

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка конструкції рекуперативної системи вентиляції
повітря для будинку

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

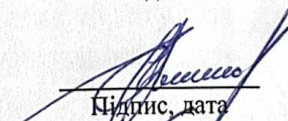
Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-24-1


Підпис

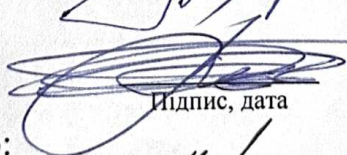
Т. Є. ЯЦКОВСЬКИЙ
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

С. Л. ГОРЯЦЕНКО
Ініціали, прізвище

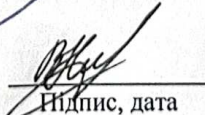
Нормоконтролер


Підпис, дата

О. Ф. ТИМОШУК
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

В. С. НЕЙМАК
Ініціали, прізвище

10 12 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерів, транспорту та архітектури
Кафедра машин і агрегатів, електромеханічних та електричних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань Електроенергетика, інженерія
Спеціальність Електроенергетика, електротехніка та електро-
механіка
Спеціалізація _____
Освітня програма Електроенергетика, техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц., Якимук В.С.

10.12.2025

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Яковлевский Тарас Євгенійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка конструкції рекупераційної системи «векілачі» котла для будинку

керівник роботи _____
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Площа приміщення 50 м², потужність системи до 2 кВт.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. Аналіз існуючих систем рекуперації. Розробка моделі рекупераційної системи. Конструювання системи рекуперації котла, вивчення.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
МРМ 25.02.000.000Р11 Схема рекуперації котла, Р11 Модель системи, Р11 Модель теплообмінника, РР Розробка конструкції котла в теплообміннику, Р3 Рекуператор, Р12 Конструкція рекупераційного котла, Р3 Моделирование работы рекуператора

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

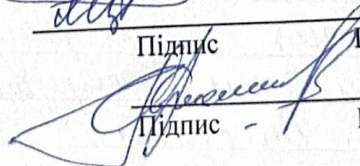
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Аналіз існуючих систем рециркуляції повітря		
2 Розробка моделі рециркуляційної системи		
3 Конструювання системи рециркуляції повітря		
4 Оформлення замовки		
5 Оформлення графічного матеріалу		

Студент



Підпис

Керівник роботи



Підпис

П. С. Яковенко
Ініціали, прізвище

С. Л. Горяченко
Ініціали, прізвище


АНОТАЦІЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Яковський Тарас
Євгенівич
2. Тема магістерської роботи Розробка конструкції рекуператив-
ної системи вентиляції повітря для будинку
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 87 арк., сторінок записки 81

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: Вступ
Аналіз існуючих систем рекуперації повітря
Розробка моделі рекупераційної системи
Конструювання системи рекуперації повітря
Висновки
Перелік джерел посилань

Підпис студента 

" 10 " 12 20 25 р.

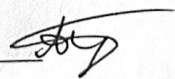
РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від " 18 " 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК добре / с / 78

Рекомендації ЕК -

Особливі відмітки -

Технічний секретар Буряк А.В. 

" 18 " 12 20 25 р.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	4
1 Аналіз існуючих систем рекуперації повітря	9
1.1 Аналіз систем вентиляції та обігріву	9
1.2 Загальна класифікація систем рекуперації повітря	12
1.3 Аналіз існуючих моделей побутових рекуператорів	15
1.4 Аналіз теплообмінників для рекуперації теплоти повітря	19
Висновки до першого розділу	27
2 Розробка моделі рекуперативної системи	28
2.1 Опис алгоритму роботи системи рекуперації	29
2.2 Розробка математичної моделі рекуператора	33
2.3 Вибір технічних засобів автоматизації	50
2.4 Розробка моделі рекупераційної установки	53
2.5 Моделювання теплопереносу в рекуператорі	55
Висновки до другого розділу	60
3 Конструювання системи рекуперації повітря	61
3.1 Аналіз потужностей	62
3.2 Вибір електрообладнання	66
3.3 Розробка конструкції рекуператора	73
Висновки до третього розділу	75
Висновки	77
Перелік джерел посилань	78

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Лім.	Арк.	Аркушів
		Яцковський			Розробка конструкції рекуперативної системи вентиляції повітря для будинку			
		Горященко					3	81
		Неймак						
						гр. ЕТМ-24-1		

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку житлового будівництва характеризуються підвищенням рівня енергоефективності будівель, збільшенням герметичності огорожувальних конструкцій та застосуванням високих стандартів теплової ізоляції. Ці фактори безпосередньо впливають на мікроклімат житлових приміщень і ставлять нові вимоги до систем вентиляції. Традиційні методи провітрювання через відкривання вікон або інфільтрацію повітря крізь нещільності конструкцій втрачають актуальність, оскільки сучасні будівлі створюються з мінімальними тепловтратами та підвищеною повітронепроникністю. У таких умовах виникає потреба у впровадженні спеціалізованих механічних систем вентиляції з рекуперацією тепла (HRV/ERV), здатних одночасно забезпечувати якість повітря та знижувати енергетичні витрати.

Одним із ключових наслідків термомодернізації будівель є значне зменшення природного повітрообміну. Пластикові вікна з багатокамерними профілями, ущільнювальні стрічки, утеплені фасадні системи, пароізоляційні бар'єри — усе це призводить до того, що шляхів для пасивного надходження свіжого повітря практично не лишається. Водночас будь-який житловий простір є джерелом вологи, вуглекислого газу, летких органічних сполук, продуктів побутової діяльності та інших забруднювальних домішок.

Наукові дослідження та європейські будівельні стандарти вказують, що рівень CO₂ у приміщенні не повинен перевищувати 1000 ppm, оскільки це безпосередньо впливає на когнітивні функції, працездатність і самопочуття людини. Проте в сучасних квартирах без організованої вентиляції концентрація CO₂ може швидко сягати 1500–2500 ppm уже через декілька годин перебування мешканців. У спальнях у нічний час цей показник часто перевищує 3000 ppm, що створює несприятливе середовище, сприяє появі головного болю, сонливості, погіршенню якості сну та загальному відчуттю втоми.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатково зростає вологість, що є критичним фактором для формування конденсату на стінах, віконних укосах та в місцях «містків холоду». Висока вологість у поєднанні з недостатнім рухом повітря неминуче створює умови для появи чорної плісняви, яка шкодить як здоров'ю мешканців, так і конструктивним елементам будівлі.

Традиційна природна вентиляція, яка була ефективною у будівлях радянського періоду з низькою герметичністю, у нових реаліях майже не працює.

Причини очевидні:

- мінімальна інфільтрація через сучасні віконні системи;
- незалежність від волі користувача: мешканці не завжди пам'ятають або хочуть провітрювати приміщення;
- тепловтрати через відкривання вікон, що особливо критично взимку;
- різка зміна температури в приміщенні, що призводить до дискомфорту;
- надходження пилу, шуму, вихлопних газів із вулиці, що робить природне провітрювання неприйнятним у багатьох мегаполісах.

Найбільша проблема природного провітрювання — його нестабільність. Повітрообмін залежить від вітру, різниці температур зовні та всередині, тиску в шахтах, і жоден із цих факторів не піддається контролю.

У результаті виникає дилема: або мешканці страждають від нестачі свіжого повітря, або втрачають дорогоцінне тепло в опалювальний сезон. Це прямий аргумент на користь механічних систем вентиляції з рекуперацією.

Рекуперація тепла — це процес передачі енергії від витяжного теплого повітря припливному холодному повітрю без їх змішування. Це дозволяє зберегти до 70–95% теплової енергії, яка інакше була б втрачена. Енергетична економія тут не абстрактне поняття, а вимірюваний техніко-економічний показник.

Для прикладу, якщо середньостатистична квартира потребує 80–120 м³/год свіжого повітря, то без рекуперації це створює додаткову теплову потребу до 500–800 Вт у холодний період року. При застосуванні системи з ефективністю

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

80% реальна додаткова потреба зменшується до 100–150 Вт. Таким чином, рекуперація здатна скоротити втрати до 4–5 разів, що особливо значуще у умовах зростання тарифів на енергоресурси та переходу до енергоощадних технологій.

У приватних будинках, особливо енергоефективних, де сумарні тепловтрати можуть бути зведені до рівня 3–4 кВт, вентиляційні втрати стають порівняними або навіть домінуючими. І без рекуперації ефективність термомодернізації значною мірою нівелюється.

Системи вентиляції з рекуперацією не лише забезпечують енергетичну економію, а насамперед покращують якість повітря у житловому приміщенні. Свіже повітря, яке подається у контрольованому режимі, сприяє:

- нормалізації рівня CO₂;
- зниженню концентрації вологи;
- зменшенню ризику алергій та респіраторних захворювань;
- запобіганню появі грибків та плісняви;
- поліпшенню якості сну та загального самопочуття.

Фахові медичні дослідження вказують, що якість вентиляції безпосередньо впливає на когнітивні функції, продуктивність, рівень стресу та концентрації. У дитячих кімнатах показник CO₂ вище 1500 ppm негативно впливає на розвиток та самопочуття дітей, а в спальнях — на відновлювальні процеси організму.

У багатьох країнах ЄС застосування механічної вентиляції з рекуперацією є не просто рекомендованим, а обов'язковим для нових будівель. Стандарти Passive House, BREEAM, LEED прямо вимагають HRV/ERV у житлових об'єктах із низькими тепловтратами. Це пояснюється тим, що без організованої рекупераційної вентиляції неможливо підтримувати нормативну якість повітря без колосальних енергетичних втрат.

В Україні ДБН В.2.2-15:2019 та інші нормативні документи також визначають мінімальні норми вентиляції, але не встановлюють обов'язковості рекуперації. Однак з огляду на загальноєвропейський курс на енергоефективність можна прогнозувати, що такі системи стануть стандартом у найближчі роки.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Існує кілька альтернатив рекупераційним системам, однак жодна з них не забезпечує одночасно якісний повітрообмін та низькі тепловтрати:

1. Відкривання вікон — неконтрольоване, енергетично неефективне, не працює автоматично.
2. Приточно-витяжні системи без рекуперації — забезпечують якість повітря, але створюють великі витрати тепла.
3. Кухонні витяжки/санвузлові вентилятори — локальні рішення, що не забезпечують загального повітрообміну.
4. Провітрювачі-бризери — подають повітря, але здебільшого без рекуперації, створюють дисбаланс між припливом і витяжкою.

У цьому контексті рекуперація залишається єдиним комплексним рішенням, яке відповідає сучасним вимогам щодо мікроклімату, енергоощадності та автоматизованої роботи.

Фінансові вигоди рекуперації проявляються як у короткостроковій, так і довгостроковій перспективі. Основні чинники економії:

- зниження навантаження на систему опалення;
- зменшення часів роботи котла або теплового насоса;
- економія на кондиціонуванні в літній період (для ERV);
- продовження строку служби будівельних матеріалів (завдяки стабільній вологості);
- скорочення витрат на ремонт через відсутність плісняви та конденсату.

Порівняння теплотрат у квартирі площею 60–100 м² показує, що рекупераційна система може економити від 1000 до 3000 кВт·год тепла щорічно, залежно від клімату та ефективності системи.

Окупність проекту при використанні якісного HRV/ERV зазвичай становить 3–7 років, що є прийнятним показником у контексті житлового будівництва.

Рекупераційні системи сприяють зниженню викидів CO₂, оскільки скорочують потребу в опаленні. Для будинків з тепловими насосами ефект менш

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

помітний у фінансовому плані, але надзвичайно значущий у екологічному. Сучасна «зелена» архітектура принципово не розглядає проекти без механічної вентиляції з рекуперацією як енергоефективні.

Наявність якісної рекупераційної системи стала конкурентною перевагою на ринку нерухомості. Квартури з організованою вентиляцією:

- мають вищу ринкову ціну;
- менше зношуються;
- забезпечують комфортний мікроклімат без провітрювання;
- сприймаються як сучасне та престижне житло;
- відповідають очікуванням покупців, які орієнтуються на європейські стандарти.

Таким чином, необхідність застосування рекупераційної системи у житлових приміщеннях є комплексно обумовленою:

- технічними вимогами до сучасних енергоефективних будівель;
- здоров'ям та комфортом мешканців;
- економічною доцільністю;
- дотриманням сучасних норм мікроклімату;
- екологічними міркуваннями;
- логікою будівельної фізики та гігієни повітря.

Рекупераційна вентиляція перетворюється із преміального вибору на критично необхідний елемент інженерної системи житла. Без неї неможливо забезпечити стабільний та здоровий мікроклімат у сучасних герметичних будівлях, а також досягти реальної енергоефективності. Ураховуючи світові тенденції та зростання вимог до якості життя, такі системи повинні розглядатися як обов'язковий стандарт у новому будівництві та модернізації житлових об'єктів.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ

1.1 Аналіз систем вентиляції та обігріву

Вентиляція — це процес, спрямований на створення комфортного середовища всередині приміщень. На промислових підприємствах часто спостерігається накопичення шкідливих домішок у повітрі, які можуть становити небезпеку для здоров'я працівників. Без належної циркуляції повітря робоча атмосфера на таких об'єктах стає непридатною для виконання виробничих завдань. Класифікувати цей процес можна з різних точок зору, і залежно від обраного критерію виділяють різні типи вентиляції.

У системах опалення конвекційного типу зазвичай використовуються чавунні радіатори або сталеві й кольоровометалеві конвектори. Повітря циркулює навколо радіатора, заходячи знизу і спереду, а, нагріваючись, піднімається вгору, проходить уздовж пристрою і виходить зверху вже підігрітим і рухливим. Конвектори мають меншу площу нагрівальних поверхонь ніж радіатори. Вони розташовуються в нижній частині спеціального кожуха, який створює "димохідний" ефект для організації руху повітря вздовж нагрівальної поверхні, сприяючи його нагріванню та рівномірному розподілу по приміщенню. Характеристики кожуха залежать від розмірів і розташування отворів для входу повітря, а також способу його взаємодії з нагрівальною поверхнею [1].

Конвекційне опалення містить також установки з трубчастим нагрівачем, що застосовується у виробничих цехах. Вентилятор проганяє повітря кімнатної температури з високою швидкістю крізь нього [1, 2]. У подібних системах завдяки примусовій конвекції тепловіддача значно дієвіша порівняно зі звичними радіаторами чи конвекторами, що збільшує загальну віддачу опалення. Тепловентилятори нерідко виконуються у вигляді модуля, розташованого біля стелі в самому приміщенні. Їхні корпуси забезпечені перегородками, що дозволяють коригувати напрямок гарячого повітря задля забезпечення

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівномірного змішування повітряних мас, унеможливлуючи формування зон зі застійним повітрям та різницею температури. Трубчасті нагрівачі з розширеною площею теплообміну також монтують у повітроводах систем повітряного опалення, посилюючи функцію прямого нагрівання повітря. ККД тепловентиляторів суттєво залежить від їхнього розміщення в будівлі та установок напрямку потоків на вході та виході.

Повітряне опалення — це таке, куди підігріте повітря подається до обігріваних кімнат через окремі канали, прокладені у споруді. Якщо ж повітря з приміщення повертається для повторного нагрівання, такий механізм зветься рециркуляційним. У ситуації, коли повернення повітря не планується, і до кімнати надходить лише нагріте зовнішнє блакит, система вважається вентиляційною. Останній вид застосовується лише у приміщеннях, де рециркуляція повітря небажана. Повітряне опалення може бути природним чи примусовим. У системах з природним рухом переміщення повітря забезпечується різницею температур та густини. Тому при проектуванні таких повітроводів важливо зменшити втрати на тертя, аби гарантувати потрібну інтенсивність циркуляції повітря. У системах з примусовою циркуляцією для підтримання необхідної сили руху використовується зовнішнє джерело енергії. Завдяки більшій швидкості повітря у таких системах полегшується завдання його змішування, проте з'являються супутні труднощі, зокрема гул у повітропроводах та розподільних ґратах [1, 2].

Системи променистого обігріву ґрунтуються на принципі теплового випромінювання, тобто передачі тепла від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою. Установки такого типу спрямовують тепло у нижню частину приміщення і передають його безпосередньо поверхням, які обігріваються, а не повітряю. Завдяки цьому потреба в додатковій потужності установки через висоту приміщення зникає. Відсутність скупчення теплого повітря під стелею дозволяє зменшити тепловтрати та створити комфортні умови. Крім того, у таких приміщеннях температура повітря може бути дещо

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нижчою за стандартну розрахункову, але підвищена температура стін і поверхонь забезпечує відчуття комфорту для людей. Системи кабельного обігріву використовують нагрівальні кабелі або тканини для ефективного вирішення завдань підтримки температури, розігріву чи уникнення обмерзання. Такі системи знаходять широке застосування при облаштуванні «теплих» підлог, а також у нестандартних рішеннях для обігріву.

Згідно зі способом організації повітрообміну, вентиляцію поділяють на природну та примусову. За функціональним призначенням вона буває припливною, витяжною або комбінованою (припливно-витяжною). Залежно від охопленої площі розрізняють загальнообмінну та місцеву вентиляцію. Варто детальніше розглянути переваги й недоліки природної та примусової вентиляції, що наведені в таблиці 1.1. Таблиця 1.1 містить порівняння цих видів вентиляції.

Таблиця 1.1 — Порівняння типів вентиляції

Природна вентиляція	Примусова вентиляція
<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Простота у впровадженні - Низька вартість 	<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Незалежність від кліматичних умов - Регулювання об'єму повітря, що надходить - Можливість очищення повітря від пилу
<p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Залежність від зовнішньої температури - Залежність від швидкості та напрямку вітру - Неможливість очищення повітря від пилу - Обмежена можливість забезпечення повітряного потоку до окремих зон у приміщенні 	<p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Шум під час роботи - Витрати електроенергії - Необхідність попереднього підігріву вхідного повітря

1.2 Загальна класифікація систем рекуперації повітря

Рекуперація повітря (air-to-air energy/heat recovery) — передача енергії між вихідним (витяжним) і припливним потоками без (або з мінімальним) їх перемішування. У техніці розрізняють HRV (Heat Recovery Ventilator — передача тільки сенсильної теплової енергії) та ERV (Energy/Enthalpy Recovery Ventilator — передача і тепла, і вологи / латентної енергії). У промисловій і проектній практиці зустрічаються кілька базових архітектур теплообмінної «серцевини»: пластинчасті (fixed plate) — кросфлоу / контрпотік, роторні (thermal/enthalpy wheel), теплові труби (heat pipes), run-around loops, fixed-bed regenerators, а також комбіновані та мембранні рішення. [3]

Пластинчасті теплообмінники (Fixed-plate: crossflow / counterflow / мембранні пластини) мають принцип дії такий: припливний і витяжний потоки проходять через чергування тонких пластин (метал або пластик), тепло переходить через стінки пластин. Конфігурації — crossflow (перехресний потік) або counterflow (протитечія), зустрічаються і гібридні компактні модулі. [3]

Температурна ефективність у житлових агрегатів зазвичай 65–90% залежно від конструкції, розмірів і швидкості повітря; пластини з ентальпійною мембраною дозволяють частково передавати вологу й реалізують режим ERV. (MDPI) Переваги: немає рухомих частин, висока надійність; низький ризик перехресного переносу запахів/забруднень; простота виготовлення та обслуговування. До недоліків можна віднести:

- високий перепад тиску при високих швидкостях → енерговитрати вентиляторів;
- конденсація на поверхні при сильній різниці вологості → потреба дренажу;
- чутливість до обмерзання в холодних кліматах — потрібні антиобмерзні стратегії. (airwoodscomfort.com)

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рекомендації: для квартир і компактних систем широкоживані контрпотічні або компресорно-оптимізовані пластинчасті модулі; якщо потрібна передача вологи — шукати ентальпійні мембрани сертифікованих виробників.

Роторні теплообмінники (Thermal / Enthalpy Wheel) мають обертове колесо (пориста матриця із металу або ентальпійного матеріалу), що накопичує тепло (і за потреби вологу) від витяжного повітря і передає його припливному при обертанні. Часто застосовується у вигляді ентальпійного ротора (ERV) для передачі водяної пари. (BPC Ventilation Store), причому ефективність температурної рекуперації часто 70–90% (залежить від матеріалу та швидкості обертання), а ефективність по волозі у ентальпійних колесах може бути високою (значна латентна передача). Переваги: висока ефективність і компактність; можлива одночасна передача тепла і вологи (корисно у вологих кліматах) [4].

Деякі конструкції самочищуються; підходять для більших АНУ і житлових блоків. Однак можливий перехресний перенос запахів/забруднень при неідеальному ущільненні. Це потребує технічного обслуговування (чистка, підшипники), електроживлення на привід ротора.

У деяких приміщеннях (наприклад медичні) роторні рішення не рекомендовані через ризик крос-контамінації.

Вони ефективні для мультизональних систем і там, де бажане збереження вологи; у квартирних компактних блоках ротор менш поширений, але застосовується у багатофункціональних агрегатах. (systemair.com)

Теплові труби (Heat Pipes) та термосифони основані на тому, що в герметичних трубах відбувається фазообмін робочої рідини: у теплому боці — випаровування, у холодному — конденсація; тепло переноситься без прямого контакту між повітряними потоками (немає перемішування). [5]

Застосування доцільно при стабільних гібридних потоках, надійні (немає рухомих частин), мають низький перепад тиску; зазвичай передають тільки сенсильне тепло (HRV). Показують високу надійність, є відсутність хімічних

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

сорбентів, але обмежена довжина і здатність роботи при сильних температурних перепадах, тому часто застосовуються у великих вентиляційних установках.

Run-around loops (кольцеві контури з рідиною) мають два теплообмінника (витяжний і припливний) з'єднані циркуляційним контуром теплоносія (антифриз, вода) і насосом; дозволяє розділити повітряні потоки значною відстанню.[6]. Доцільні для реконструкцій і там, де приплив/витяжка рознесені (наприклад, у великих торгових приміщеннях). Але складність установки та енерговитрати на насос дають нижчу ефективність порівняно з «прямими» теплообмінниками у компактних системах.

