

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Гагаріної Лесі Миколаївни

група ЗТЕП – 23м

УДК: 536.27:662.99

**ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

Спеціальність 144 Теплоенергетика

Кваліфікаційна робота магістра

Керівник:

Крадожон С.О.

доктор філософії

Кривий Ріг – 2024

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електротехнічний
Кафедра теплоенергетики
Спеціальність 144 Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри теплоенергетики
_____ Замицький О.В.
« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Гагаріної Лесі Миколаївни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження шляхів підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників
Затверджена наказом по університету від «05» 07 2024р. № 602С
2. Термін здачі студентом закінченої роботи 01.12.2024р.
3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їй належить розробити)

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

- 1.1. Загальні поняття та класифікація теплообмінників.
- 1.2. Характеристики основних конструкцій рекуперативних теплообмінників та огляд принципів їх роботи.
- 1.3. Висновок до розділу 1.

РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ

- 2.1. Типові галузі застосування рекуперативних теплообмінників.
- 2.2. Переваги рекуперативних теплообмінників.
- 2.3. Обмеження та виклики у використанні.
- 2.4. Висновок до розділу 2.

РОЗДІЛ 3 ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

- 3.1. Загальні рівняння теплопередачі та температурний напір.
- 3.2. Визначення коефіцієнта теплопередачі та термічних опорів. Режими течії.
- 3.3. Висновки до розділу 3.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

- 4.1. Інтенсифікація процесів теплопередачі: використання турбулізаторів і ребристих поверхонь.
- 4.2. Оптимізація конструкції стінок (матеріали з високою теплопровідністю, багатошарові стінки).
- 4.3. Використання сучасних теплоносіїв із покращеними характеристиками.
- 4.4. Застосування автоматизованих систем керування температурними режимами.
- 4.5. Порівняння турболізації та використання вторинних випромінювачів в каналах рекуперативних трубчастих теплообмінників.
- 4.6. Висновки до розділу 4.

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Рис.1 - Теплообмінні апарати, рис. 2 – Теплообмінні апарати, рис. 3 – Діаграма порівняння конструкцій; рис. 4 – Переваги використання рекуперативних теплообмінників, рис. 5 – Обмеження рекуперативних теплообмінників, рис. 6 – Рекомендації щодо підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників.

5. Дата видачі завдання 07.08.2024р.

Керівник _____ Крадожон С.О.
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ Гагаріна Л.М.
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН виконання атестаційної роботи магістра

№№ пп	Назва етапів атестаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<u>Розділ 1 аналіз сучасних конструкцій рекуперативних теплообмінників</u>	серпень	
2.	<u>1.1. Загальні поняття та класифікація теплообмінників.</u>	серпень	
3.	1.2. Характеристики основних конструкцій рекуперативних теплообмінників та огляд принципів їх роботи.	серпень	
4.	<u>Розділ 2 особливості використання рекуперативних теплообмінників у промисловості</u>	вересень	
5.	<u>2.1. Типові галузі застосування рекуперативних теплообмінників.</u>	вересень	
6.	<u>2.2. Переваги рекуперативних теплообмінників.</u>	вересень	

7.	<u>2.3. Обмеження та виклики у використанні.</u>	вересень	
8.	<u>Розділ 3 закономірності процесів підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників</u>	жовтень	
9.	<u>3.1. Загальні рівняння теплопередачі та температурний напір.</u>	жовтень	
10.	<u>3.2. Визначення коефіцієнта теплопередачі та термічних опорів. режими течії.</u>	жовтень	
11.	<u>Розділ 4 Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників</u>	листопад	
12.	<u>4.1. Інтенсифікація процесів теплопередачі: використання турбулізаторів і ребристих поверхонь.</u>	листопад	
13.	<u>4.2. Оптимізація конструкції стінок (матеріали з високою теплопровідністю, багат шарові стінки).</u>	листопад	
14.	<u>4.3. Використання сучасних теплоносіїв із покращеними характеристиками.</u>	листопад	
15.	<u>4.4. Застосування автоматизованих систем керування температурними режимами.</u>	листопад	
16.	<u>4.5. Порівняння турбулізації та використання вторинних випромінювачів в каналах рекуперативних трубчастих теплообмінників.</u>	листопад	

Студент _____
(підпис)

Керівник _____
(підпис)

Допущено до перевірки на академічну доброчесність.

Керівник _____
(підпис)

Завідувач кафедри _____
(підпис)

Анотація

У магістерській роботі розглянуто питання підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників, які широко застосовуються в різних галузях промисловості, включаючи енергетику, хімічну промисловість та житлово-комунальне господарство. Зроблено аналіз сучасних конструкцій теплообмінного обладнання, їхніх характеристик і обмежень, а також визначено основні шляхи підвищення енергоефективності.

Мета роботи полягає у розробці рекомендацій щодо оптимізації конструкцій, вибору матеріалів і вдосконалення методів експлуатації рекуперативних теплообмінників для зниження втрат теплової енергії та підвищення їх техніко-економічних показників.

