільно виконуються обидві ці умови[9].

Гравітаційні і вентиляторні системи повітряного опалення можуть бути місцевими і центральними. У місцевих системах повітряного опалення рекомендується встановлювати не менше двох легко-опалювальних агрегатів так, щоб нагріте повітря подавалося зверху похилими струменями у напрямі робочої зони приміщення[9].

Місцеві системи і центральні системи за схемою нагріву повітря можуть бути повністю рециркуляційні, частково-рециркуляційні і прямоточні. Всі центральні системи каналні, раціональність використання тієї або іншої схеми для приміщень визначається санітарно-гігієнічними і економічними показниками[9]. Найвищі

експлуатаційні витрати у прямоточних систем опалення, використання цих систем обґрунтоване тільки для тих приміщень, де виділяються шкідливі для життєдіяльності людей гази і пари рідин, тобто для приміщень, в яких повторне використання нагрітого повітря неможливе. Застосування рециркуляційних систем і систем з частковою рециркуляцією економічніше, особливо при використанні природної циркуляції повітря в приміщеннях[9].

Доцільність використання місцевої або центральної системи повітряного опалення встановлюється необхідністю в теплоті приміщень і витратою нагрітого повітря. Збільшуючи температуру нагрітого повітря, можна знизити і витрату повітря, що проходить через систему повітряного опалення[9].

До переваг системи повітряного опалення відносяться:

- висока ефективність нагріву;
- відсутність радіаторів, що дає більше свободи в облаштуванні приміщення;
- швидший обігрів приміщень;
- можливість використання системи повітряного опалення для охолодження в літній час;
- крім функції опалення, система забезпечує свіже повітря в приміщення, додатково очищає його і зволожує, що сприяє поліпшенню мікроклімату в приміщенні;
- низька теплова інерція;
- немає ризику затоплення приміщення, як у випадку з водяними системами;
- немає проблем у разі відключення системи в зимовий сезон;
- можливість підключення системи до каміна;
- можливість запрограмувати необхідну температуру протягом дня і ночі[10].

4.2 Терміни окупності установки при встановленні теплового насоса

Приклад розрахунку витрат опалення на базі теплового насоса [11]:

Тепловий насос 15 кВт вартість 17000 євро (насос + буферна ємність + труби для зондів + гліколь + ел. щиток + колодязьний приямок + монтажні роботи) + буріння 365 м * 450 грн = 165000 грн = 6130 євро. Разом кошторисна вартість 23130 євро. Споживання такого теплового насосу буде 3360 кВт/рік на ГВП та 4355,6 кВт на опалення/рік.

Розрахуємо експлуатаційні витрати коштів на забезпечення потреб теплового насосу при підключеному тарифі «Електроопалення» та двотарифного лічильника. ГВП в нас 3360 кВт·год/рік = 280 кВт·год на місяць. З них 56 кВт·год (20%) вночі + 224 кВт·год (80%) удень[11].

Опалення 4355,6 кВт·год/рік = 622 кВт·год/місяць (протягом 7 місяців). З них 218 кВт·год (35%) вночі + 404,43 (65%) кВт·год вдень.

На 2021 рік тарифи на електроенергію наступні:

– По тарифу Електроопалення (діє щороку з 01 жовтня по 30 квітня) - 1,68 грн за 1 кВт·год.

– По Нічному тарифу:

– Вдень ціна аналогічна звичайному тарифу: 1,68 грн за 1 кВт·год під час дії тарифу Електроопалення.

– Вночі ціна 50% від денного тарифу, тобто 0,84 грн за 1 кВт·год відповідно.

– При підключених обидвох тарифах під час дії тарифу Електроопалення:

– Вдень $(224+404) \cdot 1,68 = 1055,04$ грн/місяць

– Вночі $(56+218) \cdot 0,84 = 230,16$ грн/місяць

– Разом $1055,05 + 230,16 = 1285,2$ грн/місяць = 8996,4 грн за 7 місяців дії тарифу Електроопалення.

Наступні 5 місяців припустимо опалення не працює, і не діє тариф Електроопалення[11]:

– Вдень $224 \cdot 1,68 = 376,32$ грн/місяць

– Вночі $56 \cdot 0,84 = 47,04$ грн/місяць

– Разом $376,32 + 47,04 = 423,36$ грн/місяць = 2116,8 грн за 5 місяців.