Мембранні / сорбційні та десикантні рішення (для контролю вологості) засновані на мембранних чи десикантних покриттях, що надають здатність переносити водяну пару (латентну енергію) між потоками без значного переносу запахів; застосовують у ERV і у fixed-bed генераторах. Нові матеріали (пористі мембрани, сорбенти, наносенсибілізовані покриття) покращують співвідношення латент/сенсигельної передачі. [7]. Ентальпійні пластини і сорбційні блоки дають можливість високої вологопередачі; у деяких дослідженнях латентна ефективність коливається 50–80% у залежності від матеріалу та умов. Гарний контроль вологості без окремого осушення/зволоження дає підвищення комфорту в жарких/вологих кліматах. Як недоліки: дорожчі, чутливі до забруднення; потребують періодичного обслуговування.

Fixed-bed генератори (FBR) і дво-блокові системи (twin-tower / heat storage cores) засновані на тому, що один або два стаціонарні масиви матеріалу (наприклад металеві або полімерні матриці) «накручуються» у циклі — потоки періодично перемикаються (або два ядра чергуються), що дозволяє накопичувати тепло й вологу й віддавати їх при зміні напрямку/чергуванні. Цей підхід використовується у деяких спеціалізованих HRV/ERV, іноді під торговими назвами «DualCore» тощо. [8]. Демонструють високу ефективність у холодних кліматах; можлива добра робота при низьких температурах без сильного

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

обмерзання. Недоліки: складніша динаміка, потреба в керуванні заслінками/дамперами. (eprints.whiterose.ac.uk)

Відомі також [13] нові матеріали: мембрани з покриттям, наноматеріали, GO-покриття (graphene oxide) для покращення газо/вологопередачі — у розробці (лабораторні та ранні промислові випробування).

Фазові накопичувачі тепла (PCM) вбудовані в стіни/блоки для «вирівнювання» пікових навантажень — на стадії досліджень і обмежених пілотів. [14], можлива інтеграція з тепловими насосами / ЕАНР (exhaust-air heat pumps) , що дає комбіновані підходи для підвищення загальної ефективності систем опалення/вентиляції. [14-16]

Отже, HRV або ERV - вибір залежить від клімату: холодний/сухий. HRV для вологого/помірно-теплого або якщо є бажання контролю вологості то - ERV (мембрани/ентальпійні рішення). Пластинчасті надійні, без перехресного переносу, підходять для більшості квартирних застосувань; можуть бути як HRV, так і ERV (з мембраною). Роторні дають високу ефективність, добру латентну передачу, але ризик крос-контaminaції і потреба в технічному обслуговуванні. Темлові труби корисні у специфічних випадках (довгі траси, реконструкція); не так компактні для малих квартир. Мембранні найкращі для контролю вологості; дорожчі, потребують чистоти повітря та обслуговування. (eurovent.eu)

1.3 Аналіз існуючих моделей побутових рекуператорів

Системи рекуперації повітря (HRV/ERV) є ключовим елементом сучасних енергоефективних будівель, особливо в умовах високої герметичності житлових приміщень. Зміна будівельних норм та зростання вимог до теплової ізоляції призвели до суттєвого зменшення природної інфільтрації, що, з одного боку, знижує теплові втрати, але з іншого — створює ризики погіршення якості повітря, підвищення вологості та розвитку цвілевих грибків. Рекуператори дозволяють одночасно забезпечувати приплив свіжого повітря та видалення

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

відпрацьованого, повертаючи при цьому значну частину теплової енергії. Це дає змогу зменшити навантаження на системи опалення та кондиціонування, покращити мікроклімат і створити сталий режим вентиляції без суттєвих тепловтрат.

Побутові рекуператори поділяються на централізовані, які обслуговують весь об'єкт через мережу повітроводів, та децентралізовані, що монтуються в окремих кімнатах і не потребують складної інфраструктури. На ринку представлено десятки моделей від міжнародних виробників, що відрізняються конструкцією теплообмінників (пластинчасті, ентальпійні, роторні), рівнем шуму, енергоефективністю, системами керування та функціональністю.

Нижче наведено структурований огляд найпоширеніших побутових рекуператорів та вентиляційних систем з рекуперацією, включно з ключовими характеристиками, перевагами та недоліками.

1.3.1 Systemair SAVE (централізовані HRV/ERV)

Відомі централізовані побутові АНУ з різними варіантами (пластина/ротор). Часто поставляються як «готові» блоки для квартир і малих будинків. [5]. Systemair SAVE — серія високоефективних вентиляційних агрегатів для будинків та квартир площею до 300–500 м². Використовують пластинчасті або ентальпійні теплообмінники, інверторні вентилятори, розширену автоматику та можливість інтеграції у “розумний будинок”.

Переваги: Високий ККД рекуперації (до 90–92%); дуже низький рівень шуму завдяки якісним ЕС-вентиляторам; розвинена автоматика, що включає CO₂-сенсори, датчики вологості, Wi-Fi, логування параметрів. Є підтримка холодоагентних контурів для догріву або охолодження (Optional Coil). Надійна конструкція та довгий ресурс фільтрів.

Недоліки: Висока ціна у порівнянні з більшістю конкурентів, потрібна система повітроводів і професійний монтаж, габарити можуть бути великими для квартир малих площ.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.3.2 Zehnder ComfoAir / Novus (централізовані ERV/HRV)

Zehnder — ComfoAir (ComfoAir Q / ComfoAir 160 / Novus) - це централізовані MVHR (пластинчасті/контрпотік), моделі для будинків і квартир; високі показники рекуперації, хороша фільтрація і низький шум у преміум-сегменті. Zehnder активно позиціонує серію *ComfoAir Q* як «високоєфективну домашню MVHR». [6]

Моделі ComfoAir Q та Novus мають дуже високі показники енергоефективності та сертифікацію Passive House.

Переваги: ККД до 95% (залежно від моделі); сертифікація Passive House — гарантія мінімальних втрат енергії; дуже низькі вібрації та шум; високий рівень автоматизації, розширені опції керування; фільтрація класу F7–F9 (можлива інсталяція антиалергенних фільтрів).

Недоліки: одна з найвищих цін на ринку; складність сервісного доступу в деяких компактних моделях та вимагає якісного проектування повітропроводів.

1.3.3 Mitsubishi Electric Lossnay (централізовані ERV)

ERV-рішення (енергетична/вологонереносна технологія Lossnay), відомі вбудованим контролем вологи і можливістю інтеграції з іншими системами обігріву/охолодження. Застосовуються для житлових та комерційних рішень. (Mitsubishi Electric Australia). Системи Lossnay використовують ентальпійні паперові теплообмінники, що одночасно повертають тепло й вологу. Є моделі як для житлових приміщень, так і для малих офісів.

Переваги: хороший баланс вартості та можливостей; ентальпійний теплообмінник повертає частину вологості та покращує мікроклімат взимку; невеликий рівень шуму та компактні розміри, проста інтеграція із системами кондиціонування Mitsubishi Electric [7].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки: ККД нижчий порівняно з преміальними HRV (часто 70–80%); паперовий теплообмінник не підходить для середовищ з високою вологістю (басейни, кухні ресторанного типу); обмеженість керування у базових моделях.

1.3.4 LUNOS e² (децентралізована HRV система)

Німецький бренд LUNOS є одним із найпопулярніших виробників децентралізованих рекуператорів. Моделі e² — це компактні пристрої, які монтуються у зовнішню стіну без повітроводів. Працюють попарно або в автономному режимі.

Переваги: не потребують повітроводів — мінімальне втручання у ремонт; дуже низьке споживання енергії (0,5–3,5 Вт); рівень шуму лише 16–20 дБ — майже нечутні; легко встановити у готову квартиру; модульна система (можна ставити 1, 2 або 10 пристроїв у різних кімнатах).

Недоліки: робота циклічна (реверсивний режим) → мінливий тиск та обмін повітря; підходить лише для окремих кімнат, а не для всього житла одразу; потрібно регулярно чистити керамічний теплоаккумулятор; обмежена продуктивність (до ~22–45 м³/год на одиницю) [8].

1.3.5 MAICO WS / ET / RET (централізовані та децентралізовані HRV)

MAICO пропонує широку лінійку як децентралізованих, так і централізованих систем для житлового сегменту. Відомі високою надійністю та хорошою шумоізоляцією [9].

Переваги: висока якість матеріалів і тривалість роботи; добра шумоізоляція корпусів; просте механічне та електронне керування; широкий вибір форматів — від настінних до стельових. Є моделі з теплообмінниками до 90% ефективності.

Недоліки: дизайн не завжди сучасний (особливо у децентралізованих моделях); досить висока ціна на фільтри; менший асортимент «розумних» функцій порівняно з преміум-брендами.

1.3.6. Broan-Nutone AI Series (централізовані HRV/ERV)

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Північноамериканський бренд, орієнтований на приватні будинки. Серія AI — одні з найрозумніших побутових рекуператорів із системою адаптивного керування [10].

Переваги: інтелектуальна система керування (AI) аналізує CO₂, VOC, вологість; висока продуктивність, підходить для великих будинків; досить тихі навіть при великому потоці повітря; сумісні з міжнародними системами автоматики (BASnet тощо); достатньо доступна ціна у порівнянні з Zehnder.

Недоліки: більше орієнтовані на ринок США і Канади — складніше знайти сервіс в Україні; витрата енергії більша, ніж у європейських аналогів через продуктивність.

1.3.7 Побутові китайські рекуператори (Xiaomi, AERIS, Midea, інші)

Китайські виробники активно виходять на ринок бюджетних рекуператорів, включаючи настінні моделі з Wi-Fi та HEPA-фільтрами. Деякі моделі не мають сертифікацій EN або Passive House, проте є популярними через низьку ціну [11].

Переваги: дуже доступна вартість; часто — хороша фільтрація (HEPA H11–H13); компактність та швидкий монтаж; смарт-керування через застосунки.

Недоліки: ККД нерідко завищений у специфікаціях; деякі моделі шумні на високих обертах; невідомий реальний ресурс вентиляторів та фільтрів; відсутність європейських сертифікацій.

1.4 Аналіз теплообмінників для рекуперації теплоти повітря

Одним з доступних засобів впровадження енергозберігаючих технологій, в складі централізованих вентиляційних агрегатів, при проектуванні нових і реконструкції старих систем кондиціонування та вентиляції є установка рекуперативного теплообмінника. Заощадження енергії відбувається за рахунок

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

обміну теплом між припливним повітрям і витяжною. Установка рекуператора тепла в існуючих системах можлива без заміни основних вузлів і агрегатів [16].

Розглянемо існуючі типи засобів рекуперації теплової енергії з урахуванням переваги і недоліків, характерних для всіх існуючих типів рекуператорів МРМА 25.00.00.000 ДО1.

Пластинчасті теплообмінники належать до рекуператорів із контактуючими площинами. У них тепловиділяючі та теплопоглинаючі повітряні потоки переміщуються вздовж площин, які розділяють потоки і відзначаються високою теплопровідністю, забезпечуючи процес теплообміну [1, 3]. Типова схема рекуперативної установки з використанням пластинчастого теплообмінника представлена на рисунку 1.17. Ефективність пластинчастих теплообмінників залежить від конструктивного виконання і може становити від 40 до 70%. Водночас втрати напору для притоку і витяжки коливаються в межах від 50 до 250 Па.

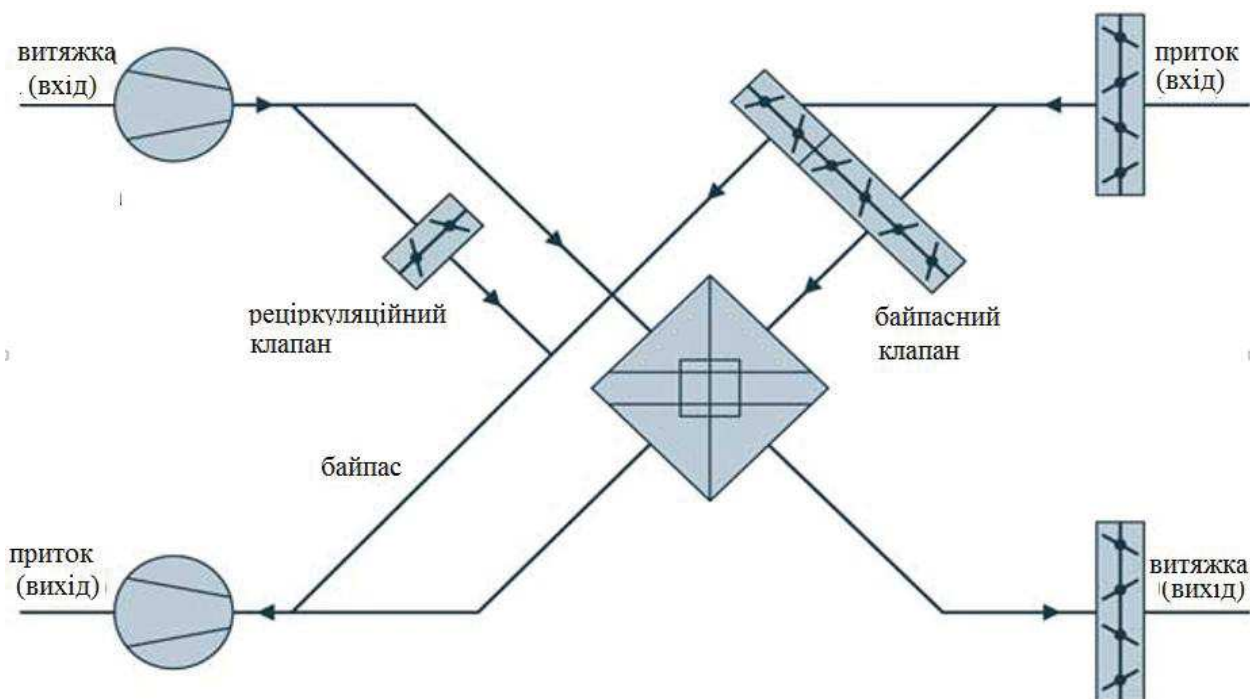


Рисунок 1.17 - Схема системи рекуперації з пластинчастим теплообмінником

Основні переваги:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1) Пластинчасті теплообмінники характеризуються простою конструкцією, яка не містить рухомих частин;

2) Завдяки належному технічному рішенню (використання витяжного вентилятора перед і після теплообмінника) виключене ризик забруднення припливного повітря через можливі витіки у витяжній системі;

3) Практично не потребують технічного обслуговування.

Головні недоліки:

1) Їх доцільно використовувати лише за умови перетинання припливного і витяжного повітроводів;

2) У зимовий період, при загрозі замерзання теплообмінника, необхідна автоматична періодична зупинка вентилятора припливу або застосування байпасу;

3) Відсутність вологообміну між припливним і витяжним повітряними потоками.

Теплообмінники також використовуються для регулювання температури, причому загальні схеми їх роботи представлені в документі МРМА 25.00.00.000 ДІ2. Відповідно до світових норм, роторні теплообмінники класифікуються як рекуператори зі змінним акумулятором тепла. Ротор оснащений насадкою з високою теплоємністю, яка під час використання протитокової схеми змінно нагрівається і охолоджується тепловиділяючими та теплопоглинальними повітряними потоками. Типова схема рекуперативної системи на основі роторного теплообмінника зображена на рисунку 1.18.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

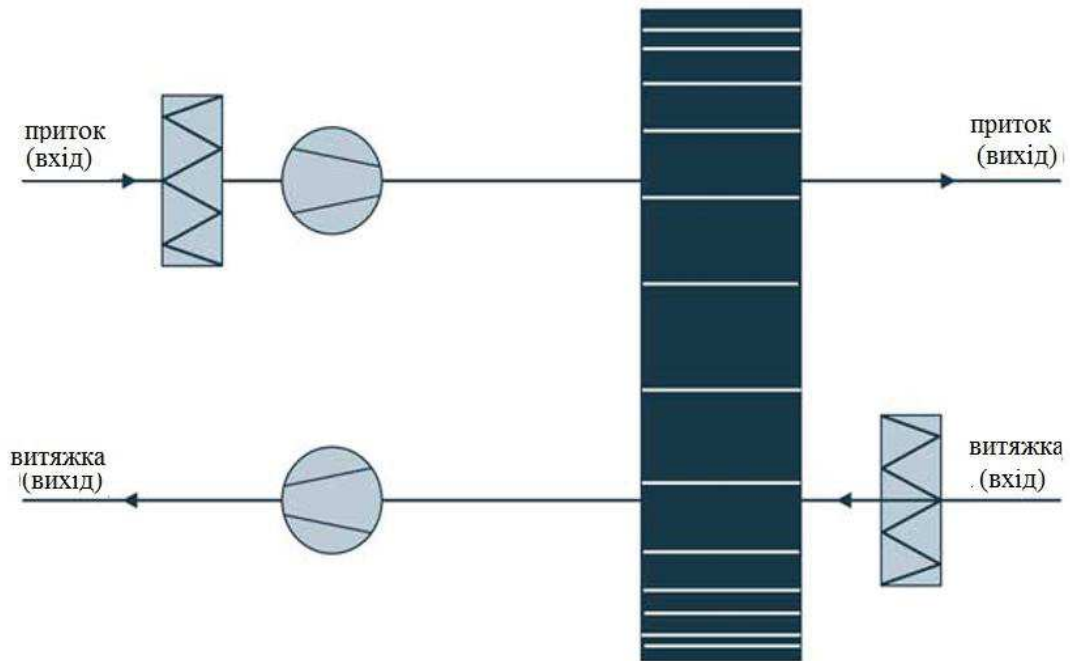


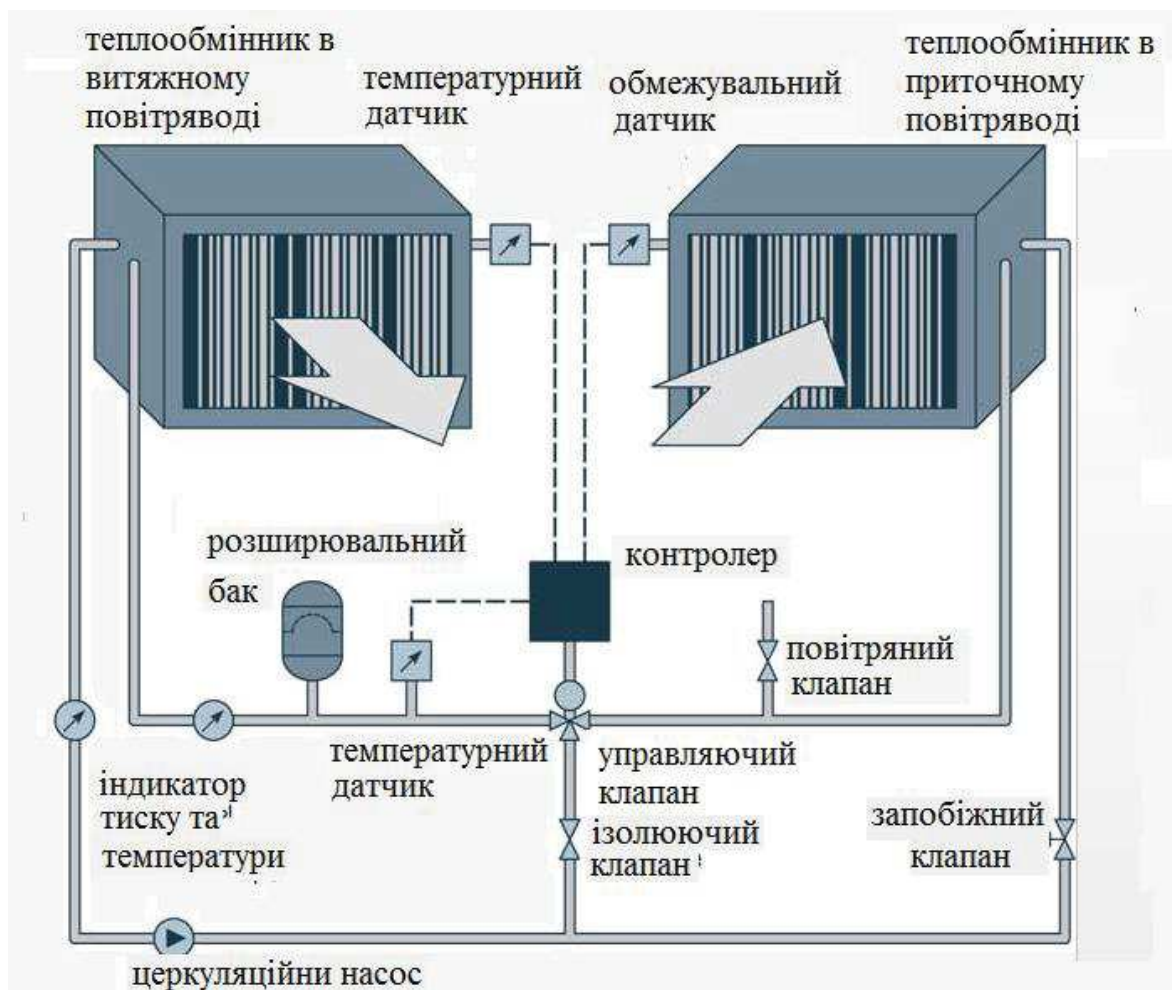
Рисунок 1.18 - Схема рекуперативної установки з роторним теплообмінником

Залежно від властивостей повітря та типу насадки, процес теплообміну може супроводжуватися частковим переміщенням вологи. Існують роторні теплообмінники конденсаційного типу, які переважно виконують передачу тепла та тієї частки вологи, що осідає на поверхні насадки в місцях із температурою нижче точки роси. Роторні теплообмінники гігроскопічного типу забезпечують передачу тепла і вологи завдяки використанню насадок зі спеціальним гігроскопічним покриттям. Натомість у роторних теплообмінниках сорбційного типу основна увага приділяється саме перенесенню вологи. Для цього на насадку з низькою теплоємністю, таку як скло, наносять шар сорбенту, наприклад солей літію або силікагелю. Конструктивні характеристики роторних теплообмінників дозволяють досягати загальної ефективності на рівні 60–85%, тоді як втрати тиску на припливному і витяжному каналах становлять від 75 до 500 Па. Переваги роторних теплообмінників: 1. Можливість використання роторів різних типів розширює їх сферу застосування. 2. Велика питома поверхня насадки забезпечує ефективний процес тепломасообміну, що дозволяє зменшити габарити пристрою. 3. Регулювання швидкості обертання ротора дає змогу змінювати загальну ефективність роботи рекуператора. Недоліки: 1. Експлуатація виправдана лише у випадках, коли припливні та витяжні

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

повітроводи розташовані паралельно та близько один до одного. 2. Робота ротора та вентиляторів, необхідна для компенсації втрати тиску, може викликати додаткове споживання електроенергії. 3. Частковий перенос забрудненого повітря з витяжного на припливний канал може ускладнити використання у середовищах із токсичними речовинами чи сильними запахами, навіть за умови очищення. Окрім того, застосовуються водяні циркуляційні системи, які включають два ореблених теплообмінники типу «вода-повітря», з'єднані гідравлічним контуром для прокачування води або водо-гліколевої суміші [16].