В роботі використано аналітичні методи дослідження, математичне моделювання та аналіз статистичних даних. Основну увагу приділено інтенсифікації процесів теплопередачі за допомогою турбулізаторів, ребристих поверхонь, сучасних теплоносіїв та автоматизації температурних режимів.

Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Вони можуть бути використані для модернізації діючих теплообмінників і розробки нових конструкцій. Практична реалізація рекомендацій дозволить скоротити енергетичні та експлуатаційні витрати, підвищити надійність і довговічність обладнання, а також покращити його екологічні показники.

Ключові слова: рекуперативні теплообмінники, енергоефективність, інтенсифікація теплопередачі, оптимізація конструкції, автоматизація температурного режиму.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ	8
1.1. Загальні поняття та класифікація теплообмінників.	8
1.2. Характеристики основних конструкцій рекуперативних теплообмінників та огляд принципів їх роботи.....	20
1.3. Висновок до розділу 1.	26
РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ	28
2.1. Типові галузі застосування рекуперативних теплообмінників.....	28
2.2. Переваги рекуперативних теплообмінників.	29
2.3. Обмеження та виклики у використанні.	30
2.4. Висновок до розділу 2.	31
РОЗДІЛ 3 ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ	33
3.1. Загальні рівняння теплопередачі та температурний напір.	33
3.2. Визначення коефіцієнта теплопередачі та термічних опорів. Режими течії.	34
3.3. Висновки до розділу 3.	37
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ	38
4.1. Інтенсифікація процесів теплопередачі: використання турбулізаторів і ребристих поверхонь.	38
4.2. Оптимізація конструкції стінок (матеріали з високою теплопровідністю, багат шарові стінки).	40
4.3. Використання сучасних теплоносіїв із покращеними характеристиками.	43
4.4. Застосування автоматизованих систем керування температурними режимами.	46

4.5. Порівняння турболізації та використання вторинних випромінювачів в каналах рекуперативних трубчастих теплообмінників.....	50
4.6. Висновки до розділу 4.	52
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасний світ активно працює над впровадженням нових технологій і технічних рішень, спрямованих на зниження споживання паливно-енергетичних ресурсів. Це можливо лише за умови проведення ефективної державної політики у сфері енергозбереження та використання сучасного енергоефективного обладнання.

Теплообмінне обладнання відіграє ключову роль у технологічному забезпеченні підприємств житлово-комунального господарства, нафтопереробної та хімічної промисловості. Воно також широко застосовується в паротурбінних, газотурбінних і ядерних установках, зокрема на об'єктах, що використовують альтернативні джерела енергії. Це обладнання є важливим через свої розміри, металомісткість і функціональне призначення, а також значно впливає на техніко-економічні показники роботи систем.

Важливими чинниками експлуатації теплообмінних апаратів довгий час залишалися і залишаються довговічність, технологічність і ефективність. Сучасне теплообмінне обладнання має відповідати технічним вимогам:

- забезпечувати передачу необхідної кількості теплоти від одного середовища до іншого з отриманням необхідних кінцевих температур за якнайбільшої інтенсивності теплообміну;
- бути працездатним і надійним за заданих термодинамічних параметрів робочих середовищ (тиску, температури, об'єму) і за їх різного агрегатного стану;
- мати поверхню теплообміну і інші елементи конструкції апарату, які омиваються робочим середовищем, достатньої хімічної стійкості до агресивного впливу, а також інертну відносно харчових продуктів;
- мати можливість огляду поверхонь теплообміну і доступність їх для періодичної очистки для збереження тривалої працездатності в процесі

експлуатації в разі обробки середовищ, здатних виділяти відкладення на стінках;

- мати достатній запас міцності, що гарантує безпечний стан за напружень, що виникають як внаслідок тиску робочого середовища, так і внаслідок температурних деформацій різних частин теплообмінника;

- мати якомога менші габарити і якомога меншу питому металоємність за заданих робочих параметрів.

Задовольняти споживчі вимоги:

- мати прийнятну ціну і умови оплати;
- високу якість виготовлення;
- мати повну готовність до роботи;
- зручно і просто обслуговуватись і експлуатуватись;
- забезпечувати ремонтпридатність; - бути універсальними для різних видів оброблюваних продуктів;
- мати необхідну документацію (паспорт, схему, сертифікат).

Саме за цими вимогами підбираються конкретні теплообмінні апарати для конкретних умов експлуатації. [12]

Зі збільшенням енергетичних потужностей і обсягів виробництва зростають розміри, вага та вартість теплообмінних апаратів. Тому питання підвищення ефективності теплообмінного обладнання, яке використовується, модернізується або розробляється, є актуальним і важливим науково-практичним завданням.

Враховуючи викладене, встановлення закономірностей процесів, що протікають у рекуперативних теплообмінниках є **актуальним науковим завданням.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота магістра відповідає напряму наукових досліджень кафедри теплоенергетики «Криворізький національний університет» і виконана за пріоритетним напрямком Міністерства освіти і науки України та відповідає Закону

України №74/94-ВР від 01.07.1994 р. (Закон України «Про енергозбереження»).