Тоді вартість експлуатації теплового насосу за рік буде коштувати:

$$8996,4 + 2116,8 = 11113,2 \text{ грн} \approx 365 \text{ євро.}$$

Приклад розрахунку витрат опалення на базі газового котла[11]:

Та ж сама система опалення на основі газового конденсаційного котла буде коштувати 3500 євро (котел + елементи обв'язки + монтажні роботи).

Прокладання газу від 35000 до 55000 грн. $55000 \approx 1804$ євро.

Споживання газу на рік буде 3500 м^3 , що в перерахунку на кВт·год буде $3500 \cdot 11 = 38500$ кВт·год.

Тарифи на газ на 2021 рік:

– 1 м^3 газу = 7,42 грн/м³

– Транспортування газу 1,68 грн + 20% ПДВ.

Вартість експлуатації газового котла буде:

$$3500 \cdot 7,42 \text{ грн/м}^3 + 3500 \cdot 1,68 \text{ грн/м}^3 \cdot 1,2 = 33026 \text{ грн} \approx 1083 \text{ євро/рік}$$

Згідно даних розрахунків можна визначити, що система повітряного опалення буде доцільнішою, тому що вона в експлуатації обходиться дешевше. Таким чином, термін окупності системи повітряного опалення становитиме близько 5 років.

5.1 Характеристика небезпечних та шкідливих факторів, що можуть виникати під час роботи на об'єкті

Відповідно до положень ЗУ «Про охорону праці» [13], кожен працівник має право на забезпечення охорони їх життя і здоров'я у процесі виконання трудових обов'язків та на належні, безпечні і здорові умови праці. Саме тому одним із першочергових завдань відповідального за охорону праці на об'єкті є дотримання встановлених вимог щодо контролю допустимих показників безпеки.

Енергоменеджер проводячи збір вихідних даних до аудиту будівлі виконує наступний перелік основних робіт:

- виконує необхідні обміри будівлі (за відсутності проектної документації);
- визначає основні характеристики мікроклімату будівлі (температура, вологість, швидкість руху повітря та ін.);
- виконує огляд систем тепло-, водо-, електро- та газопостачання;
- визначає загальний стан будівлі та систем, що в ній функціонують.

Виходячи з цього можемо зробити конкретні висновки, про те в яких саме місцях енергоменеджера може спіткати той чи інший вид небезпек.

Згідно з положеннями [14], до небезпечних факторів відносять будь-який хімічний, фізичний, біологічний чинник, речовина, матеріал або продукт, що впливає або за певних умов може негативно впливати на здоров'я людини. Вони можуть бути спричинені небезпеками механічного та електричного походження, або іншими небезпечними факторами, такими як, наявність вибухових чи отруйних речовин та сумішей, а також термічна небезпека та ін.

До механічних складових відносять небезпеку падіння з висоти. Розглянемо цей пункт більш детально. Висота будівлі становить 10 м. Падіння з такої висоти може нанести тяжкі наслідки не лише здоров'ю людини, але і бути смертельним. Але зважаючи на той фактор, що система повітряного опалення встановлюється, зазвичай, вгорі приміщення, то можливість вийти за межі цієї огорожуючої конструкції відсутня. Також у будівлі, хоч і є пожежні виходи, але вони знаходяться за межами кінозалу, в якому проводяться роботи, тому може виникнути небезпека падіння. Таким чином, можна зробити висновок, що при роботі на даному об'єкті можливість травматизму пов'язаного з роботами на висоті є досить незначною.

Шкідливим фактором називають той фактор середовища або трудового процесу, вплив якого на працівника за певних умов (інтенсивність, тривалість дії тощо) може стати причиною професійного або виробничо обумовленого захворювання, викликати тимчасове або стійке зниження працездатності, підвищення частоти соматичних та інфекційних захворювань, а також, призвести до порушення здоров'я як працівника, так і його нащадків [14].

Серед шкідливих факторів, з якими може зіштовхнутися енергоменеджер під час проведення енергоаудиту можуть бути:

1. Незадовільні умови мікроклімату приміщень;
2. Недостатнє освітлення робочої зони;
3. Забруднення повітря робочої зони;
4. Перевищення допустимого рівня шуму та вібрації;
5. Дія іонізуючого випромінювання та електромагнітних полів.