Теплообмінники розташовані в припливному та витяжному повітроводах і можуть бути рознесені на певну відстань один від одного. Типову схему такого обладнання можна знайти на рисунку 1.19. Суть роботи полягає у перенесенні тепла, поглинутого з одного повітряного потоку через проміжний теплоносій, до іншого теплообмінника, який передає його іншому потоку повітря.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рисунок 1.19 - Схема водяній циркуляційної системи

Залежно від конструкції водоповітряних теплообмінників та використаної запірно-регулюючої арматури, водяні циркуляційні системи здатні забезпечувати рекуперацію тепла з ефективністю від 50 до 65%, при цьому втрата напору на притоку та витяжці становить від 200 до 900 Па.

Основні переваги таких систем:

- 1) Відсутність необхідності розміщення припливних і витяжних повітроводів поруч, що виключає потребу в зміні їх траєкторії під час модернізації наявних систем вентиляції та кондиціонування;
- 2) Повне запобігання перетоку забрудненого повітря з витяжки в приплив завдяки ізоляції потоків за допомогою проміжного теплоносія.

Основними недоліками є:

- 1) Значна додаткова витрата електроенергії на роботу циркуляційного насоса, яка разом із додатковими витратами електроенергії для вентиляторів, спрямованими на подолання втрати напору, може зробити економічну доцільність рекуперації сумнівною за певних умов;
- 2) Потреба у значному обсязі технічного обслуговування через використання циркуляційного насоса та великої кількості запірно-регулюючої арматури;
- 3) Відсутність можливості вологообміну між потоками припливного та витяжного повітря.

Існує також нагода використання теплових труб. Теплові труби є фреоновим контуром, у якому теплоносій циклічно змінює свій стан із рідкого на газоподібний та навпаки. Типова схема теплової труби наведена на рисунку 1.20.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

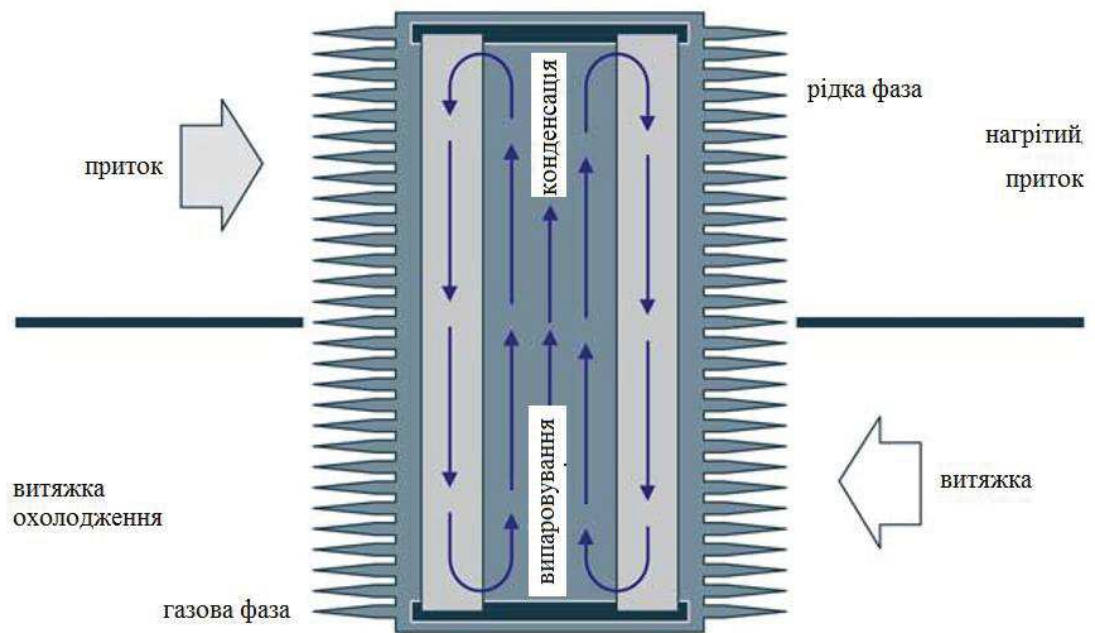


Рисунок 1.20 - Схема теплової труби

У процесі роботи тепло з одного потоку повітря передається іншому через проміжний теплоносій, який здійснює фазові переходи, проходячи через капілярну трубку. Ефективність теплових труб варіюється в межах 45-65% і може регулюватися шляхом зміни кута нахилу щодо вертикалі. Завдяки ізоляції потоків проміжним теплоносієм потрапляння забрудненого повітря з витяжного потоку до припливного виключено. Серед доступних систем рекуперації теплотрубно рішення виділяються своєю компактністю. Умовою використання таких систем є розташування нагнітальних і витяжних повітропроводів поруч один з одним. Крім того, теплові помпи ефективно коригують температуру, діючи як охолоджувальний контур із компресором, розширювальним вентилем, випаровувачем і конденсатором, що встановлені окремо в припливному і витяжному повітропроводах. Їх особливістю є наявність чотириходового перекидного вентиля, який змінює напрямок руху теплоносія, забезпечуючи транспортування тепла від витяжного до нагнітального потоку або навпаки залежно від сезону. При цьому повітропроводи можуть бути розташовані поза межами допустимої довжини охолоджувального контуру, а ізоляція потоків завдяки проміжному теплоносію виключає перенесення забрудненого повітря

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

між ними. Ефективність роботи теплової помпи визначається швидкістю потоку повітря і температурою на вході випаровувача та конденсатора. Зростання потоку та підвищення температури на вході у випаровувач забезпечують більшу продуктивність помпи, тоді як зменшення температури на вході в конденсатор сприяє подальшому зростанню продуктивності при мінімальному споживанні енергії. Найбільша економія помітна при наявності значного обсягу прихованого тепла у вивідному повітрі. Як запасний вибір може застосовуватися теплова камера. Вона складається з резервуару, поділеного на дві частини, які за допомогою комплексу вентилів послідовно заповнюються припливним та вивідним повітрям. Завдяки високій теплоємності споруди забезпечується результативна передача тепла між повітряними потоками. Цей метод відзначається значною дієвістю, але вимагає суттєвих початкових вкладень та малопродатний у випадках помітного забруднення вивідного повітря.

У рамках даної роботи на початкових етапах було розглянуто два варіанти схем вентиляційних систем для груп приміщень тренажерних залів. Один із запропонованих варіантів припливно-витяжної вентиляції передбачав використання рекуперативного теплообмінника. Після аналізу існуючих систем з рекуперацією тепла та пропозицій на ринку вентиляційного обладнання було обрано за прототип установку з рекуператором GOLD RX виробництва компанії Swegon (Швеція), яка має широку представленість на ринку. Застосований роторний рекуператор демонструє високий коефіцієнт корисної дії утилізації тепла — до 85% при рівних витратах повітря. Однак серед основних недоліків таких систем можна виділити:

- 1) значні першочергові капіталовкладення;
- 2) використання єдиної установки для припливної та витяжної вентиляції;
- 3) незначне змішування потоків повітря: припливних і витяжних.

Типову схему роботи установки GOLD RX можна побачити на представленому рисунку. 1.21 [18].

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ РЕКУПЕРАТИВНОЇ СИСТЕМИ

Рекуператор складається з теплообмінника, вентиляторів та фільтрів, які розташовані в одному корпусі. Основний елемент – це теплообмінник, де два потоки повітря (відпрацьоване та свіже) передають тепло одне одному без змішування, забезпечуючи енергозбереження. Вентилятори забезпечують циркуляцію повітря, а фільтри очищають його від пилу.

Теплообмінник, де відбувається обмін теплом між відпрацьованим і свіжим повітрям. Має пластинчасту форму, складається з тонких пластин, які розділяють потоки повітря, передаючи тепло через поверхню. Також є вентилятори, які забезпечують примусове переміщення повітряних потоків всередину та назовні приміщення. За необхідністю встановлюються фільтри для очищення як припливного, так і витяжного повітря від пилу та інших забруднень.

Автоматика та система керування дозволяє регулювати швидкість вентиляторів, налаштовувати режими роботи, а також може мати таймери або пульти дистанційного керування.

Серед різних способів рекуперації теплоти теплові труби виділяються найвищою компактністю.

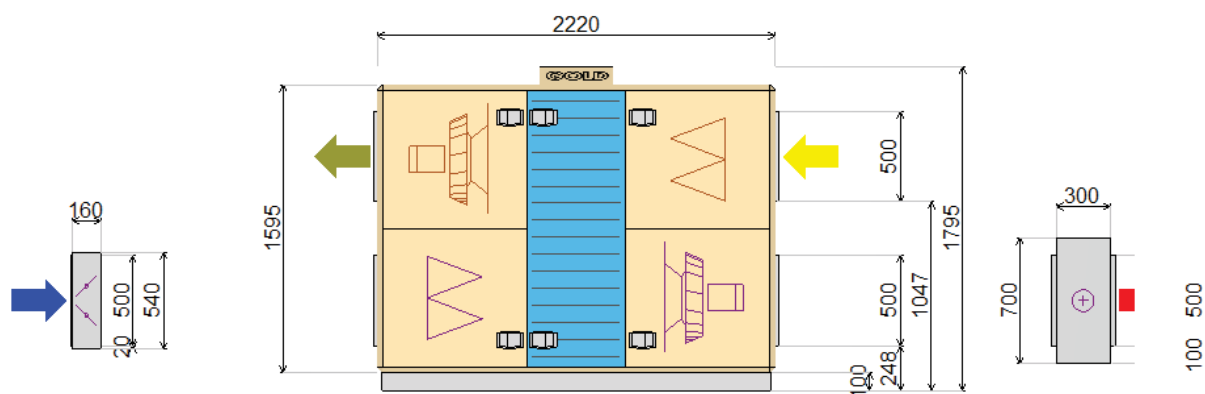


Рисунок 2.1 – Схема можливої припливно-витяжної системи з роторним теплообмінником

Принцип роботи зводиться до відведення повітря, коли вентилятор витягує тепле, відпрацьоване повітря з приміщення. При цьому нагрівання теплообмінника через яке проходить повітря, нагріваючи його поверхню.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Одночасно інший вентилятор забирає свіже холодне повітря з вулиці. Холодне повітря проходить через частину теплообмінника, що й відпрацьоване, і нагрівається від неї, не змішуючись з витяжним повітрям.

Тепле повітря з вулиці потрапляє в приміщення, зберігаючи значну частину тепла, що дозволяє економити на опаленні.

2.1 Опис алгоритму роботи системи рекуперації

Система припливно-витяжної вентиляції складається з двох незалежних каналів для подачі та видалення повітря, кожен із яких включає низку окремих компонентів, з'єднаних повітропроводами. До складу системи входять такі елементи: - Повітрозабірні решітки, які сприяють надходженню зовнішнього повітря в систему та захищають повітропроводи від потрапляння сторонніх предметів. - Повітряні клапани, що запобігають проникненню холодного повітря у разі вимикання системи. - Повітряні фільтри, які очищають зовнішнє повітря від домішок, таких як пил або комахи. - Вентилятори, призначені для забезпечення направлено переміщення повітряного потоку всередині повітропроводу. - Повітропроводи разом із фасонними складовими, які об'єднують усі компоненти в розподільну мережу. - Розподільники повітря, які забезпечують рівномірне розподілення свіжого повітря в приміщенні. - Електричний калорифер (ТЕН) для нагрівання припливного повітря до заданої температури. - Компресорно-конденсаторний блок (ККБ) із випарником для охолодження повітря в теплий період року. - Система автоматики, що регулює роботу окремих вузлів вентиляційної мережі та контролює її параметри. Ця вентиляційна система повинна забезпечувати управління як припливною, так і витяжною вентиляцією, зокрема роботою таких елементів: заслінками припливу та витяжки, вентиляторами припливу й витяжки, електричним нагрівачем і блоком ККБ.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Управління системою проводиться на основі аналізу ряду параметрів: температури припливного повітря, температури зовнішнього повітря, температури в приміщенні, стану заслінок (кінцевий вимикач), стану фільтрів припливного повітря, сигналу про пожежу від системи пожежної сигналізації, перепаду тиску на вентиляторах (за допомогою датчиків), стану нагрівача (термостат захисту), а також перепаду тиску на фільтрах. У шафі передбачено два способи запуску та зупинки системи: за допомогою кнопок «Пуск» та «Стоп» на дверцятах шафи або через панель оператора. Установка, що керується автоматичною шафою, функціонує в трьох основних режимах:

- «Черговий режим» – система вентиляції вимкнена, ведеться моніторинг аварій.

- «Робота» – підтримання параметрів повітря відповідно до заданих налаштувань, включаючи відкриття заслінок, запуск вентиляторів та інших елементів.

«Аварія» – перехід у цей режим відбувається при виникненні аварійної ситуації як із чергового режиму, так і з режиму «Робота». Стан «Аварія» сигналізується індикаторами на дверях шафи та на дистанційному пульті керування. Після усунення несправності або вручного скидання робота системи відновлюється.

При переході в режим «Робота» виконуються наступні процедури:

- Відкриваються повітряні заслінки.
- Після затримки запускаються вентилятори (контролюється часова затримка і сигнал від датчиків перепаду тиску, що підтверджує нормальну роботу).
- Виконується контроль температури калорифера на перегрів (через термостат захисту).
- Аналізуються дані з температурних датчиків, а також оцінюється їх працездатність.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

- Здійснюється управління калорифером і компресорно-конденсаторним блоком (ККБ).

За необхідністю, залежно від показників температури зовнішнього повітря, вмикається ТЕН калорифера. Одночасно з його запуском відкриваються заслінки припливного та витяжного повітря. Після цього вмикається припливний вентилятор і одночасно витяжний вентилятор. Управління калорифером проводиться ступінчасто. Спочатку активується перша ступінь нагріву, а далі – наступні щаблі в міру потреби. Якщо необхідно знизити температуру, регулювання здійснюється спершу за допомогою відключення першого ступеня. При експлуатації всі три ступені використовуються лише за дуже низьких температур (наприклад, під час найбільш холодних періодів зими), оскільки зазвичай їх використання буває надмірним. У разі перевищення заданої уставки температури припливного повітря перший щабель вимикається, а при її зниженні – вмикається знову. При досягненні граничних значень усі три щаблі активуються одночасно з можливістю подальшого коригування. У разі необхідності охолодження повітря в приміщенні, у роботу вступає компресорно-конденсаторний блок (ККБ). Цей вузол є частиною холодильного контуру роздільної системи кондиціонування, який забезпечує підготовку холодоагенту для передачі у випарник. У випарнику рідкий холодоагент поглинає тепло з повітря і випаровується, ефективно знижуючи температуру повітря. Структура ККБ включає вентилятор, компресор, конденсатор, регулятор потоку холодоагенту (ТРВ/електронний ТРВ) і контролер управління або шафу автоматизації. Додатково можуть замовляти/ Він автоматично включається й вимикається при досягненні визначених температурних показників. Під час запуску компресор піддається підвищеним навантаженням, як результат, це призводить до нагрівання обмотки двигуна. У конструкціях ККБ застосовуються герметичні компресори, охолодження двигунів яких здійснюється за допомогою парів холодоагенту. Для зниження пікової температури необхідний певний час циркуляції холодоагенту, який може відводити лише обмежену кількість теплової енергії. Відповідно

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

цьому виробники рекомендують обмежити кількість циклів вмикання та вимикання до 4-8 разів на годину [3].

Для завершення роботи установки необхідно натиснути кнопку Стоп, яка розташована на дверцятах шафи або панелі оператора. Після цього система автоматично переходить у черговий режим. Якщо під час роботи був увімкнений електронагрівач, перехід у черговий режим повинен супроводжуватися продуванням. У процесі продування нагрівач відключається від живлення, але вентилятор залишається увімкненим деякий час, щоб охолодити калорифер. Лише після завершення охолодження вентилятор вимикається. Недотримання цього порядку дій може привести до виходу з ладу ТЕНу нагрівача. Аналогічний алгоритм застосовується при спрацьовуванні захисту від перегріву: спочатку вимикається сама функція нагрівання, потім запускається вентиляція калорифера, і тільки після цього вентилятор відключається. Якщо ж нагрівач не був активований під час роботи, продувка не потрібна – вентилятори та охолоджувальний компресорно-конденсаторний блок (ККБ) вимикаються, після чого закриваються повітряні заслінки. Система підтримує два режими управління: автоматичний і ручний. У автоматичному режимі температура повітря регулюється автоматично відповідно до заданих параметрів. Нагрівач або охолоджувач вмикаються залежно від показників температурних датчиків. Нагрівач активується при температурі зовнішнього повітря біля 19 °С. Охолоджувач починає працювати, коли температура у приміщенні досягає 24 °С, і вимикається, коли приміщення охолоджується до 20 °С. Ці температурні уставки відповідають нормативам, але можуть бути змінені за потреби. Важливо враховувати, що занадто часті цикли ввімкнення та вимкнення ККБ небажані, особливо у теплу пору року. Це слід брати до уваги під час налаштування температурних параметрів. У ручному режимі можна управляти кожним елементом системи окремо. Наприклад, можливо вибірково відкрити лише припливну заслінку або увімкнути тільки припливний вентилятор, залишаючи інші компоненти, такі як витяжний вентилятор чи заслінки, неактивними. Також

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

система дозволяє запускати або зупиняти роботу вручну, використовуючи кнопки «Пуск» і «Стоп» на щиті управління.

2.2 Розробка математичної моделі рекуператора

У ситуаціях, коли за допомогою випарника (прямого, непрямого чи їх комбінації) неможливо досягти заданих параметрів повітря, або якщо відхилення цих параметрів у процесі роботи системи перевищують допустимі значення, застосовують метод обробки припливного повітря з використанням зовнішніх джерел холоду. Таким джерелом може бути, наприклад, холодна вода низької температури (звичайно до 6°C), яка отримується від систем холодопостачання. Це також доцільно в умовах сильного запилення або загазованості, коли використання рециркуляційного повітря не дозволяється чи не є необхідним. У таких випадках мінімально потрібний обсяг зовнішнього повітря перевищує витрату припливного повітря, необхідного для видалення всіх надлишків тепла з приміщення. Рекуператори при цьому працюють виключно на подачу зовнішнього повітря. Основні моделі наведені на аркуші МРМА 25.00.00.000 РР1. є на I-d- діаграмі, це розрахункові параметри зовнішнього повітря в теплий період - $\varphi_{\text{н}}$ і $t_{\text{н}}$, задані параметри внутрішнього повітря $\varphi_{\text{в}}$ и $t_{\text{в}}$, величина кутового коефіцієнта променя процесу обробки повітря в приміщенні $\varepsilon_{\text{п}}$, обчислена на підставі відомих кількостей тепла і вологи, що виділяються в приміщенні.

На рисунку 2.2 представлена принципова схема прямооточної системи кондиціонування повітря. Згідно з цією схемою, зовнішнє повітря в обсязі G_0 надходить у зрошувальну камеру, де розпилюється охолоджена вода, температура якої нижча за температуру точки роси. У процесі контакту повітря з краплями води відбувається його охолодження та осушення. На виході із зрошувальної камери повітря досягає відносної вологості насичення, зазвичай на рівні $\varphi \approx 95\%$. Оскільки температура такого повітря виявляється нижчою за

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

потрібну температуру припливного повітря, після проходження через зрошувальну камеру воно спрямовується в калорифер другого підігріву . [9].

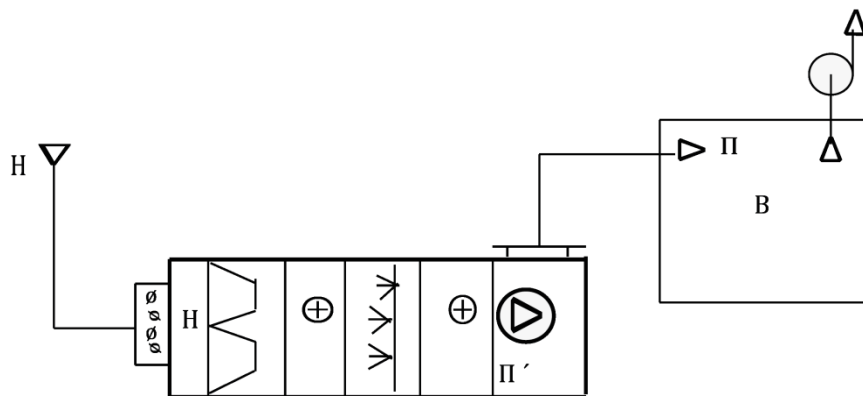


Рисунок 2.2 - Схема нагрівання повітря при прямоточній системі

У калорифері повітря нагрівається до заданої температури, що визначається на виході з рекуператора. Як правило, ця температура планується на $1-1,5^{\circ}\text{C}$ нижче за необхідну температуру припливного повітря. Це пояснюється тим, що повітря під час проходження від рекуператора до приміщення додатково нагрівається через перетворення механічної енергії у теплову енергію у вентиляторі, а також завдяки теплопередачі через стінки повітропроводу. Останній часто знаходиться у приміщеннях, де температура перевищує температуру припливного повітря, яке циркулює каналами. Вихідні дані використовуються для розрахунків і побудови процесу кондиціонування повітря. [17].