Можна допустити, що третій пункт є недоцільними для аналізу та дослідження у даному випадку. Всі інші пункти мають місце бути.

Дійсна температура кондиціонованого об'єму будівлі коливається в діапазоні 19-21°C, відносна вологість у середньому становить 55%, що відповідає нормативним значенням [12]. Проектом будівлі передбачене використання системи вентиляції, яка на даний момент працює не належним чином – вентиляційні канали

забиті, а більшість вентиляційних решіток закриті, тому на даний момент, повітрообмін забезпечується за рахунок інфільтрації через входні двері. виправити цю ситуацію можна провівши ряд заходів направлених на ремонт (відновлення повітряних каналів) та модернізацію (встановлення механічних вентиляторів з рекуперацією тепла) загальної системи вентиляції.

Освітлення здійснюється за рахунок роботи двох складових: природного та штучної системи освітлення. Штучне освітлення забезпечується роботою світильників двох типів: ті, які працюють завдяки лампам розжарювання та ті, які працюють на флуоресцентних лампах. Комбінація роботи цих двох систем дозволяє забезпечити належний рівень освітлювання робочої зони у тих приміщеннях, де це необхідно.

За сучасними вимогами [15], для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати найбільш економічні розрядні лампи з світловою віддачею не менше 55 лм/Вт, але слід не перевищувати максимально допустимих значень рівня освітлюваності робочої зони [15].

Отже, можна зробити висновок, що при виконанні робіт на території кінозалу не виявлено явних шкідливих факторів, які можуть вплинути на здоров'я робітників.

5.2 Техніка безпеки при проведенні вимірювань на об'єкті

Відповідно до [16], при проведенні обстеження перед енергоменеджером ставлять наступні завдання:

— визначити загальний стану об'єкта, що споживає ПЕР, його основних підрозділів та технологічних процесів як споживачів ПЕР;

— проаналізувати баланси споживання ПЕР окремо по кожному виду та для найбільш енергоємних технологічних установок, технологічних процесів та підрозділів;

— проаналізувати втрати ПЕР на об'єкті обстеження;

— проаналізувати питоме споживання ПЕР і порівняти з чинними нормами та нормативами;

— розробити рекомендації щодо впровадження енергоощадних заходів та їх техніко-економічним оцінювання.

Збирання інформації про об'єкт обстеження може відбуватися у декілька способів: шляхом проведення опитувань, вивченням документів та проведенням необхідних вимірювань. Зазвичай, методом вимірювання визначають наступні параметри [30]:

— визначення температури (термометр, пірометр, тепловізор);

— визначення тисків (манометр, вакуумметр, барометр, мановакууметр);

— визначення напруги, сили струму (вольтметр, амперметр);

— визначення витрати і кількості речовини (витратомір, лічильник, ваги);

— визначення рівня рідини та сипучих тіл (рівнемір, показчик рівня);

— визначення складу газових сумішей та їх вологості (газоаналізатор, психрометр);

— визначення густини та в'язкості речовини (денсиметр, віскозиметр);

— визначення частоти обертання (тахометр);

— визначення теплоти згорання (калориметр);

— визначення якості води та пари (кондуктометр, вимірювач тиску).

Майже всі ці вимірювання потребують контакту або перебування в безпосередній близькості з певними видами обладнання та установками. Задля запобігання виникнення травматичних ситуацій під час проведення вимірювань енергоаудитор повинен дотримуватися встановлених на об'єкті обстеження правил та норм техніки безпеки. Для цього перед початком проведення робіт, аудитор має

ознайомитися з списком установленого обладнання та правилами проведення вимірювань затверджених на об'єкті обстеження. Керівник організації, в свою чергу, має організувати інструктаж з техніки безпеки на об'єкті та ознайомити аудитора з правилами підключення вимірювальної апаратури [16].

При проведенні вимірювань параметрів досліджуваного середовища та характеристик роботи устаткування енергоаудитору слід дотримуватися наступних правил:

- дотримуватися вимог інструкцій з техніки безпеки;
- не починати вимірювання у разі відсутності вповноваженої відповідальної особи з боку об'єкту обстеження;
- не починати роботу в разі відсутності умов для її безпечного виконання;
- знаходитися на безпечній відстані від безпосередньої робочої зони;
- проводити вимірювання тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;
- не переходити до безпосереднього контакту з обладнанням не маючи маючи відповідного дозволу (допуску);
- за необхідності енергоаудитор має використовувати засоби індивідуального захисту.

5.3 Дії співробітників кінотеатру під час оголошення сигналу «Увага всім!»

Нормативно-законодавчими актами України у сфері цивільного захисту визначено, що інформування та оповіщення у сфері захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру є основним принципом та головним і невід'ємним елементом усієї системи заходів такого захисту.

«Увага всім!» – це головний сигнал цивільного захисту, який подається включенням звукового оповіщення для привернення уваги населення у випадку виникнення надзвичайних ситуацій.

Відповідно до положень [19], надзвичайною ситуацією називають порушення нормальних умов життя і діяльності людей, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом або іншою небезпечною подією, яке призвело (може призвести) до неможливості проживання населення на території чи об'єкті, ведення там господарської діяльності, загибелі людей та/або значних матеріальних втрат.

Для того, щоб своєчасно реагувати на надзвичайну ситуацію, яка може виникнути внаслідок тих чи інших причин, необхідно знати, як у ній діяти. Так, населення повинно знати можливі джерела виникнення аварійних ситуацій та епіцентри їх утворень, аби мати можливість заздалегідь підготуватися та зібрати речі першої необхідності. Оскільки, виникнення надзвичайного випадку може настигнути людей не тільки вдома чи на вулиці, то варто завчасно проводити ряд заходів щодо роз'яснення порядку дій персоналу навчальних закладів, адміністративних будівель, торгових центрів та інших громадських місць під час настання непередбачуваних ситуацій.

Оповіщення людей, які знаходяться на території кінотеатру щодо надзвичайних ситуацій проводиться за заздалегідь розробленою схемою, що допомагає провести ряд злагоджених заходів для запобігання створення загрози життю та здоров'ю учасників навчального процесу. Так, при отриманні інформації про надзвичайну подію під час навчальних занять подається три довгих дзвоника, що буде означати подання попереджувального сигналу «Увага всім!», після чого негайно приводяться у готовність радіо- та телеприймачі для прийняття повідомлення.

Повідомлення буде містити наступні інформацію:

- місце та час виникнення надзвичайної ситуації;
- її розміри та масштаби;

- час початку та тривалість дії факторів ураження;
- подальший порядок дій;
- додаткова інформація.

Прослухавши отримані рекомендації, працівники, що назначені відповідальними у даній сфері повинні провести ряд заздалегідь затверджених заходів на випадок виникнення загрози певного типу [19]. Координувати подальші дії людей, які знаходяться на території кінотеатру повинні працівники, які були завчасно затверджені та з визначеною періодичністю проходять інструктажі щодо порядку дій під час виникнення надзвичайних ситуацій.

У разі виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної із загрозою або початком забруднення повітря хімічно небезпечною чи радіоактивною речовиною всі мешканці кінотеатру мають вийти з приміщення через аварійні виходи, які розташовані в кожному кінозалі та у вбиральні в швидкому доступі. У будівлі повинен бути наявний чіткий план евакуації та заздалегідь підготовлені приміщення для тимчасового перебування людей.

За умови проведення термінової евакуації усіх мешканців кінотеатру з небезпечних зон залучається весь наявний службовий та особистий транспорт працівників, який переходить у розпорядження адміністрації. Евакуація відбувається до місць, що були визначені під час голосового інформаційного повідомлення.

За необхідності, мешканці кінотеатру мають бути забезпечені засобами індивідуального захисту.

При виникненні пожежі, мешканці кінотеатру зобов'язані суворо виконувати вимоги Інструкції з пожежної безпеки, а евакуацію проводити згідно із заздалегідь затвердженим планом евакуації [19].

При загрозі або виникненні катастрофічних стихійних лих, за розпорядженням адміністрації слід виконати ряд необхідні протипожежні заходи,

відключити від електромережі електрообладнання, підготуватися до евакуації або вивезення до безпечного місця найбільш цінних матеріальних засобів [19].