Послідовність виконання процесів обробки повітря на I-d-діаграмі вологого повітря:

- 1) Визначаємо на I-d-діаграмі розташування точок Н і В, які відповідають параметрам зовнішнього та внутрішнього повітря;
- 2) Через точку В проводимо лінію, що описує процес обробки повітря в приміщенні, враховуючи величину кутового коефіцієнта ϵ ;

3) Знаходимо параметри припливного повітря, для чого визначаємо його температуру.

Основними даними для побудови процесу кондиціонування повітря є:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{в}} - \Delta t_{\text{доп}}, \quad (2.1)$$

де $\Delta t_{\text{доп}}$ - Допустима різниця температур між припливним і внутрішнім повітрям визначається залежно від методу подачі та видалення повітря в приміщенні. Для розрахунку повітрообміну приймається [9] при подачі повітря

- безпосередньо в робочу зону $\Delta t_{\text{доп}}=2^{\circ}\text{C}$;
- на висоту 2,5 м і вище $\Delta t_{\text{доп}}=(4-6)^{\circ}\text{C}$;
- на висоту більше 4м від полу $\Delta t_{\text{доп}}=(6-9)^{\circ}\text{C}$;
- повітророзподільниками (плафонами) $\Delta t_{\text{доп}}=(8-15)^{\circ}\text{C}$.

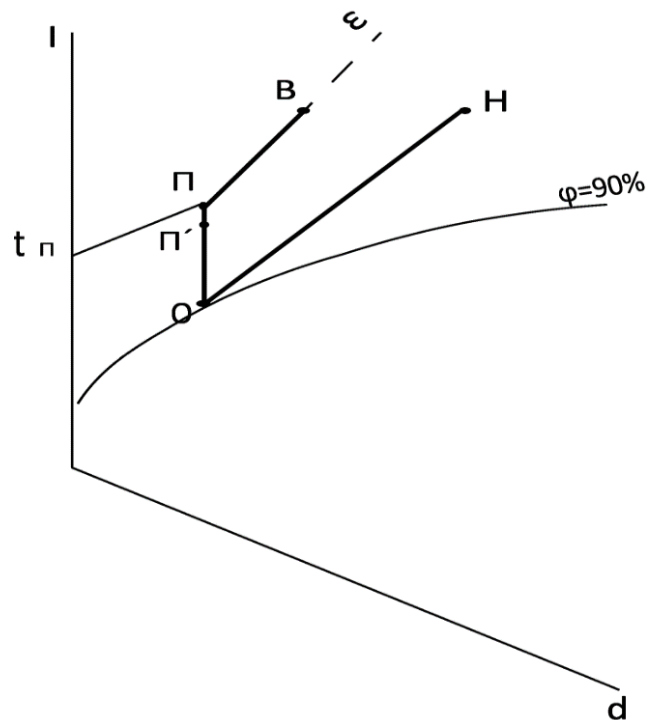


Рисунок 2.3 - Схема процесів обробки повітря в прямоточній системі рекуперації повітря для теплого періоду

Побудова процесів обробки повітря в прямоточній системі опалення та кондиціонування повітря для теплого періоду включає кілька етапів: Спершу проводиться ізотерма $t_{\text{п}}$ до перетину з променем процесу ε у точці П. Це дозволяє визначити інші параметри припливного повітря. Після цього точка В з'єднується з точкою П, і отриманий відрізок ПВ дає змогу оцінити асиміляцію теплоти та вологи повітрям у приміщенні. Далі, від точки П униз по лінії $d = \text{const}$ проводять лінію до перетину з $\phi=90\%$, в результаті чого ставлять точку О. Відрізок ПО показує вплив на нагрівання повітря в системі. На наступному етапі, вздовж лінії ПО, відкладають вниз відрізок, що відповідає 1°C , і позначають точку П'. Цей відрізок ПП характеризує нагрів припливного повітря в повітроводах та вентиляторі. Тим часом відрізок ОП свідчить про обігрів повітря у повітронагрівачі другого підігріву. Потім точка П з'єднується з точкою Н, утворюючи відрізок НО, який описує процес осушення та охолодження повітря у камері рекуператора. На завершення визначається потреба у витраті припливного повітря. Це здійснюється шляхом аналізу побудованих процесів на I-d-діаграмі вологого повітря з урахуванням умови видалення повної теплоти:

$$G = \frac{3,6Q_6^{\text{ТП}}}{I_{\text{В}} - I_{\text{П}}}; \quad (2.2)$$

- для видалення надлишкової вологи використаємо рівняння:

$$G = \frac{W}{d_{\text{В}} - d_{\text{П}}}; \quad (2.3)$$

де G - витрата припливного повітря, кг/г;

$Q_{\text{ізб}}^{\text{ТП}}$ - кількість теплоти, що виділяється у приміщенні (в теплий період),

Вт;

$I_{\text{В}}, I_{\text{П}}$ - ентальпія внутрішнього і припливного повітря відповідно;

W - кількість вологи, що виділяється у приміщенні;

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

d_B, d_{II} - вологовміст внутрішнього і припливного повітря відповідно.

Витрата тепла на нагрівання повітря в повітронагрівачі (калорифер другого підігріву) визначають за таким рівнянням:

$$Q_{II} = G(I_{II'} - I_0); \quad (2.4)$$

де Q_{II} - витрата тепла через повітронагрівач;

$I_{II'}, I_0$ - ентальпія повітря на виході і вході в рекуператор.

Охолоджуючу потужність рекуператора визначають з рівняння:

$$Q_{охл} = G(I_H - I_0), \quad (2.5)$$

де $Q_{охл}$ - охолоджуюча потужність,

I_H, I_0 - ентальпія повітря на вході і виході.

Розглянемо функціонування прямоточної системи рекуперації у холодний період [3, 17]. У цій системі зовнішнє повітря спочатку нагрівається в повітронагрівачі, після чого потрапляє до зрошувальної камери, де відбувається процес адіабатичного зволоження. Далі повітря знову проходить через повітронагрівач перед подачею в приміщення. Схематичне зображення процесу обробки повітря в прямоточній системі рекуперації для холодного періоду наведено на рисунку 2.4. Для побудови процесів обробки повітря за даною схемою необхідними вихідними даними є: параметри внутрішнього та зовнішнього повітря, значення кутового коефіцієнта ϵ для холодного періоду, а також витрата повітря, розрахована для теплого періоду. Алгоритм побудови процесів обробки повітря на I-d діаграмі вологого повітря включає наступні етапи: 1) Визначення положення точок на I-d діаграмі: точка Н відповідає параметрам зовнішнього повітря, а точка В — параметрам внутрішнього повітря;

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

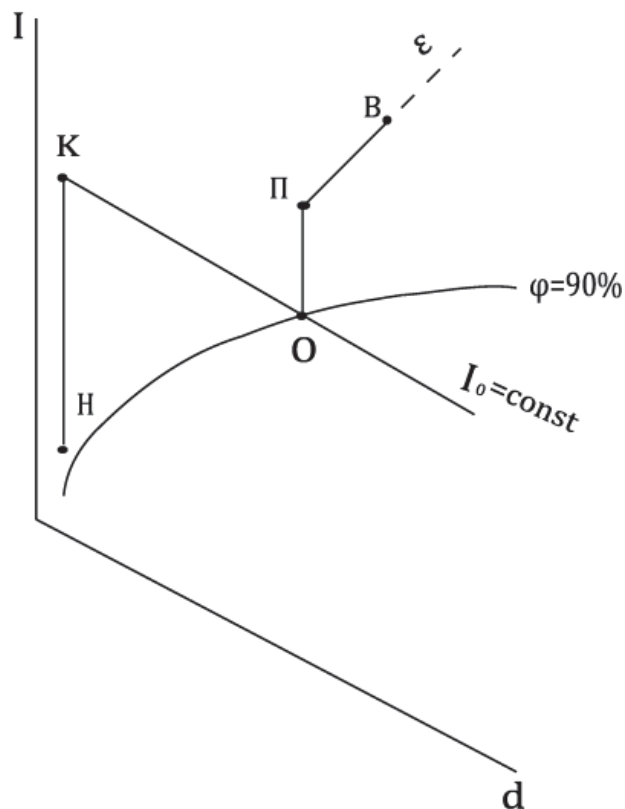


Рисунок 2.4 – Схема побудови процесів рекуперації повітря для холодного періоду

2) проводимо через точку В проводимо ϵ приміщення для холодного періоду;

3) визначаємо положення точки П, для цього розраховуємо вологовміст $d_{\text{П}}$:

$$d_{\text{П}} = d_{\text{В}} - \frac{W}{G} \cdot 10^3, \quad (2.6)$$

де W - вологовиділення в приміщенні в холодний період, кг/г;

G - витрата повітря, розрахований в теплий період, кг/г;

$d_{\text{П}}, d_{\text{В}}$ - вологовміст відповідно припливного і внутрішнього повітря, г/кг.

Проводимо лінію $d_{\text{П}} = \text{const}$ вологовмісткість відповідно припливного і внутрішнього повітря до перетину з променем процесу ϵ і ставимо крапку П. Для уточнення розрахунків визначаємо ентальпію точки П з рівняння

$$I_{\Pi} = I_B - \frac{3,6 \cdot Q}{G}, \quad (2.7)$$

де Q - надлишкові тепловиділення в холодні період, Вт;

I_{Π}, I_B - ентальпія відповідно припливного і внутрішнього повітря, кДж/кг;

4) проводимо лінію $d_{\Pi} = const$ до перетину с $\varphi = 90\%$, ставимо крапку О, отримуємо відрізок ПО;

5) через точку ПО проводимо лінію $I_O = const$ до перетину з лінією $d_H = const$ в точці К.

Отримуємо наступні відрізки: НК - нагрівання повітря в повітронагрівачі, КО - адіабатичне зволоження повітря в зрошувальній камері, ОП - нагрівання повітря в повітронагрівачі, ПВ - характеризує асиміляцію теплоти і вологи повітрям в приміщенні.

Витрата тепла на нагрівання повітря в повітронагрівачі визначають за рівнянням:

$$Q_I = G(I_K - I_H). \quad (2.8)$$

Витрати тепла на нагрівання повітря в повітронагрівачі визначають за рівнянням:

$$Q_{II} = G(I_{\Pi} - I_O); \quad (2.9)$$

де Q_I - витрата тепла через повітронагрівач;

I_K, I_H - ентальпія повітря на виході і вході в повітронагрівач;

Q_{II} - витрата тепла через повітронагрівач;

I_{Π}, I_O - ентальпія повітря на виході і вході в повітронагрівач.

На рисунку 2.5 представлено принципову схему системи опалення та кондиціонування повітря з використанням першої рециркуляції [17, 18]. Головна відмінність від прямої системи кондиціонування полягає у наявності

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

каналу, що забезпечує рециркуляцію повітря. У цьому випадку рециркуляційне повітря може змішуватися із зовнішнім або перед повітрянагрівачем першого ступеня, або після нього. Водночас ця особливість не має впливу на реалізацію процесу кондиціонування повітря в теплий період.

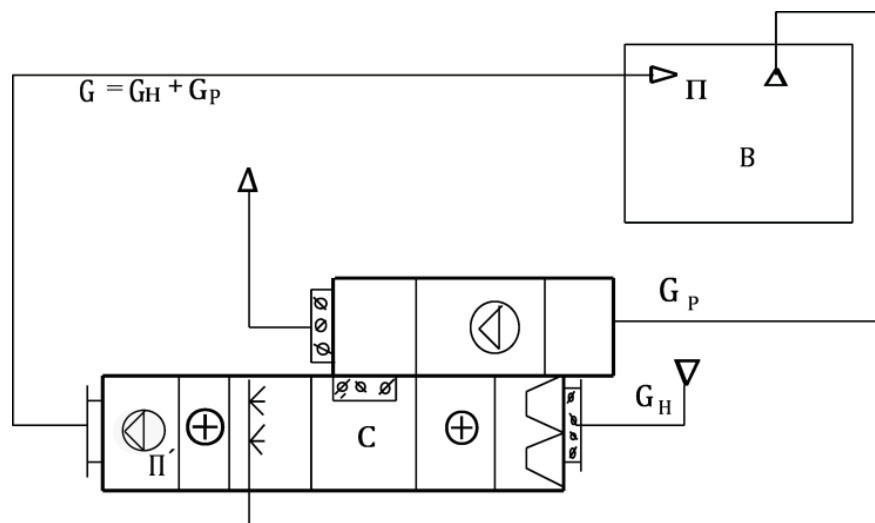


Рисунок 2.5 - Принципова схема опалення і кондиціонування повітря з першою рециркуляцією

При організації процесу кондиціонування повітря з використанням рециркуляції необхідно враховувати схему повітрообміну в приміщенні. Це включає розміщення пристроїв для подачі та видалення повітря, а також визначення точок забору повітря, яке буде направлятися на рециркуляцію. Виходячи з обраної схеми повітрообміну, встановлюються параметри припливного, відпрацьованого та рециркуляційного повітря. Наприклад, якщо використовується схема повітрообміну знизу вгору і забір рециркуляційного повітря здійснюється з верхньої зони, то його характеристики відповідатимуть параметрам відпрацьованого повітря. У випадку подачі повітря за схемою "зверху вниз" параметри рециркуляційного повітря будуть аналогічні параметрам внутрішнього повітря. При заборі рециркуляційного повітря з робочої зони його показники також співпадатимуть із параметрами внутрішнього повітря. Модель процесу представлена на схемі. МРМА 25.00.00.000 РР2.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Розглянемо принцип організації процесів обробки повітря в системі кондиціонування з рециркуляцією, призначеній для теплого сезону. Схема обробки повітря наведена на рис.2.65.

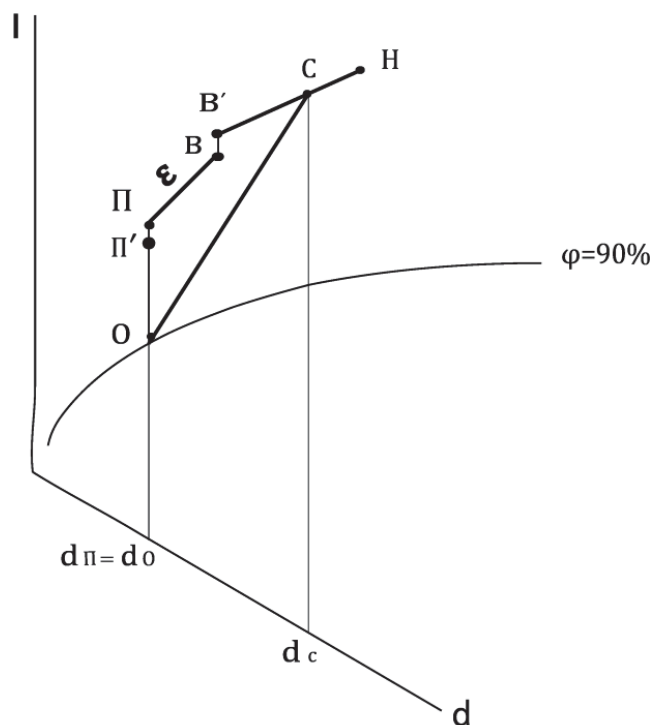


Рисунок 2.6 – Схема процесу обробки повітря в рецеperatorі в теплий період

Побудова процесу обробки повітря в системах рекуперації з рециркуляцією в теплий період року базується на конкретних вихідних даних. Це параметри зовнішнього повітря у теплий сезон φ_H і t_H , задані параметри внутрішнього повітря φ_B і t_B , а також кутовий коефіцієнт променя процесу обробки ε_{Π}). Цей коефіцієнт розраховують, враховуючи кількість тепла і вологи, які виділяються у приміщенні. Додатково важливими параметрами є мінімальна кількість зовнішнього повітря G_H , та допустима різниця температур між внутрішнім і припливним повітрям $\Delta t_{доп}$. Послідовність побудови процесу обробки повітря на I-d-діаграмі вологого повітря складається з таких кроків:

1) Визначення на I-d-діаграмі положень точок Н (що характеризує параметри зовнішнього повітря) і В (що відповідає параметрам внутрішнього повітря).

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

2) Проведення променя процесу обробки повітря через точку В з урахуванням визначеного кутового коефіцієнта ε .

3) Визначення характеристик припливного повітря. Для цього необхідно розрахувати температуру припливного повітря, що перебуває в межах допустимих параметрів.

$$t_{\Pi} = t_{B} - \Delta t_{\text{доп}}, \quad 7 \quad (2.10)$$

де $\Delta t_{\text{доп}}$ - Допустима різниця температур між припливним і внутрішнім повітрям залежить від способу організації подачі та видалення повітря в приміщенні. На графіку проводиться ізотерма температури припливного повітря до перетину з променем процесу ε у точці П, після чого визначаються інші параметри припливного потоку. З'єднуючи точки В та П, отримуємо відрізок ПВ, який характеризує процес асиміляції теплоти та вологи в повітрі приміщення. Розрахунок витрат припливного повітря здійснюється на основі побудови процесів на I-d діаграмі вологого повітря, враховуючи умову відведення повної кількості теплоти.

$$G = \frac{3,6Q_{\text{изб}}^{\text{ТП}}}{I_{B} - I_{\Pi}}; \quad (2.11)$$

- для видалення надлишкової вологи

$$G = \frac{W}{d_{B} - d_{\Pi}}; \quad (2.12)$$

де G - витрата припливного повітря, кг/ч;

$Q_{\text{изб}}^{\text{ТП}}$ - кількість теплоти, що виділяє в приміщенні в теплий період, Вт;

I_{B}, I_{Π} - ентальпія відповідно внутрішнього і припливного повітря;

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

W – кількість вологи, що виділяється в приміщенні;

d_B, d_{II} - ологовміст регулюється відповідно до параметрів внутрішнього та припливного повітря.

4) Від точки II вниз по лінії при сталій величині $d = const$ прокладаємо лінію до перетину з рівнем відносної вологості $\phi = 90\% - 95\%$. У місці перетину ставимо точку O, формуючи відрізок PO.

5) Від точки II уздовж лінії PO відкладаємо вниз відрізок у 10 градусів за Цельсієм і позначаємо точку II'. Даний відрізок III' символізує нагрів припливного повітря у повітроводах і вентиляторі, тоді як відрізок OII' характеризує підігрів повітря в повітронагрівачі другого етапу підігріву.

6) Від точки B проводимо лінію при сталому значенні $d_B = const$ та відкладаємо відрізок вгору на $0,5^{\circ}C$, отримуючи точку B'. Відрізок BB' демонструє процес підігріву повітря в рециркуляційному повітроводі та вентиляторі.

7) Визначаємо положення точки суміші C, що відповідає параметрам повітря після змішування рециркуляційного та зовнішнього повітря. З'єднуємо точки B' та H, утворюючи відрізок B'H, який описує процес змішування. Позиція точки C визначається за допомогою відповідного рівняння

$$d_c = d_{B'} + \frac{G_H}{G} \cdot (d_H - d_{B'}). \quad (2.13)$$

Проводимо лінію $d_c = const$ до перетину з лінією B'H та отримуємо точку C.

8) Визначаємо витрата рециркуляційного повітря G_p з рівняння:

$$G_p = G - G_H. \quad (2.14)$$

9) Точку C та O з'єднуємо прямою. Отриманий відрізок CO характеризує політропний процес обробки їх повітря в зрошувальній камері.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрата тепла на нагрівання повітря в повітронагрівачі другого ступеня (калорифер другого підігріву) визначають за рівнянням:

$$Q_{II} = G(I_{II'} - I_0); \quad (2.15)$$

де Q_{II} - витрата тепла через теплообмінник рекуператора.

$I_{II'}$, I_0 - ентальпія повітря на виході і вході в теплообмінник.

Охолоджуючу потужність теплообмінника визначають за рівнянням:

$$Q_{охл} = G(I_C - I_0), \quad (2.16)$$

де $Q_{охл}$ – охолоджуюча потужність теплообмінника,

I_H , I_C - ентальпія повітря на вході і виході з теплообмінника.

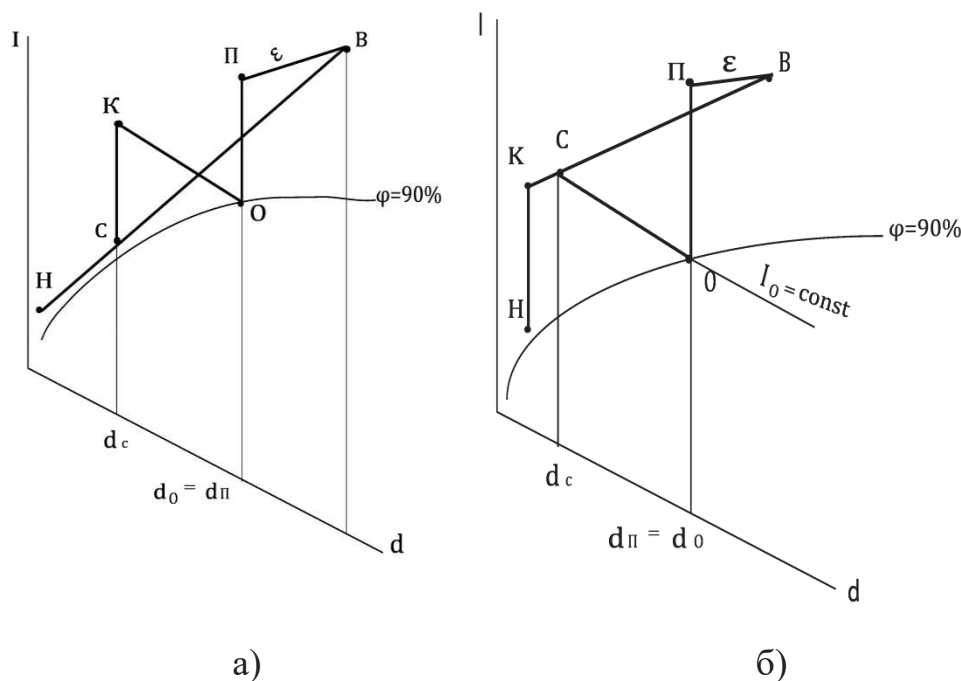
Розглянемо рециркуляцію для холодного періоду. Для неї можливі два варіанти:

Перший варіант передбачає змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря до входу у повітронагрівач першого ступеня (рис. 2.7, а). Другий варіант реалізується через змішування зовнішнього і рециркуляційного повітря після проходження повітронагрівача першого ступеня (рис. 2.7, б). Для виконання розрахунків і побудови процесів обробки повітря за цією схемою використовуються такі вихідні дані: характеристики зовнішнього та внутрішнього повітря, значення кутового коефіцієнта ε для холодного періоду, а також витрати повітря, визначені для теплого періоду. Алгоритм побудови процесів обробки повітря на I-d діаграмі вологого повітря включає наступні кроки:

1) Визначення позицій на I-d діаграмі для точки Н, яка характеризує параметри зовнішнього повітря, і точки В, що відповідає параметрам внутрішнього повітря.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

2) Проведення через точку В лінії, яка відповідає кутовому коефіцієнту ε для умов холодного періоду.



а) Змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря виконується до першого ступеня повітрянагрівача. б) Змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря виконується після першого ступеня повітрянагрівача.

Рисунок 2.7 - Схема процесів обробки повітря в рекуператорі з рециркуляцією у холодний період

Для визначення положення точки П необхідно розрахувати вологовміст. d_{Π} за формулою:

$$d_{\Pi} = d_B - \frac{W}{G} \cdot 10^3, \quad (2.17)$$

де W - вологовиділення в приміщенні в холодний період, кг/ч;

G – витрата повітря, розрахований в теплий період, кг/ч;

d_{Π} , d_B - вологовміст відповідно припливного і внутрішнього повітря, г/кг.

$$d_c = d_B - \frac{G_H}{G} \cdot (d_B - d_H). \quad (2.18)$$

Точки Н і В з'єднані прямою лінією. Точка С розташована на цій лінії НВ, що відповідає процесу змішування рециркуляційного і зовнішнього повітря. Від точки С проводиться лінія $d_C = \text{const}$ до її перетину з лінією НВ, де зазначається точка С. Через точку О проводиться лінія $I_O = \text{const}$ до її перетину з лінією $d_C = \text{const}$ у точці К, що характеризує стан повітря на виході з повітрянагрівача першого ступеня нагріву. Отже, ділянка НВ відповідає процесу змішування зовнішнього й рециркуляційного повітря, сегмент СК зображає нагрівання в повітрянагрівачі першого підігріву, КО демонструє адіабатне зволоження повітря в зрошувальній камері, ПО відображає нагрівання в повітрянагрівачі другого ступеня, а ПВ показує процес зміни стану повітря в приміщенні. Кількість тепла, необхідного для нагрівання повітря в повітрянагрівачі (калорифері першого підігріву), визначається за відповідним рівнянням.

$$Q_I = G(I_K - I_C); \quad (2.19)$$

Витрати тепла на нагрівання повітря в повітрянагрівачі (у калорифері другого ступеня підігріву) визначаються за допомогою рівняння:

$$Q_{II} = G(I_{II} - I_O); \quad (2.20)$$

де Q_I - витрата тепла через повітрянагрівач;

I_K, I_C - ентальпія повітря на виході та вході до повітрянагрівача;

Q_{II} - витрата тепла через повітрянагрівач системи;

I_{II}, I_O - ентальпія повітря на виході та вході до повітрянагрівача).

Розглядаємо другий варіант, де зовнішнє і рециркуляційне повітря змішується після проходження через повітрянагрівач першого ступеня підігріву. Аналогічно визначають положення точок Н, В, П, О (пункти 1–4). Для визначення положення точки суміші С необхідно обчислити вологовміст цієї точки за рівнянням:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_c = d_B - \frac{G}{G_H} \cdot (d_B - d_H). \quad (2.21)$$

Проводимо лінію $d_c = \text{const}$ до перетину з лінією $I_o = \text{const}$ та отримуємо точку С, яка характеризує стан повітря після змішування зовнішнього повітря, що було нагріте у повітрянагрівачі першого ступеня, зі спільним повітрям із приміщення. З'єднуємо точки С і В, продовжуючи до перетину з лінією $d_H = \text{const}$ у результаті отримуємо точку К, яка характеризує параметри зовнішнього повітря на виході з повітрянагрівача першого ступеня. Точки Н і К також з'єднуємо.

Таким чином: НК описує процес нагрівання зовнішнього повітря у повітрянагрівачі першого ступеня; - KB відображає процес змішування зовнішнього й рециркуляційного повітря у камері змішування; CO представляє адіабатне зволоження повітря у зрошувальній камері; ПО характеризує нагрівання у другому ступені повітрянагрівача; - ПВ показує зміну стану повітря в приміщенні.

Витрати тепла на процес нагрівання у повітрянагрівачах розраховуються наступним чином. Для першого ступеня:

$$Q_I = G(I_K - I_H); \quad (2.22)$$

Для другого ступеня:

$$Q_{II} = G(I_{II} - I_o); \quad (2.23)$$

Де Q_I - витрати тепла в першому ступені нагріву;

I_K, I_H - ентальпія повітря на виході та вході до першого ступеня нагріву;

Q_{II} - витрати тепла в другому ступені нагріву

I_{II}, I_o - ентальпія повітря на виході та вході до другого ступеня нагріву.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункові параметри зовнішнього повітря. Характеристики зовнішнього повітря, на які здійснюються всі обчислення при проектуванні кондиціонування, зветься проектними параметрами зовнішнього повітря. Головними проектними характеристиками зовнішнього повітря, що вказуються в СНиП, є тепло, ентальпія та швидкість зовнішнього повітря. Зовнішні характеристики задаються для трьох проміжків: холодного, міжсезонного та теплого [12].

Міжсезонний проміжок є певним розрахунковим граничним станом повітря поміж теплим і холодним проміжком. За проектні характеристики проміжку беруть температуру 8 °С та ентальпію 22,5 кДж/кг. середньодобова температура 8 °С обрана у якості розрахункової для міжсезонного не випадково, вона відповідає моменту відключення установок опалення громадських споруд (виробничі споруди часто відключаються і раніше з метою економії теплової енергії) і переведення систем тепlopостачання на літній режим.

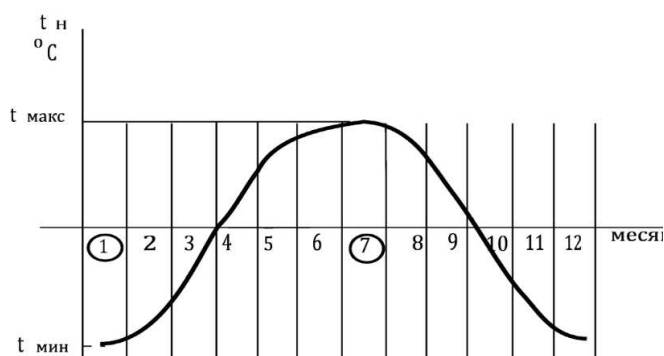
Характеристики зовнішнього повітря постійно змінюються та залежать від регіону спорудження та пори року. Але усі обчислення можна проводити лише з використанням абсолютно визначених значень характеристик повітря. Тому постає питання, а які саме значення характеристик слід брати у якості проектних. Вирішення цього питання залежить у першу чергу від рівня запитів, що висувуються до всієї будівлі та до її систем надання мікроклімату.

Принципові методи до визначення проектних характеристик розглянемо на прикладі температури [11].

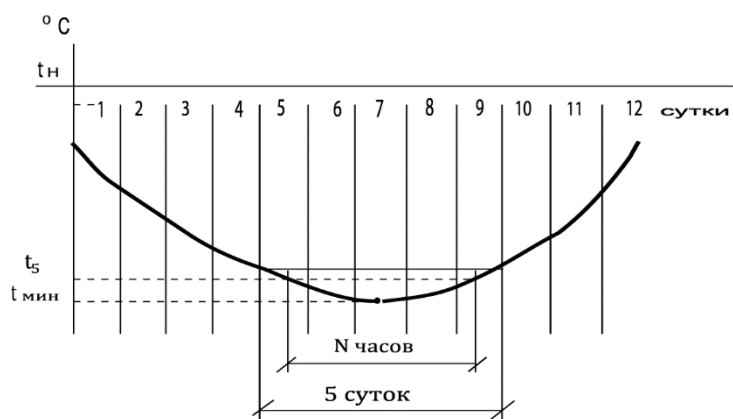
Температура зовнішнього повітря змінюється невинно. Існують добові коливання, місячну зміну та річний цикл. Щодо зовнішнього клімату можна говорити лише про деякі усереднені його показники, оскільки навіть в одній і тій же місцевості клімат одного року може суттєво відрізнитися від попереднього. Недарма кажуть, що в такий-то рік зима чи літо були холодними чи, навпаки, теплими.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

У середньому можна гадати, що протягом року температура змінюється приблизно за гармонійним законом. Найтихішим місяцем зазвичай є січень, а найтеплішим - липень. У певний момент у січні, середньодобова температура зовнішнього повітря сягає свого найменшого значення за рік, а у липні - найбільшого. Якщо прийняти за проектну температуру для кожного з проміжків саме ці значення, то потужність обладнання систем надання мікроклімату вийде найбільшою, тобто граничною. Зрозуміло, що система при цьому виявиться дорожчою. При цьому практично весь проектний проміжок системи надання мікроклімату працюватиме в режимі зниженої потужності.



а) графік річних змін середньодобової температури;



б) графік розрахункової температури у холодний період.

Рисунок 2.8 - До поняття розрахункової температури зовнішнього повітря

Якщо ж взяти для холодного проміжку вищі значення температури, а для теплого проміжку - нижчі, то певний відрізок часу система не зможе забезпечувати проектні характеристики повітря у приміщенні. Ступінь

забезпечення характеризується коефіцієнтом забезпеченості. значення $K_{об} = 0,7$ означає, що 70% тривалості проектного проміжку, система зможе забезпечувати потрібний рівень характеристик у приміщенні, а 30% часу характеристики будуть не відповідати заданим. Цих 30% часу, потужності системи (холодильної в теплий проміжок, нагрівальної - в холодний) не стане для підтримки заданого значення внутрішньої температури. Однак при цьому витрати на систему виявляться суттєво меншими.

При виборі проектного коефіцієнта забезпеченості враховують проміжок року та рівень запитів до споруди. Для деяких виробничих споруд із системи слід проектуватися на граничні характеристики зовнішнього клімату (підприємства електроніки, точної механіки та оптики, фармацевтичні підприємства та ін.) Для більшості споруд звичайного призначення за проектну температуру ХП приймають температуру холодної п'ятиденки (характеристики Б). Це приблизно відповідає коефіцієнту забезпеченості 98%, при цьому тривалість відхилення характеристик від проектних складе приблизно 50 годин.

2.3 Вибір технічних засобів автоматизації

Одними з ключових елементів системи рекуперації є вентилятори, тому розпочнемо з їх вибору. Для підбору припливного та витяжного вентилятора необхідно враховувати об'єм повітря, що циркулює у приміщенні, вимірюваний у м³/год. Згідно з нормами, продуктивність вентиляційної системи повинна забезпечувати не менше п'яти обсягів обслуговуваного приміщення за годину. Таким чином, потрібна витрата повітря має становити не менше 1000 м³/год. При підборі вентиляційного обладнання необхідно враховувати певний запас продуктивності, оскільки в системах повітропроводів та на установленому обладнанні виникають втрати тиску, що знижують повітрообмін. В даній роботі ці втрати тиску умовно ігноруються, тож передбачається, що номінальна потужність вентилятора не зміниться. Деталізовані розрахунки втрат тиску не

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

виконуються. Однак, при реальному проектуванні та закупівлі обладнання такий спрощений підхід є недоцільним, адже він може викликати некоректну роботу системи чи навіть вихід обладнання з ладу. У даному випадку доцільно використовувати вентилятор діаметром 300 мм. Це модель вентилятора для прямокутних каналів розміром 600×300 мм із продуктивністю 1000 м³/год. Інші вентилятори, що передбачені для каналів із меншою площею перерізу, мають недостатню продуктивність для забезпечення необхідного повітрообміну. Таким чином, застосування повітропроводу саме такого перетину є оптимальним. До того ж, для забезпечення необхідних параметрів нагріву та охолодження складно підібрати допоміжне обладнання (нагрівачі та охолоджувачі), пристосоване до каналів меншого перерізу. Вентилятор представлений на рисунку 2.9. Ця модель може бути використана як припливний вентилятор або витяжний. Оскільки продуктивність припливного і витяжного вентиляторів повинна бути однаковою, обирається однакова модель вентилятора для обох видів вентиляції.

Далі виберемо необхідний електропривод, в основі якого буде електродвигун змінного струму на 230 В.

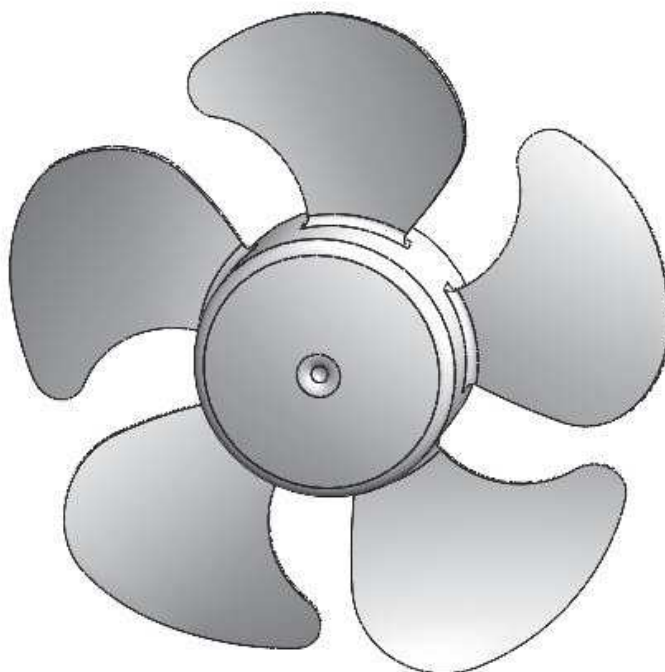


Рисунок 2.9 – Модель вентилятора

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Для розрахунків двигуна вентилятора можна використати рівняння:

$$P_{ed} = K_3 \frac{Q \cdot H}{\partial_{ven} \cdot \partial_{per}} \cdot 10^{-3} \quad (2.24)$$

де Q - продуктивність вентилятора, м³/с (1000 м³/год = 0.278 м³/с);

H – тиск повітря, Па, Беремо 600 Па.

∂_{ven} – ККД вентилятора,

∂_{per} – коефіцієнт передачі = 1, тобто безпосередня,

K_3 = коефіцієнт запасу = 1,5.

$$P_{ed} = 1.5 \frac{0.278 \cdot 600}{0.7 \cdot 1} \cdot 10^{-3} = 0,36 \text{ кВт.}$$

Обираємо двигун: однофазний електродвигун ML7124 0,37кВт 1500об/хв [11]. Основні параметри представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Параметри електродвигуна приводу системи [11].

Основні технічні характеристики	
Потужність	0,37 кВт
Частота обертання ротора	1500 об/хв
Номінальний струм	4,03 А
Напруга мережі	220 В
Частота мережі	50 Гц
Число полюсів	4
Ступінь захисту	IP55
Ізоляція класу нагрівостійкості	F(155°C)
Кліматичне виконання	У2, У3
Режим роботи	S1 (тривалий)
Спосіб монтажу	ІМ 1081(лапа)
Вага	10,9 кг

Модель двигуна показана на рис.2.10.

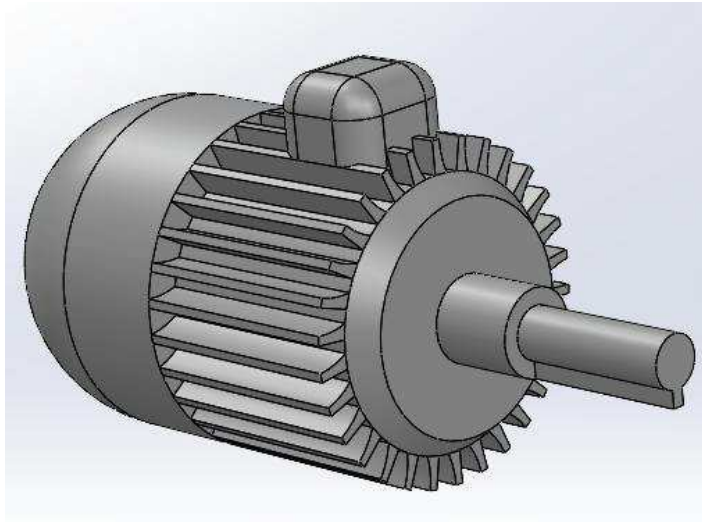


Рисунок 2.10 – Модель електродвигуна

2.4 Розробка моделі рекупераційної установки

Розробимо модель рекупераційної установки, що розташована на даху. Спочатку розробимо теплообмінник рекуператора. Використаємо моделювання у SolidWorks. Розробимо теплообмінник з габаритами 500X300 мм для рекуператора. Результат показано на рис.2.11.

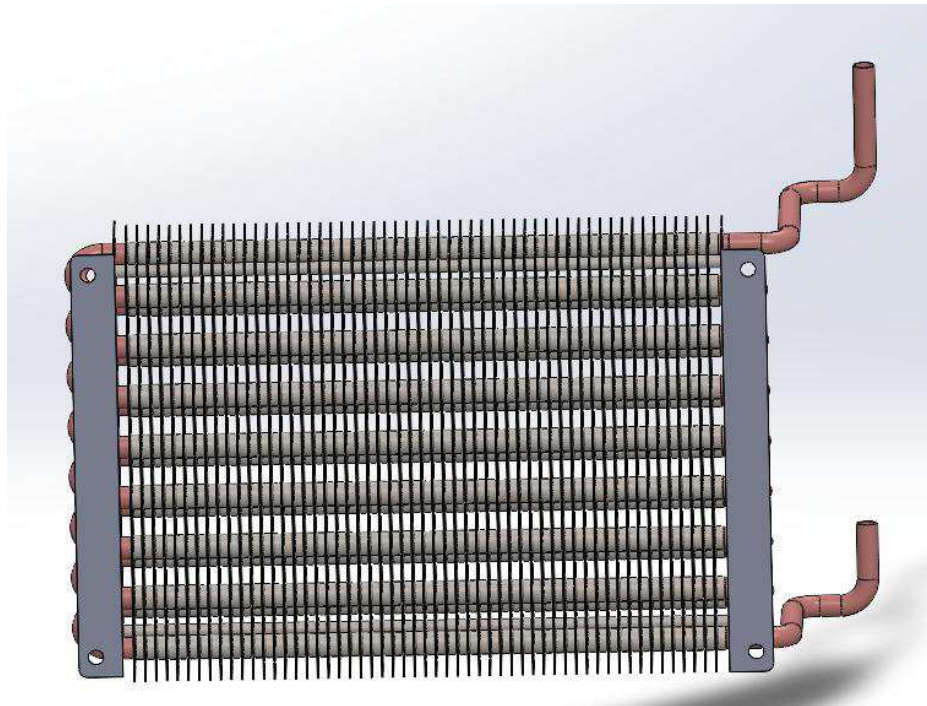


Рисунок 2.11 – Модель теплообмінника рекуператора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

53

Розробимо корпус рекуператора та розташуємо у ньому розроблені елементи пристрою. Більш детальна будова опказана на МРМА 25.00.00.00 ВЗ.

На рис.2.12 показано зовнішній вигляд рекуператора та на 2.13 – рекуператор з насосом для .