Заздалегідь назначений відповідальний працівник повинен постійно слідкувати за інформацією, яку надає управління з питань надзвичайних ситуацій, про обстановку в місті та доводити її до адміністрації й персоналу кінотеатру.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання даної дипломної роботи отримані наступні результати:

1. Побудовано 3D-модель області повітря кінозалу, опалювальних приладів, повітрообігрівачів в натуральних розмірах.

2. Розроблено розрахункову модель кінозалу, що дозволяє отримати інформацію про розподіл температури, швидкості руху повітря, наявність вихроутворень та зон застою в процесі охолодження приміщення.

3. Проведено факторний експеримент з трьома факторами: об'ємною витратою та температурою потоку повітря на виході із повітрообігрівача, температурою огорожувальних конструкцій (навколишнього середовища).

4. У графічному вигляді представлено вплив витрати повітря, температури потоку повітря на виході з повітрообігрівача та температури огорожувальних конструкцій (навколишнього середовища) на температуру повітря в приміщенні.

5. Оцінено вплив роботи повітрообігрівача при змінних параметрах витрати та температури повітря і змінній температурі зовнішнього середовища та отримано рівняння для визначення оптимального режиму роботи кондиціонеру.

6. За допомогою розробленої моделі можна спрогнозувати найбільш доцільний варіант проектування системи обігріву з точки зору енергоефективності.

7. Проведено економічний аналіз доцільності заміни традиційного опалення на систему повітряного опалення та визначено терміни окупності даної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи енергетичного менеджменту: конспект лекцій / укладач С.В. Сапожніков. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 163 с.
2. ДБН В.2.2-9-2009 «Громадські будинки та споруди»
3. Конспект лекцій з курсу “Енергозбереження будівель” для студентів спеціальності 7.000008 “Енергетичний менеджмент” денної форми навчання / Укладачі: С.С. Антоненко, А.А. Руденко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – 56 с.
4. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. I. Отопление. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1975. 483 с. Авт.: П.Н. Каменев, А.Н. Сканава, В.Н. Богословский и др.
5. Любимов А.К., Шабарова Л.В. Методы построения расчетных сеток в пакете ANSYS ICEM CFD: Электронное методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011 – 25 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 SolverTheory. Release 12.1 [Електронний ресурс], 2009. – 270 с – Режим доступу до ресурсу:<http://orange.engr.ucolans.edu/Documentation12.1/121/CFX/xthry.pdf>.
9. Конспект лекцій по дисципліні «Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря» для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 144 – Теплоенергетика / Укл. Клімов Р.О., – Кам’янське: ДДТУ, 2016. – 102 с.
10. Принцип роботи, переваги та недоліки системи повітряного опалення, [Електронний інтернет-ресурс], режим доступу: <https://ht-heiztechnik.ua/bloh?layout=edit&id=110>.
11. Сайт інжинірингової компанії ТеплоВам, [Електронний інтернет-ресурс], режим доступу: <https://teplovam.ua/okupnist-teplovoho-nasosu/>.

12. ДСТУ Б EN ISO 10077-1:2016 «Теплотехнічні властивості вікон, дверей і жалюзі. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі. Частина 1. Загальні умови»
13. Закон України «Про охорону праці, [Електронний інтернет–ресурс], режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#top>
14. НАКАЗ №248 від 08.04.2014 р. «Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», [Електронний інтернет–ресурс], режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#top>
15. ДБН В.2.5-28-2006. Державні будівельні норми України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. – К., 2006.
16. Наказ №56 від 20.05.2010 «Про затвердження Типової методики "Загальні вимоги до організації та проведення енергетичного аудиту" [Електронний інтернет–ресурс], режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0056656-10#Text>
17. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів» / Укладачі: С.С.Антоненко, Е.В. Колісніченко. - Суми: Вид-во СумДУ, 2009.– 199 с.
18. Закон України «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру», [Електронний інтернет–ресурс], режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1809-14#Text>.
19. ІНСТРУКЦІЯ щодо дій при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій учасників навчально-виховного процесу Вінницького кооперативного інституту та коледжу економіки і права, [Електронний інтернет–ресурс], режим доступу: http://vki.vin.ua/download/CuvilZahust/instrukcia_ns.pdf.