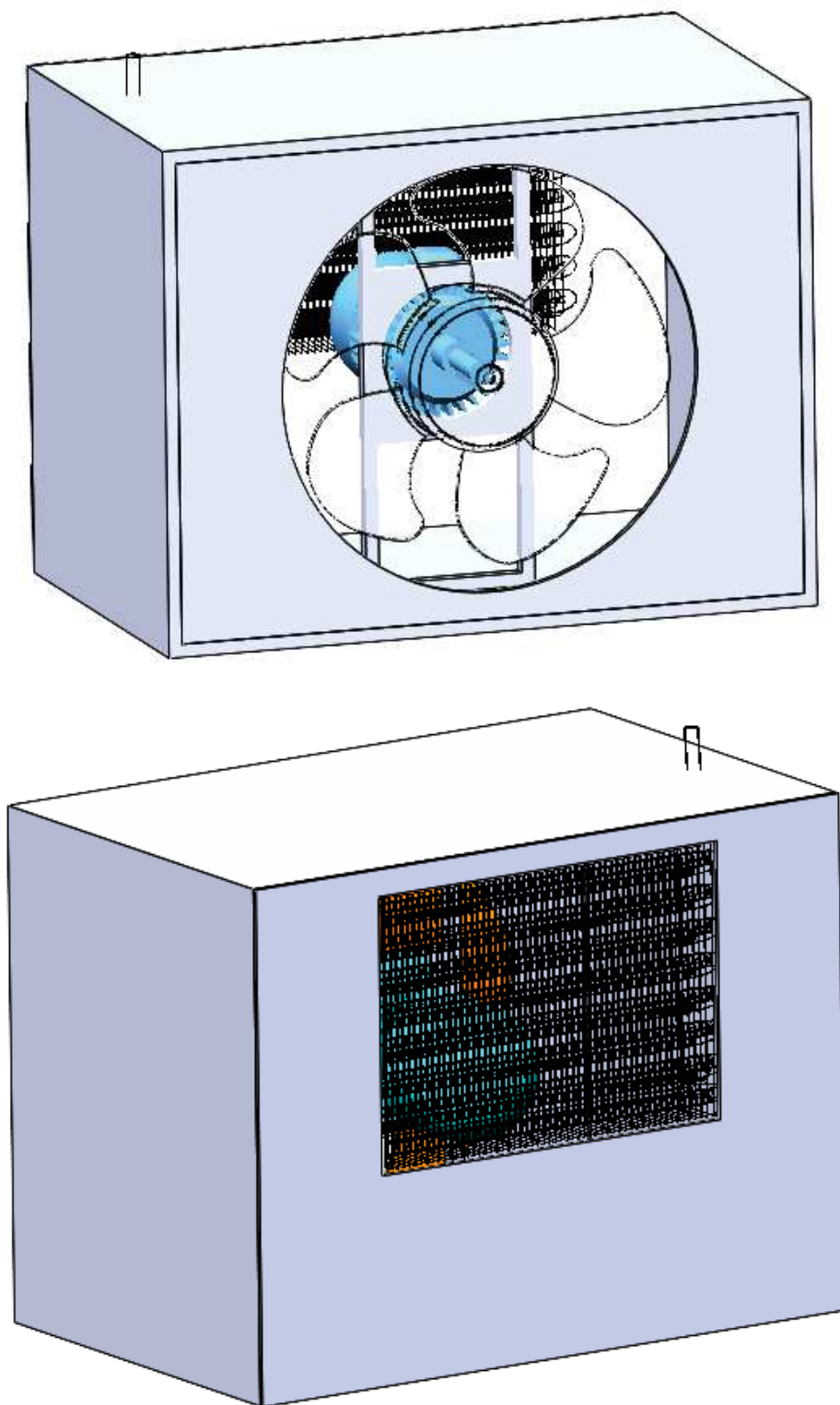


Рисунок 2.12 – Модель рекуператора у SolidWorks

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

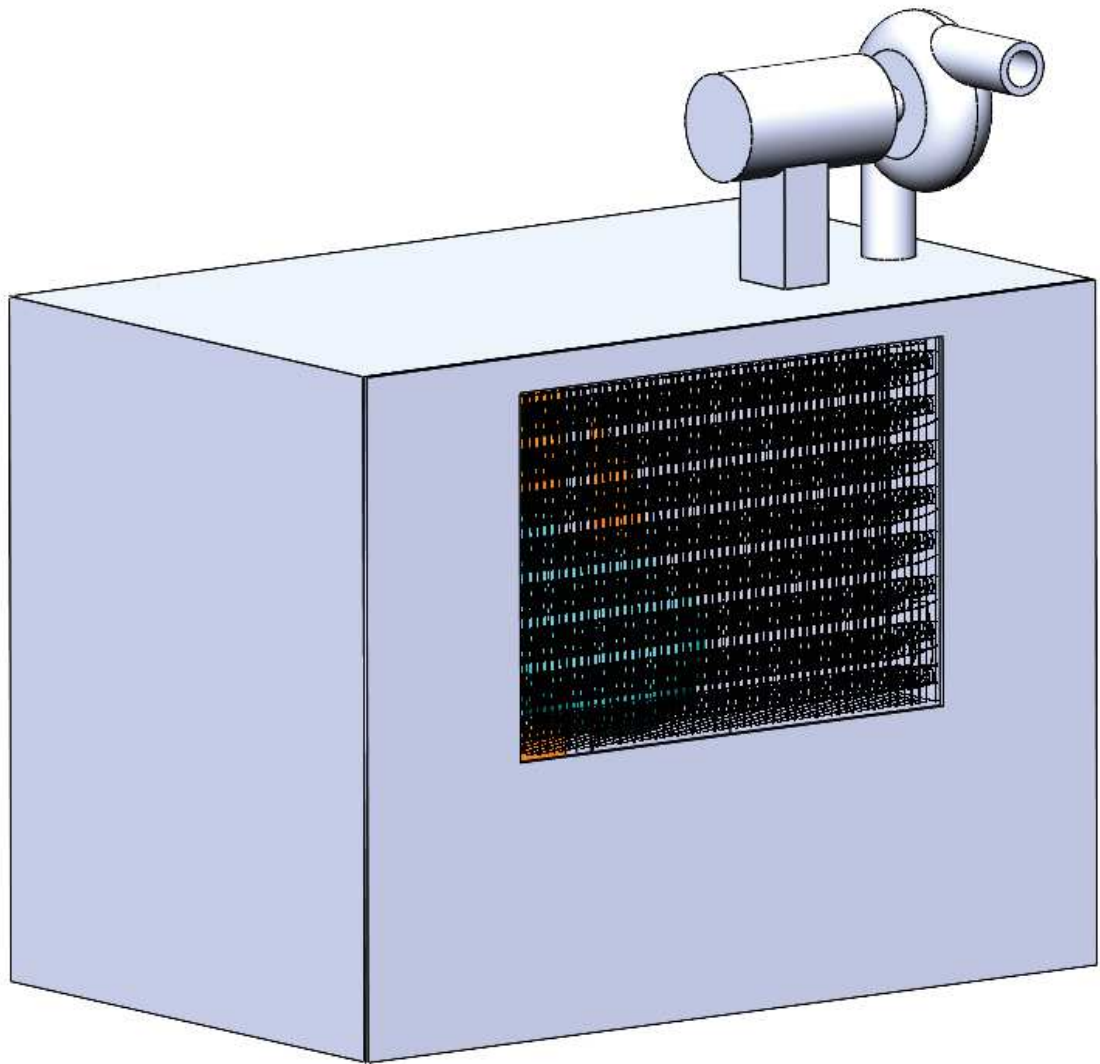


Рисунок 2.13 - Зовнішній вигляд (модель) рекуператора з насосом

2.5 Моделювання теплопереносу в рекуператорі

Розглянемо розповсюдження температури під час проходження повітря, що викачується з приміщення. Врахуємо, що температура навколишнього середовища біля $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура всередині приміщення $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Використовуємо SolidWork Simulation для моделювання теплопереносу. Температурні точки показані на рис.2.14. Розбиття на елементарні елементи на рис.2.15. Результати теплового моделювання показані на рис.2.16-2.17.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

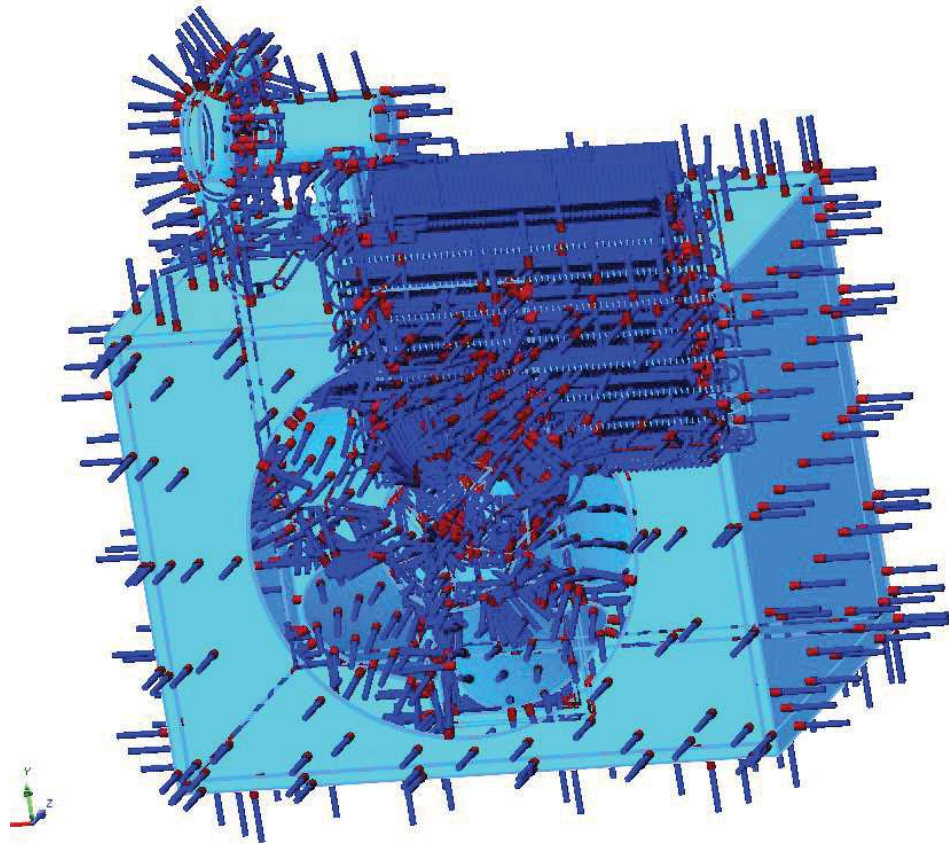


Рисунок 2.14 – Вибір зон передачі тепла

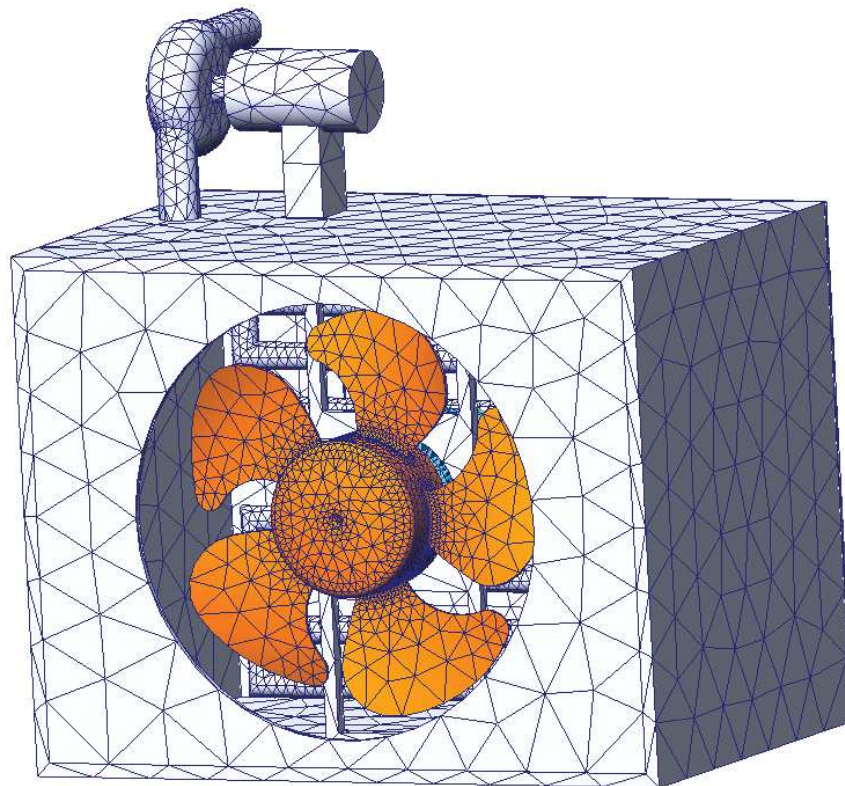


Рисунок 2.15 – Розбивка моделі на кінцеві елементи

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

56

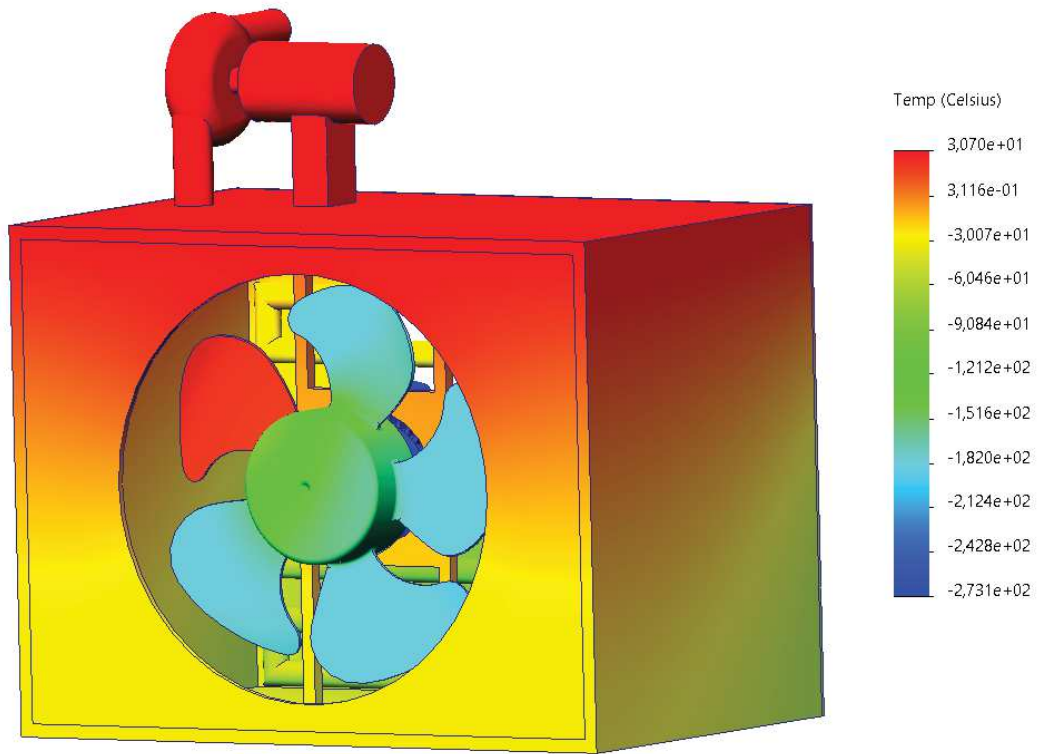


Рисунок 2.16 – Результати теплового розрахунку

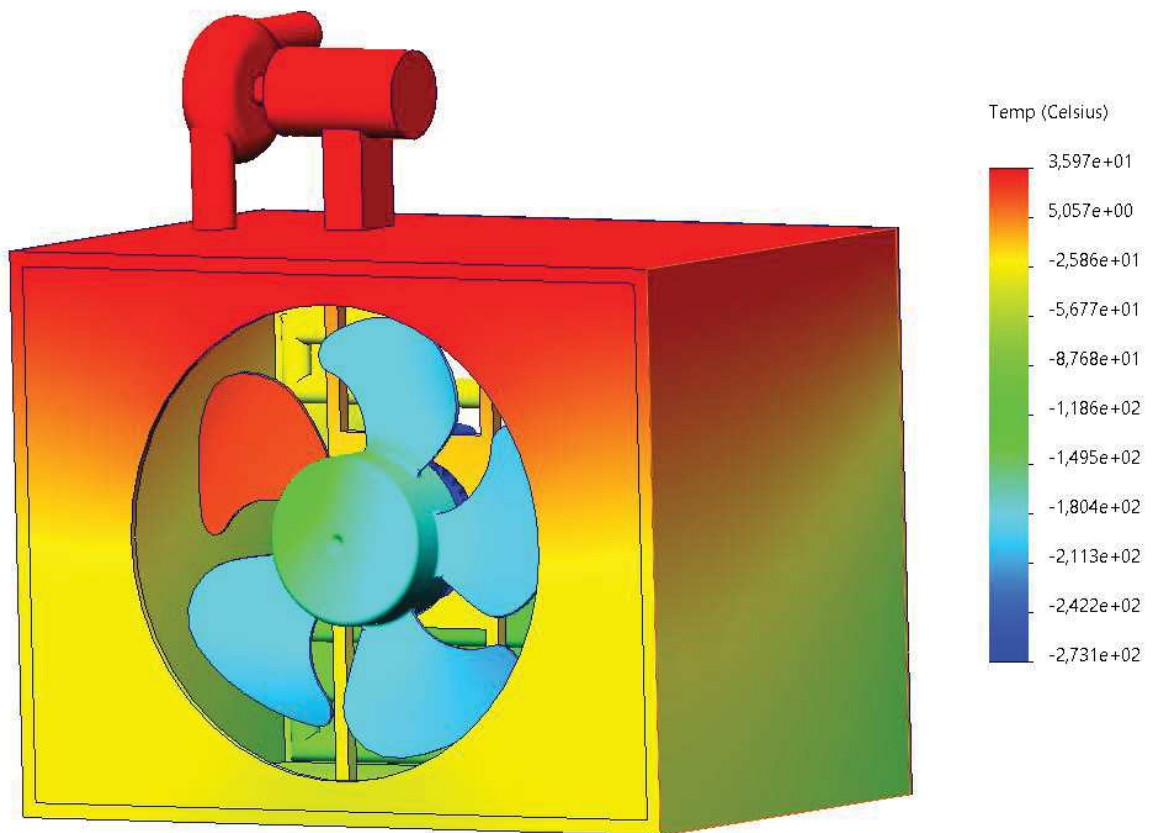


Рисунок 2.17 – Результати теплового розрахунку

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

57

Варіанти, коли не визначені температури теплоносіїв на одному з кінців теплообмінника, не віщують ускладнень, бо будь-який формально правильний набір вхідних даних чітко окреслює температурне поле всередині пристрою. Якщо не задана площа поверхні теплообміну й одна з чотирьох температур теплоносіїв, потрібна перевірка заданих значень вхідних даних на правильність, бо можливі такі збіги вихідних даних, при яких передані теплові потужності не узгоджуються з тепловими ємностями теплоносіїв (не згадуючи про безпосередньо неможливі комбінації значень вхідних даних). Таким чином, для ситуацій, коли не вказані температури теплоносіїв на одному з кінців теплообмінника або не задана площа поверхні теплообміну, прорахунок температурного поля теплообмінника являє собою одноразовий послідовний тепловий розрахунок елементарних ділянок, що складають внутрішній обсяг апарату до досягнення або визначеної сумарної площі поверхні теплообміну, або визначеної температури одного з теплоносіїв на протилежному початку розрахунку кінці приладу.

Для визначення дії рекуператора в приміщенні проведено аналітичний експеримент. Для цього розробимо модель рекуператора і приміщення в SolidWorks. Розроблену модель приміщення, що оснащено рекуператором у Solid Works та проведене моделювання потоку повітря в ньому у CosmosWorks показано на рис.2.18. Початкові умови в приміщенні задані і показані на рис.2.19.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

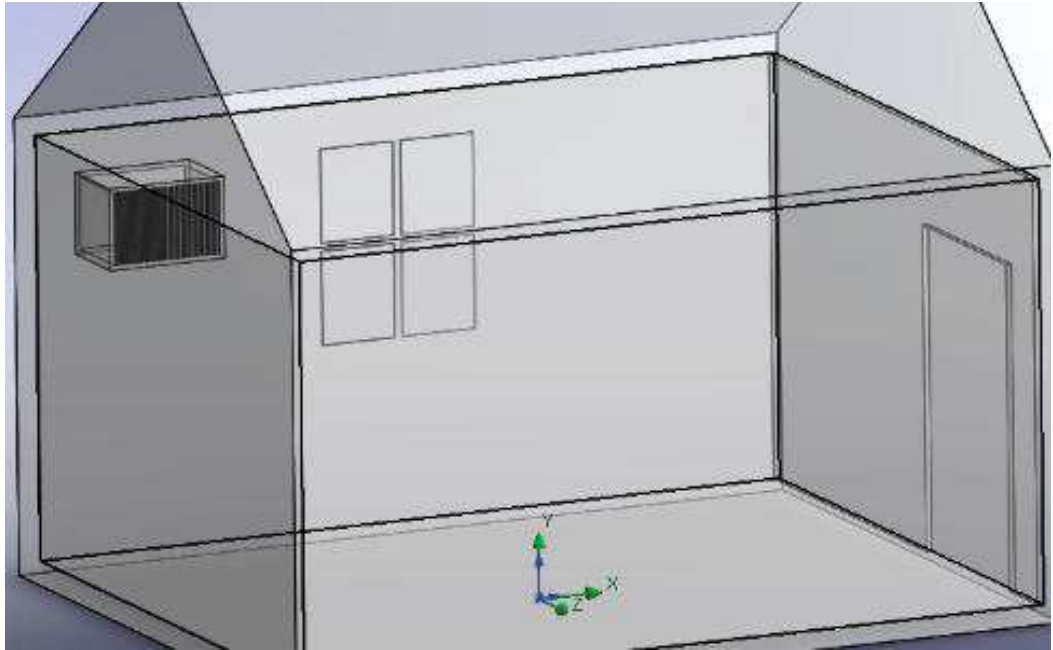


Рисунок 2.18 – Розташування рекуператора в приміщенні

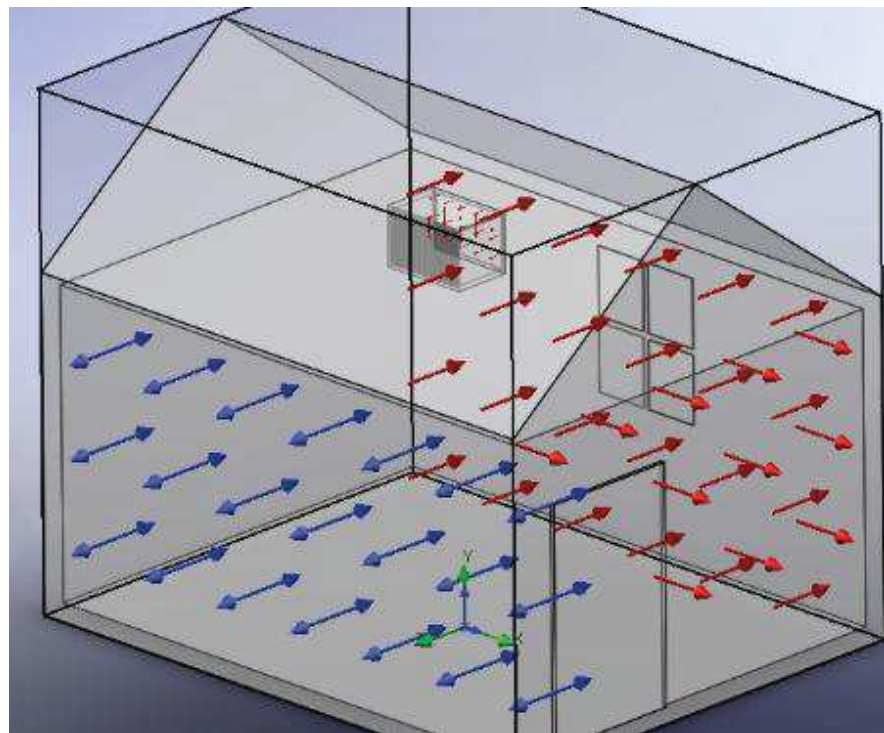


Рисунок 2.19 -Початкові умови розрахунку руху повітря в приміщенні:
стала температура, швидкість та тиск

Результати експериментального моделювання показані на рис.2.20. і 2.21.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

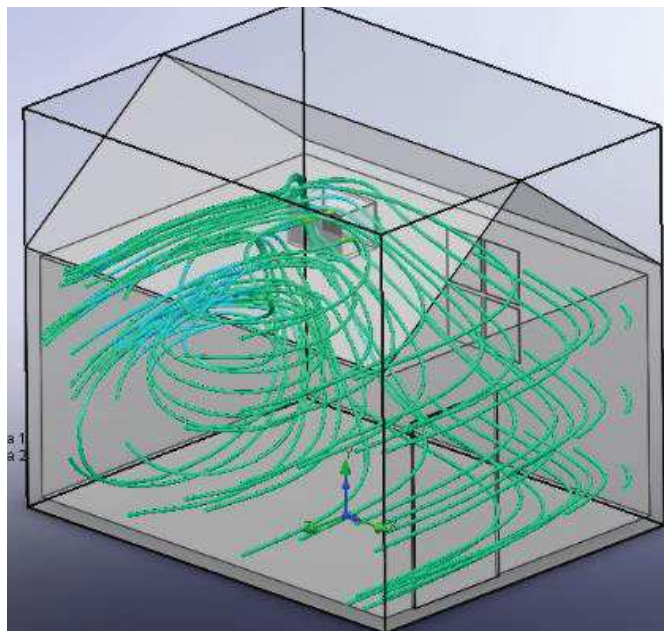


Рисунок 2.20- Рух потоку повітря при охолодженні приміщення в перші хвилини роботи

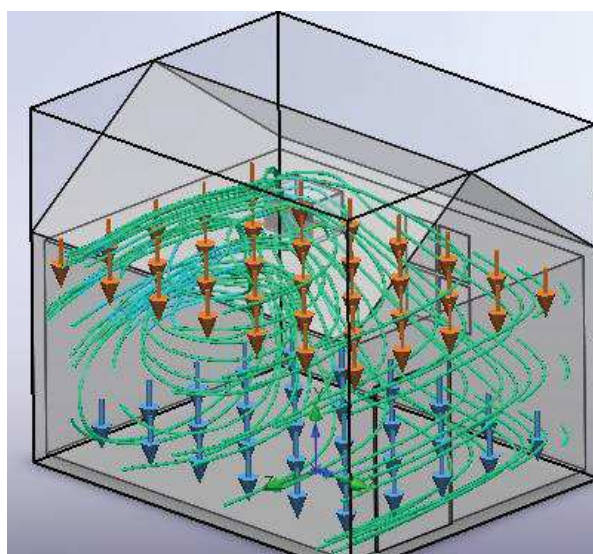


Рисунок 2.21 – Напрямок руху повітря в конвекції при охолодженні приміщення

Висновки до другого розділу

Розроблено модель рекуператора. Обрані його елементи. Створені їх моделі. Проведено моделювання температурного розподілу у рекуператорі.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Отримано значення охолодження теплообмінника при подачі температури 20⁰С від приміщення, передачі тепла приточній вентиляції. Здійснені обчислення розподілу температури у стінках теплообмінника.

Створена модель нагрівання повітря у приміщенні при роботі рекуператора. Знайдені розрахункові величини з урахуванням зовнішнього повітря.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

3 КОСТРУЮВАННЯ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ

3.1 Аналіз потужностей

Для забезпечення нагрівання повітря необхідно обрати відповідний нагрівач. Для розрахунку потужності електричного нагрівача слід знати температуру зовнішнього повітря, необхідну температуру припливного повітря, а також витрату повітря в м³/год. Витрата становить 150 м³/год. Температура зовнішнього повітря визначається на основі температури найхолоднішого періоду у 5 днів. Температура припливного повітря береться рівною 22 °С. Теплову потужність електричного повітряонагрівача можна розрахувати за формулою:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_K - t_H) \cdot 0,36 \quad (3.1)$$

де G – масова витрата повітря через нагрівач (кг/с), c – теплоємність повітря, яка дорівнює 1 кДж/(кг·°С), t_K і t_H – кінцева та початкова температури оброблюваного повітря, відповідно.

Підставивши значення у формулу, отримуємо теплову потужність повітряонагрівача, яка складає 1,62 кВт. Зрозуміло, що нагрівач не завжди працюватиме на максимальній потужності. Тому доцільно обрати пристрій із кількома режимами нагріву, що забезпечить більш плавне регулювання температури повітря. Оптимальним вибором буде електричний повітряонагрівач моделі із трьома ступенями нагріву загальною потужністю 2,0 кВт [21]. Зображення цього обладнання наведено на рисунку 3.1.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62



Рисунок 3.1 – Електричний повітрянагрівач

Електричний повітрянагрівач моделі С-EVN-K-160-3,0 призначений для підігріву повітря в стаціонарних системах вентиляції та кондиціонування, які використовуються у виробничих, громадських і житлових приміщеннях. Пристрій адаптований для встановлення в круглі вентиляційні канали. Ключові конструктивні особливості нагрівача для круглих каналів С-EVN-K-160-3,0 включають корпус і комутаційний щит, виготовлені з оцинкованої сталі, що забезпечує надійність і довговічність. Нагрівальні елементи виконані з нержавіючої сталі, що гарантує ефективну роботу навіть за складних умов. Для безпеки використання повітрянагрівач оснащений системою двоступеневого захисту від перегріву. Перший датчик із функцією автоматичного повернення в робочий стан активується, якщо температура корпусу досягає 60 °С. Другий датчик, який потребує ручного перезапуску, активується при температурі корпусу 90 °С. Важливо дотримуватися послідовності дій під час ручного управління вентиляційною системою з використанням повітрянагрівача: спочатку необхідно вимкнути повітрянагрівач, а після охолодження його нагрівальних елементів — вентилятор. Операційний процес охолодження повітря в системі розглядається окремо, із зазначенням циклів функціонування цієї опції. (Див. Рис.3.2.)

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

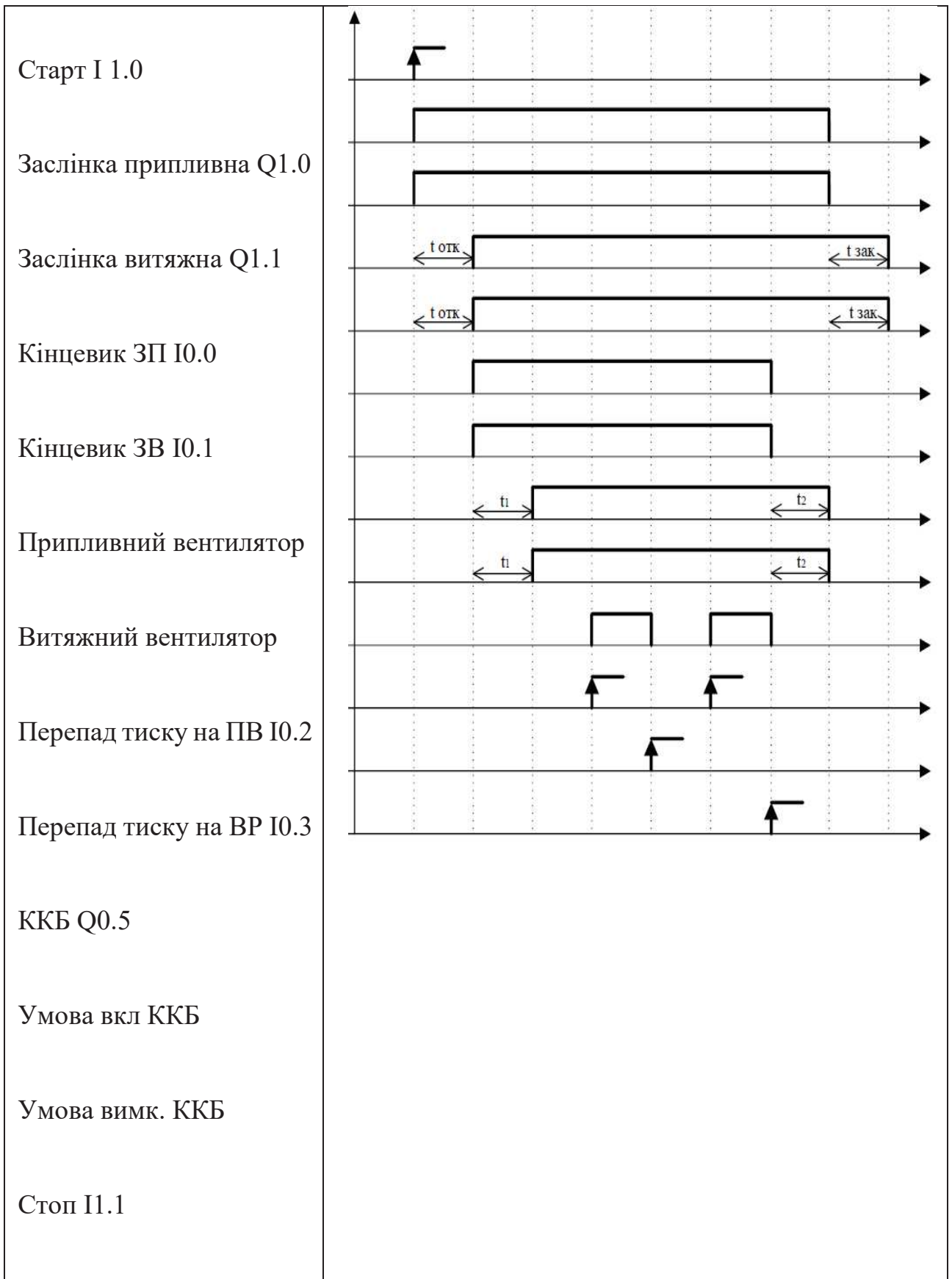


Рисунок 3.2 - Циклограма роботи системи при охолодженні повітря.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На ній видно, як у процесі запуску активується сигнал для відкриття повітряних заслінок. Відкриття заслінок і запуск вентиляторів виконуються за аналогічним принципом, як і в попередньому випадку. У разі перевищення температури повітря в приміщенні заданого порогового рівня автоматично запускається охолоджувач повітря. Він функціонує до моменту, поки температура повітря не досягне межі, при якій охолодження вимикається. Після цього охолоджувач активується знову, коли температура повертається до порогу включення. При зупинці системи охолоджувач повітря вимикається разом із вентиляторами, причому їх продування в даному режимі не потрібне. Після вимкнення вентиляторів затримуються на короткий проміжок часу перед остаточною зупинкою. Успіх процесу їх зупинки підтверджується зміною сигналу датчиків перепаду тиску: відсутність сигналу свідчить про успішну зупинку. Час, протягом якого зберігається сигнал перепаду тиску після вимкнення вентиляторів, встановлюється експериментально та задається програмно. Як тільки сигнали перепаду тиску зникають, тобто вентилятори повністю зупиняються, повітряні заслінки закриваються.

Коли натискається кнопка «Стоп», нагрівач припиняє свою роботу, проте вентилятор продовжує функціонувати додаткові дві хвилини для продування нагрівача. По завершенні цього процесу вентилятори відключаються. Варто зазначити, що після вимкнення вони зупиняються протягом певного часу, і сигнал датчиків перепаду тиску змінюється. Відсутність такого сигналу свідчить про успішну зупинку вентиляторів. Час, протягом якого може бути присутній сигнал перепаду тиску після зупинки, визначається експериментальним шляхом і задається в програмному коді. Коли сигнали перепаду тиску більше не фіксуються, тобто вентилятори успішно зупинились, відбувається закриття повітряних заслінок із тим самим проміжком часу, що й при їх відкритті.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

3.2 Вибір електрообладнання

Розрахунково-монтажна схема є графічним відображенням електричних зв'язків у формі однолінійного виконання. З урахуванням можливості пошкодження окремих елементів електричної системи, споживачі підключаються через окремі лінії. На схемі умовно позначаються типи електрообладнання, його технічні характеристики та спосіб монтажу. Також зазначаються параметри обладнання та взаємозв'язок із відповідними технологічними установками. Розподільчі пристрої, встановлені в приміщенні телятника, створюють умови для ефективного та безпечного керування електроустановками. Через необхідність захисту обладнання від впливу агресивного середовища обираються силові розподільчі пункти з класом захисту IP 54, які забезпечуються автоматичними вимикачами серії ВА. Шафи управління встановлюються поруч із обладнанням, щоб забезпечити зручність обслуговування та оптимальне керування технологічними пристроями. На основі обраних рішень щодо розподільчих установок і систем керування технологічними машинами проведено перевірочні розрахунки для шафи управління вентиляторною установкою. Пульти управління оснащуються магнітними пускачами типу КМИ та тепловими реле РТИ. Шафа забезпечує управління двома вентиляторами рекупераційної системи вентиляції із загальною потужністю двигунів 0,74 кВт. Для вибору автоматичного вимикача необхідно розрахувати номінальний струм, визначити клас спрацювання та кількість полюсів відповідно до характеристик мережі і навантаження. Початковим кроком є обчислення сукупної потужності пристроїв та її перерахунок у силу струму за відповідною формулою. Визначимо струм за формулою:

$$I = P/U = 740/230 = 3,2 \text{ A} \quad (3.2)$$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Виберемо найближчий більший номінал вимикача (наприклад, якщо розрахунковий струм.

Автоматичні вимикачі Siemens Sirius 3RV20 створені для підключення та захисту трифазних електродвигунів і електроустановок від короткого замикання та перевантаження [23]. Вони забезпечують стабільну і надійну функціональність при симетричному розподілі навантаження. Крім того, вимикачі SIRIUS 3RV20 підходять для захисту електродвигунів від перевантаження в режимі вибухозахисту (з підвищеним рівнем надійності, тип захисту - EEx e). Також пристрої відповідають стандартам ЄС і проходять сертифікаційні випробування за відповідними категоріями G/D.



Рисунок 3.3 - Автоматичний вимикач Siemens Sirius 3RV20 11-1DA10 3,2 А
1,1кВт

Особливості Siemens Sirius 3rv20: Знижено втрати енергії; Найменший вплив на нагрівання шафи керування; Менший рівень втрат потужності завдяки застосуванню технології виготовлення біметалевих пластин.

Можна застосовувати меншу за розміром шафу керування з контролем охолодження. [23]

Усі критерії вибору автоматичного вимикача відповідають потребам споживачів. Враховуючи, що шафа дозволяє управляти двома двигунами

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

втяжної вентиляції, для управління електродвигунами вентиляторів обираються нереверсивні електромагнітні пускачі типу КМИ, комплектовані тепловим реле РТИ. Оскільки пускачі та теплові реле встановлені в корпусі пульта управління, вони обираються без кнопок «Пуск» і «Стоп».

Щоб вибрати теплове реле для двигуна, необхідно врахувати його номінальний струм, клас спрацьовування, а також забезпечити сумісність із контактором. Перш за все, виберіть реле з діапазоном уставки, що повністю покриває номінальний струм двигуна, бажано з запасом в 1,5 рази або на 12-20% вище номіналу, щоб уникнути передчасного спрацьовування. Для стандартних умов підійде клас 10. Обираємо Реле електротеплове РТЛ-1016М О4 ЕТАЛ, що показане на рис.3.4. [24]

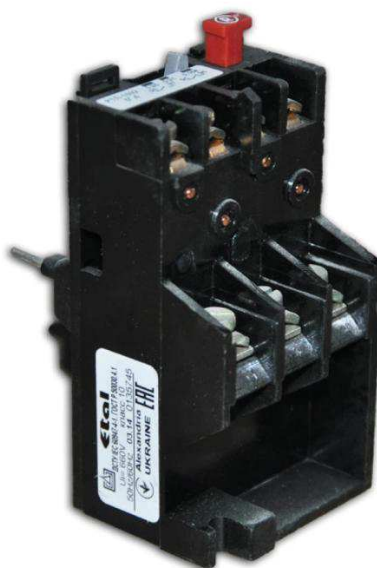


Рисунок 3.4 - Реле електротеплове РТЛ-1016М О4 ЕТАЛ

При виборі магнітних пускачів є необхідна умова:

$$I_{пуск} \geq I_n, \quad (3.2)$$

де $I_{пуск}$ - пусковий струм, I_n - номінальний струм.

Проведемо розрахунок магнітного пускача та теплового реле для двигуна втяжного вентилятора:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

$$5 \geq 3,2$$

За своїм функціональним призначенням контактор є різновидом електромагнітного реле, адаптованого для роботи під значними навантаженнями. Для правильного вибору цього пристрою необхідно враховувати кілька ключових параметрів: тип контактора, величину струму навантаження, нормальний стан його контактів, а також напругу, необхідну для управління котушкою. Мініатюрні контактори в поєднанні з тепловими реле використовуються для дистанційного керування та захисту електродвигунів і інших електропристроїв, номінальна потужність яких не перевищує 7,5 кВт (400 В; АС3). Важливим показником є струм навантаження, який визначає максимально допустиме значення струму, що може проходити через контактор.

Керуюча напруга котушки - значення напруги, у якому котушка забезпечить гарантоване перемикання контактів контактора. Унікальна система конструкції магнітної системи забезпечує відсутність шумів та надійність контактної системи.

Передбачені 2 типи монтажу: Установка на ДИН рейку 35мм або за допомогою гвинтів безпосередньо на монтажну панель.

Вибираємо магнітний пускач типу: Мініатюрний контактор СЕІ 07.10 230V АС (3.5А; 1.5 кВт) ЕТІ 4641623 [25].

При необхідності використання більш потужних двигунів можуть бути застосовані СЕС 07.10 230V АС (7А; 3кВт; АС3) артикул 4641054.

Основні характеристики показані на рис.3.5., монтажні схеми складання на рисунку 3.6.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69





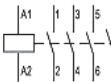
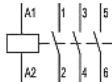
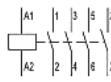
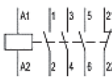
		CE 07.10		CE 07.01		CEI 07.10		CEI 07.01	
									
Контактори СЕ		Тип	Код	Тип	Код	Тип	Код	Тип	Код
1	Контактор 24V 50 / 60Hz	CE 07.10-24V-50/60Hz	4641020	CE 07.01-24V-50/60Hz	4641010	CEI 07.10-24V-50/60Hz	4641620	CEI 07.01-24V-50/60Hz	4641610
2	Контактор 230V 50 / 60Hz	CE 07.10-230V-50/60Hz	4641023	CE 07.01-230V-50/60Hz	4641013	CEI 07.10-230V-50/60Hz	4641623	CEI 07.01-230V-50/60Hz	4641613
3	Контактор 400V 50 / 60Hz	CE 07.10-400V-50/60Hz	4641024	CE 07.01-400V-50/60Hz	4641014	CEI 07.10-400V-50/60Hz	4641624	CEI 07.01-400V-50/60Hz	4641614
4	Номинальний струм АС1 (А)	16		16		16		16	
5	Номинальний струм АС3 (А)	7		7		3,5		3,5	
6	Ном. потужність U = 400V АС3 (kW)	3		3		1,5		1,5	
7	Розміри (шир., вис., глб.) мм	45/45/44		45/45/44		90/45/45		90/45/45	
8	Вага (кг)	0,12		0,12		0,25		0,25	
АКСЕСУАРИ									
9	Фільтр RC 24-48V АС	RCE01	4641701	RCE01	4641701	RCE01	4641701	RCE01	4641701
10	Фільтр RC 110-220V АС	RCE06	4641702	RCE06	4641702	RCE06	4641702	RCE06	4641702
11	Фільтр RC 380-400V АС	RCE10	4641703	RCE10	4641703	RCE10	4641703	RCE10	4641703
12	Теплове реле	RE17D	стор. 260	RE17D	стор. 260	RE17D	стор. 260	RE17D	стор. 260
Схема контактів									

Рисунок 3.5 – Типи мініатюрних пускачів [14]

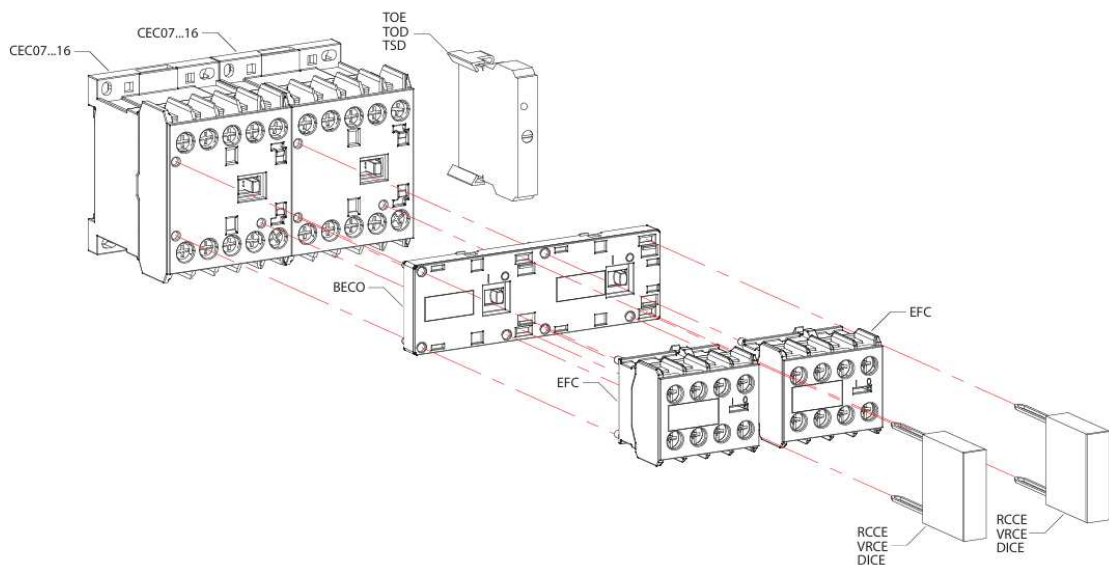


Рисунок 3.6 – Схема монтажу елементів

Технічні характеристики роботи контакторів CEI 07.10 230V та СЕС 07.10 230V А показано на рис.3.7. Їх габаритні креслення показано на рис.3.8.

Технічні характеристики:		CE07	CEC07	CEC09	CEC012	
Відповідність стандартам		IEC/EN 60 947, DIN VDE 0660				
Номинальний струм I _e (AC-3)	U _e ≤ 440 V	A	7 (415V)	7	9	12
Номинальний струм I _e (AC-4)	U _e ≤ 440 V	A	-	2,8	3,5	4,5
Номинальний струм I _e (AC-1)	θ ≤ 55 °C, U _e ≤ 690 V	A	16 (415V)	18	20	22
Номинальна напруга ізоляції U _i			415 V			690 V
Імпульсна стійкість ізоляції U _{imp}					4 kV	
Частота					25 - 400 Hz	
Ступінь захисту (силові контакти)					IP20	
Ступінь захисту (додаткові контакти і аксесуари)					IP20	
Робочий діапазон температур					-25 до +55°C	
Температура зберігання					-55 до +80°C	
Висота над рівнем моря					до 3000 м	
90 % I _e /80 % U _e					від 3000 до 4000 м	
80 % I _e /75 % U _e					від 4000 до 5000 м	
Категорія перенапруги / Ступінь забруднення					III/3	
Кліматичне виконання					відповідно до IEC 60 680-2	
Кількість силових контактів		3				3
Номинальна напруга U _e		400-415 V				690 V
Значення теплового струму I _{th} при < 55 °C номінальний струм по AC-1	A	16	18	20	22	
Номинальна потужність:						
	230 V	kW	1,5	1,5	2,2	3
	400/415 V	kW	3	3	4	5,5
	440 V	kW	-	3,7	4,5	5,5
	500 V	kW	-	3,7	4,5	5,5
	690 V	kW	-	3,7	5,5	7,5
Втрати потужності, на полюс (AC-1)	W	-	1,9	2,4	2,4	
Втрати потужності, на полюс (AC-3)	W	0,3	0,3	0,5	0,7	

Рисунок 3.7 - Технічні характеристики роботи контакторів

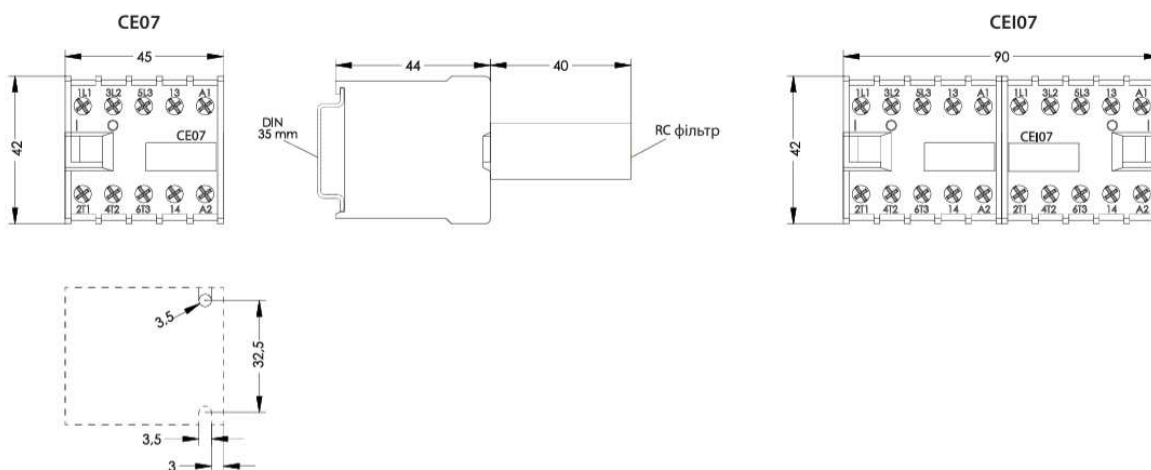


Рисунок 3.8 – Габаритні розміри магнітних пускачів

Також виберемо блок реле для затримки часу. Обираємо Реле часу ТОЕ-10-24-240 [26]. Зовнішній вигляд показано на рис.3.9. Характеристики наведено на рис. 3.10. та рис.3.11. Схема підключення реле наведено на рис.3.12.

										Арк.
										71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРМА 25.00.00.000 ПЗ					



Рисунок 3.9 – Реле часу TOE-10-24-240

Електронний блок затримки часу					
Тип	Код	Час затримки	Напруга	Вага (г)	Пакування (шт.)
Затримка ввімкнення ON					
TOE-3-24-240	4642730	0,3-3 с			
TOE-10-24-240	4642731	1-10 с			
TOE-30-24-240	4642732	3-30 с			
TOE-60-24-240	4642733	6-60 с	24-240V AC/DC	27	1
TOE-100-24-240	4642734	10-100 с			
TOE-300-24-240	4642735	30-300 с			
TOE-1800-24-240	4642736	180-1800 с			

Рисунок 3.10 – Характеристики реле часу

Електронні блоки затримки часу (TOE, TOD, TSD)				
Параметри	Номинальна напруга ізоляції (U_i)	V	300	
	Напруга живлення (U_e)	1 - 2 клеми	V	24...240 V AC/DC 50/60 Hz (TOE)
				24...60 V AC/DC 50/60 Hz (TOD)
				100...240 V AC/DC 50/60 Hz (TOD)
				220 - 240 V AC 50/60 (TSD)
				110-130 V AC (TSD)
	Управління (U_c) (Тільки для TOD)	2 - B1 клеми	V	24...60 V AC/DC 50/60 Hz (TOD)
100...240 V AC/DC 50/60 Hz (TOD)				
Допустима напруга			0,85 - 1,1 x U_s для AC 0,8 - 1,25 x U_s для DC	
Споживання		mA	≤ 5 mA	
Часові параметри	Мінімальний час повторного спрацювання		ms	100
	Мінімальний час команди (тільки для TOD)		ms	50
	Похибка налаштування шкали, %		%	+/-5
	Похибка повторення		%	+/-1
Час перемикання $\gamma - \Delta$			ms	50

Рисунок 3.11 – Характеристики реле часу

									Арк.
									72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРМА 25.00.00.000 ПЗ				

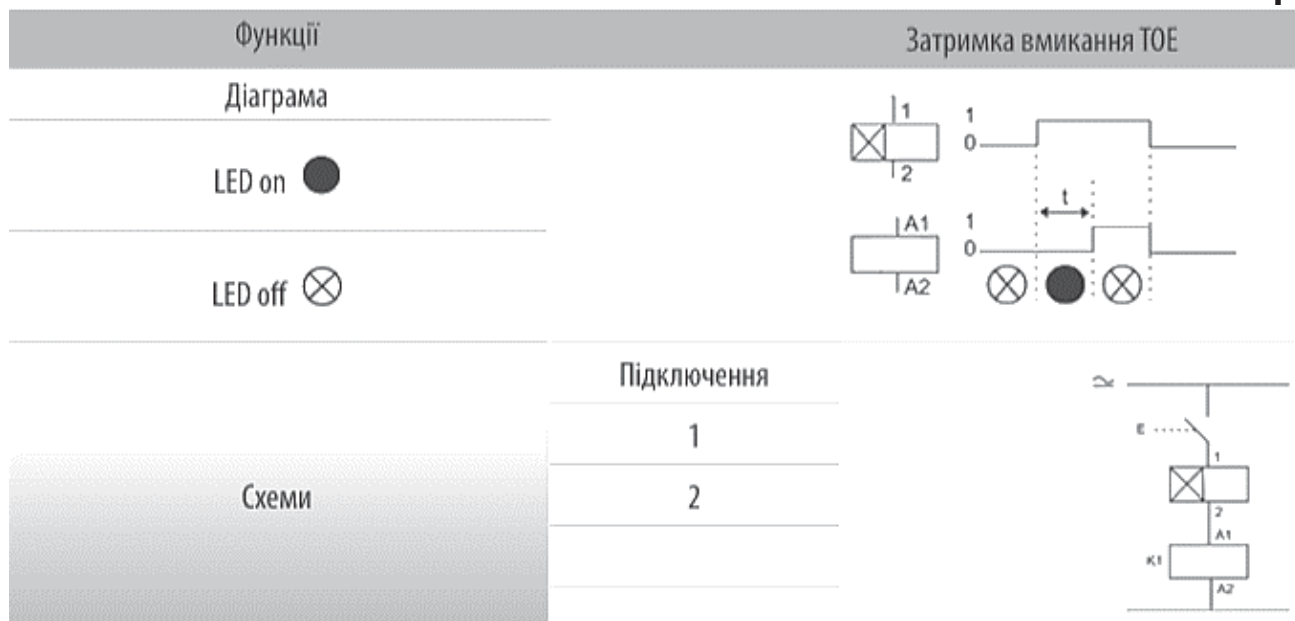


Рисунок 3.12 – Схема підключення реле часу

3.3 Розробка конструкції рекуператора

Розробимо прототип рекуператора, його основних елементів.

Зовнішній вигляд теплообмінника рекуператора показано на рис.3.13, а вентилятор,що його охолоджує на рис.3.14.

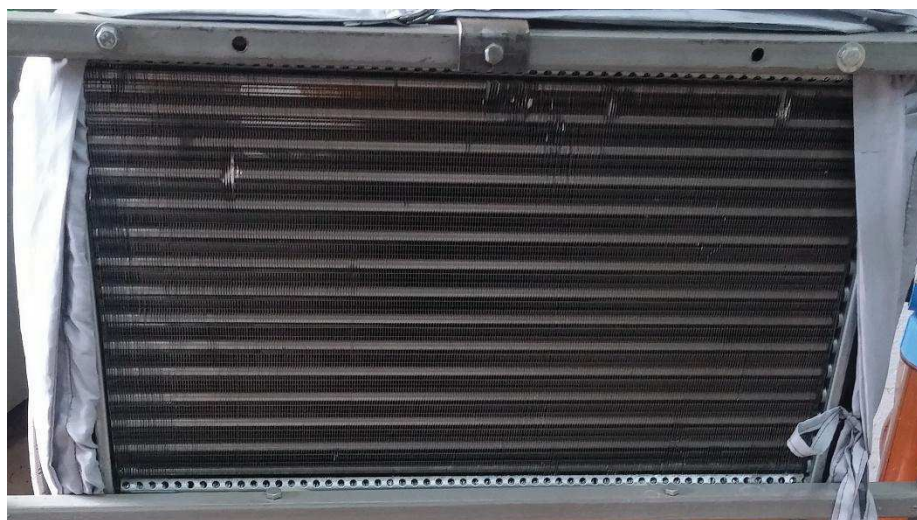


Рисунок 3.13 – Зовнішній вигляд теплообмінника рекуператора.



Рисунок 3.14 - Зовнішній вигляд вентилятора рекуператора

Відповідно до рекомендацій [27, 28], було здійснено планування експерименту з урахуванням перелічених вище факторів [27]. Прийнято рішення проводити дослідження із застосуванням математичних методів планування та аналізу експерименту. Це дозволяє уникнути характерних недоліків однофакторних методів дослідження. Як параметр оптимізації обрали температуру у фанкойлі, оскільки вона повністю відповідає вимогам, що висуваються до таких параметрів при плануванні експерименту [28]. Для створення точної моделі параметра оптимізації необхідно використовувати алгебраїчний поліном другого порядку [27]:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (3.3)$$

де b_i, b_{il}, b_{ii} - відповідно коефіцієнти регресії;

x_i, x_1 - змінні фактори.

В зв'язку з цим було прийняте рішення проводити експеримент, використовуючи некомпозиційне рототабельне планування другого порядку.

Вимірювання температури здійснювались дистанційно за допомогою промислового безконтактного лазерного цифрового інфрачервоного термометру GM320 -50~400 °С. Отримані результати експерименту розповсюдження температури показані на рис. 3.15.

Були отримані рівняння регресії для рекуператора:

$$T_{f1}(S, t, v) = 30.1 + 12.15p + 27.85t - 1.05v - 9.67pt - 37.05vt - 13.45pv - 20.52p^2 + 90.19t^2 + 14.46v^2, \quad (3.3)$$

де $S = \frac{S - 128000}{72000}$ - приведенне значення площі теплообмінника рекуператора;

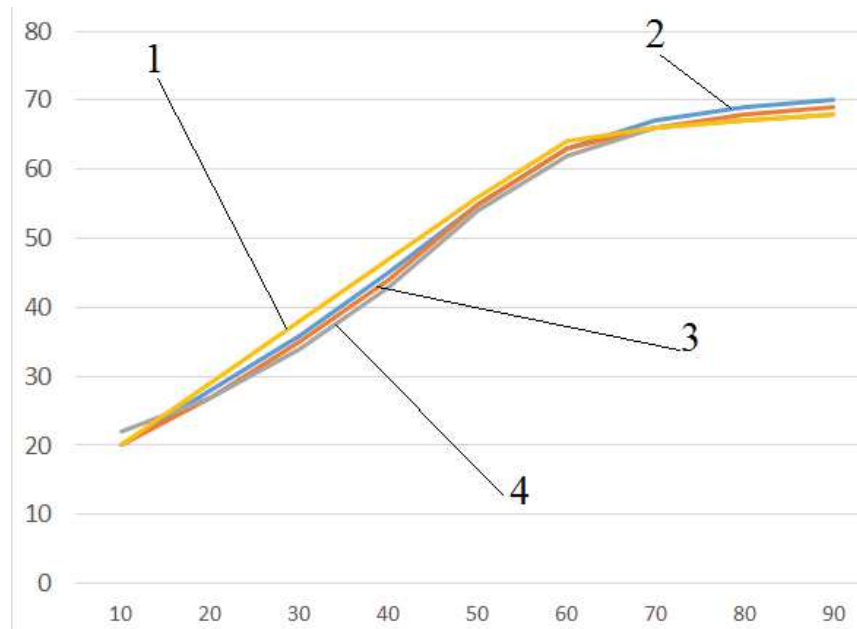
$t = \frac{T - 30}{15}$ - приведенне значення часу нагрівання теплообмінника;

$v = \frac{V_p - 0.0000015}{0.0000005}$ - приведенне значення кількості повітря, що проходить.

Отримані рівняння дозволяють описати процес зміни температури з урахуванням всіх трьох факторів.

З поданих графіків видно, що аналітична модель та отримані регресійні залежності з коефіцієнтами демонструють задовільну відповідність. Відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних становить не більше: для нижньої частини – 14 %, для середньої – 12 %, для верхньої – 13 %. Це підтверджує обґрунтованість припущень, зроблених при розробці аналітичної моделі процесу нагрівання.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75



1 – теоретичний, 2 – експериментальний внизу; 3 – експериментальний всередині; експериментальний вверху.

Рисунок 3.3 - Графіки зміни температури згідно вимірювань датчиками системою управління та контролю під час виходу тепла

Таким чином, аналітична модель з достатньою для розрахунків точністю описує процес нагрівання теплоносія в фанкойлі. Це дозволяє використовувати запропоновану в роботі модель для розрахунків конструктивних та технологічних параметрів побутового фанкойла.

Висновки до третього розділу

Проведено вибір елементів конструкції рекуператора та електрообладнання. Створено прототип рекуператора, що включає теплообмінник та вентилятор.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання випускної кваліфікаційної роботи було створено рекупераційну систему повітря для побутового приміщення. Під час проєктування враховувалися актуальні норми, стандарти та рекомендації, що регламентують розробку систем вентиляції та кондиціонування. У межах роботи було підібрано оптимальне електрообладнання, виконано математичне моделювання теплообмінника, а також створено модель рекуператора у програмному середовищі SolidWorks.

Встановлено, що використання рекуператор здатне покращити комфортний температурний режим у приміщенні.

Проведено огляд систем рекуператорів для приміщень. Виконано аналіз існуючих систем теплопостачання та теплообмінників у рекупераційних системах. Оцінено їх переваги й недоліки.

Змодельовано математичну модель теплообмінника та визначено необхідну площу теплообмінної поверхні. Проведено розрахунки теплових потоків повітря, визначено їх швидкість і потужність, а також розрахована площа теплообмінника.

Визначено можливий температурний градієнт розподілу при функціонуванні рекуператора. Проведено моделювання його роботи для нагріву малих приміщень. Удосконалено конструкцію рекуператора та визначено основні експлуатаційні вимоги до рекуператорів.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

ПЕЛЕРІК ПОСИЛІНЬ

1. Wang, H., Nie, J., Sheng, Y., Li, H., Zhang, W., & Huang, H. (2025). Theoretical modeling and analysis of energy recovery efficiency and influencing factors of energy recovery ventilators under dynamic thermal environments. *Sustainability*, 17(10), 4509. <https://doi.org/10.3390/su17104509> MDPI

2. Gjennestad, M. A., Aursand, E., Magnanelli, E., & Pharoah, J. (2018). Performance analysis of heat and energy recovery ventilators using exergy analysis and nonequilibrium thermodynamics. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.06661> arXiv

3. European Committee for standardization / Eurovent. (2025). *REC-17-14: Moisture recovery in ventilation and air-conditioning systems (1st ed.)*. Eurovent. <https://www.eurovent.eu/wp-content/uploads/publications-files/eurovent-rec-17-14-moisture-recovery-in-ventilation-and-air-conditioning-systems-first-edition-2025-en.pdf> MDPI

4. European Committee for standardization / Eurovent. (n.d.). *Eurovent residential heat recovery ventilation units — Guidebook (1st ed.)*. Eurovent. <https://www.eurovent.eu/publications/eurovent-residential-heat-recovery-ventilation-units-guidebook-first-edition/> MDPI

5. Systemair. (n.d.). *SAVE residential ventilation systems: Air-handling units for homes*. Retrieved November 30, 2025, from <https://www.systemair.com/en/products/residential-ventilation-systems/air-handling-units/save IDEAS/RePEc+1>

6. Zehnder Group. (n.d.). *Comfortable indoor ventilation — Ventilation with heat recovery (ComfoAir / Novus series)*. Retrieved November 30, 2025, from <https://www.international.zehnder-systems.com/en/comfortable-indoor-ventilation/ventilation-with-heat-recovery IDEAS/RePEc>

7. Mitsubishi Electric. (n.d.). *Lossnay energy-recovery ventilation — Ventilation solutions*. Retrieved November 30, 2025, from

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

<https://www.mitsubishielectric.com.au/products/commercial/ventilation/lossnay-ventilation-ventilation/> IDEAS/RePEc

8. LUNOS. (n.d.). *e² decentralized heat recovery ventilation systems*. Retrieved November 30, 2025, from <https://freshventilation.com.au/products/lunos-e2-60-mono-duo-decentralised-heat-recovery-ventilation-systems> IDEAS/RePEc

9. MAICO Ventilatoren. (n.d.). *Residential ventilation — WS / ET / RET series*. Retrieved November 30, 2025, from <https://cdn.maico-ventilatoren.com/EN/Dokumente/GR0002882.ZIP/epaper/ausgabe.pdf> IDEAS/RePEc

10. Broan-Nutone. (n.d.). *Fresh air systems — Residential HRV/ERV (AI Series)*. Retrieved November 30, 2025, from <https://www.broan-nutone.com/en-us/product/freshairsystems/b160h65rt> IDEAS/RePEc

11. ASHRAE. (n.d.). *Standards 62.1 & 62.2 — Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality* (web page). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>. (ashrae.org)

12. Eurovent. (2024). *Eurovent Residential Heat Recovery Ventilation Units — Guidebook (1st ed.)*. Eurovent. <https://www.eurovent.eu/publications/eurovent-residential-heat-recovery-ventilation-units-guidebook-first-edition/>. (eurovent.eu)

13. Wang, H., Nie, J., Sheng, Y., Li, H., Zhang, W., & Huang, H. (2025). Theoretical modeling and analysis of energy recovery efficiency and influencing factors of energy recovery ventilators under dynamic thermal environments. *Sustainability*, 17(10), 4509. <https://doi.org/10.3390/su17104509>. (MDPI)

14. Kaminski, K., Znaczo, P., Kardas-Cinal, E., Chamier-Gliszczynski, N., Koscielny, K., & Cur, K. (2025). Comparison of the heat transfer efficiency of selected counterflow air-to-air heat exchangers under unbalanced flow conditions. *Energies*, 18(1), 117. <https://doi.org/10.3390/en18010117>. (MDPI)

15. O'Connor, D. (2016). *A review of heat recovery technology for passive house and building applications* (technical review). University of Sheffield / White Rose ePrints. <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/104584/>. (eprints.whiterose.ac.uk)

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

16. Tlais, H. B., Şarcă, R. C., & Ovidiu, M. (2023). Review on heat exchanger used in heat recovery ventilation systems. *FMTE Proceedings / IMT University*, (pdf). <https://imt.uoradea.ro/auo.fimte/files-2023-v1/H%20B.%20Tlais%20Review%20on%20Heat%20Exchanger%20used%20in%20Heat%20Recovery%20Ventilation%20System.pdf>.

17. Сміт Дж. В., Джонс А. Б. Сучасні технології вентиляції та кондиціонування повітря. – Енергоефективні технології, 2018. – С. 15–30.

18. Іванов П. С. Аналіз та проектування систем керування вентиляцією будівель // Енергетика та автоматика. – 2017. – С. 45–60.

19. Мілих В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств: підручник. – Київ: Каравела, 2018. – Режим доступу: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0051117.pdf>.

20. Грін Д. С. Цифрове моделювання динамічних систем у сучасних інженерних дослідженнях. – Наука та техніка, 2018. – С. 30–45.

21. Електричний повітрянагрівач для каналної вентиляції С-EVN-K-160-3,0 [Електронний ресурс]. – ВІК Інжиніринг. Режим доступу: <https://vikeng.com.ua/ua/p1205863268-vozduhonagrevatel-elektricheskij-dlya.html> (дата звернення: 17.11.2025).

22. Електродвигун AIRE ML 7124 IM 1081 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tmmotor.ua/ua/aire-ml-7124-im-1081/p105>.

23. Автоматичний вимикач Siemens 3RV2021-1AA10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://europromtrading.com.ua/3rv2021-1aa10-siemens>; <https://ovk.ua/shop/product/siemens-sirius-3rv20-11-1da10-na-toki-do-32-a>.

24. Реле електротеплове RTL-1016M-O4 ETAL [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zyabkin.ua/shop/rele-elektroteplove-rtl-1016m-o4-etala>.

25. Мініатюрний контактор СЕС 0710 230V AC 7 А 3 kW [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://380v.com.ua/product/miniaturnyy_kontaktor_ses_0710_230v_ac_7_a_3_kv_eti_4641054.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

26. ТОВ-10-24-240. *ETI Україна*. URL: <https://www.eti.ua/produksiya-ua/004642731> (date of access: 02.12.2025).

27. Основи наукових досліджень. Курс лекцій. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка / О. Б. Шарпан (уклад.); КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл 348 Кбайт, 4.58 авт. аркушів). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 89 с.

28. Основи наукових досліджень. Курс лекцій. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка / О. Б. Шарпан (уклад.); КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл 348 Кбайт, 4.58 авт. аркушів). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 89 с.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81