Мета і завдання дослідження. Розробка ефективних шляхів підвищення енергоефективності рекуперативних теплообмінників шляхом удосконалення їх конструкції, матеріалів та методів експлуатації. Для досягнення вказаної мети в роботі вирішувались наступні задачі:

1. Проаналізувати літературні джерела щодо існуючих конструкцій рекуперативних теплообмінників і визначити їхні основні недоліки та обмеження.
2. Дослідити вплив конструктивних, матеріальних і експлуатаційних параметрів на ефективність теплообміну в рекуперативних теплообмінниках.
3. Розробити рекомендації щодо оптимізації конструкції та вибору матеріалів для підвищення ефективності теплообмінників.

Об'єкт дослідження. Процеси, що протікають у рекуперативних теплообмінниках.

Предмет дослідження. Параметри процесів підвищення ефективності роботи рекуперативних теплообмінників.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи: аналітичні та методи математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. Отримали подальший розвиток закономірності процесів, що протікають у рекуперативних теплообмінниках, що дозволяють значно підвищити їх ефективність і знизити втрати теплової енергії.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю вирішуваних теоретичних завдань; використанням реальних вихідних даних, що взяті в діючих вітчизняних підприємств; обґрунтованістю прийнятих допущень, аналізом відповідно до завдань досліджень.

Наукове значення роботи. Отримані закономірності процесів що протікають у рекуперативних теплообмінниках, що сприяє розробці нових підходів до створення економічних та екологічно ефективних теплообмінників.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені рекомендації можуть бути застосовані для модернізації рекуперативних теплообмінників на підприємствах різних галузей. Це сприятиме скороченню енергетичних витрат, зниженню експлуатаційних витрат та поліпшенню екологічних показників обладнання.

Структура роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 25 найменувань. Загальний обсяг дипломної роботи становить 58 сторінок, 10 рисунків, 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

1.1. Загальні поняття та класифікація теплообмінників.

Теплообмінні апарати — це пристрої, призначені для передачі тепла від одного середовища до іншого. Це може бути нагрівання одного середовища або відведення тепла від охолоджуваного середовища до навколишнього середовища. Тіла, що віддають або приймають теплоту, називають теплоносіями.

Теплообмінні апарати є найбільш поширеними пристроями в усіх типах енергетичних установок і двигунах. До них належать такі теплообмінники, як конденсатори, підігрівники, випарні апарати, парові котли, охолоджувачі, економайзери, радіатори тощо, які широко використовуються в різних галузях промисловості. Особливо вони поширені в енергетиці, хімічній, нафтопереробній, паперовій та харчовій промисловостях.

Теплообмінні апарати поділяють за різними критеріями. Залежно від способу передачі тепла, вони поділяються на дві основні групи: поверхневі та змішувальні. Їхня конструкція залежить від ряду факторів, таких як призначення, напрямок руху робочих середовищ, тип і конфігурація теплообмінної поверхні, градієнт температур теплоносіїв, а також матеріал, з якого виготовлений апарат. Крім того, теплообмінники розробляються з урахуванням різних вимог, які обумовлені специфічними умовами їх застосування.

Основні вимоги до промислових теплообмінних апаратів включають забезпечення максимально можливого коефіцієнта теплопередачі за мінімального гідравлічного опору, компактність конструкції, економне використання матеріалів, а також високу надійність і герметичність. Крім

того, важливим є зручний доступ до теплообмінної поверхні для очищення. Додатково цінуються уніфікація деталей і вузлів, а також технологічність виготовлення теплообмінних поверхонь, що дозволяє їх використання в широкому діапазоні температур і тисків. [1]

Під час розробки нових, більш ефективних теплообмінників особливу увагу приділяють зниженню питомих витрат матеріалів, енергії, трудових і фінансових ресурсів, необхідних для їх виготовлення та експлуатації. Питомі витрати у цьому контексті визначаються як витрати, розраховані на одиницю теплової продуктивності за заданих умов експлуатації.[4]

Інтенсивність процесу теплообміну, або питома тепла продуктивність теплообмінного апарата, визначає кількість тепла, переданого через одиницю площі теплообмінної поверхні за одиницю часу за заданих теплових умов. Цей показник визначається коефіцієнтом теплопередачі, який залежить від таких факторів, як геометрія теплообмінної поверхні, еквівалентний діаметр і компоновка каналів, що сприяють досягненню оптимальної швидкості руху середовищ. Вплив також мають середній температурний напір, рівень турбулентності потоків та додаткові конструктивні елементи, наприклад, обребрення.

Для підвищення інтенсивності теплообміну застосовують як конструктивні, так і режимні методи. Конструктивні методи передбачають оптимізацію форми каналів і поверхонь, тоді як режимні методи пов'язані з маніпуляцією гідродинамічними параметрами. Це може включати створення коливань у потоці, пульсацію потоків, введення газу чи видалення середовища через пористі стінки, а також застосування електромагнітних полів для впливу на потік і запобігання забрудненню поверхонь завдяки інтенсивній турбулізації потоку.

Теплообмінні апарати поділяються на дві основні групи залежно від способу передачі тепла: поверхневі і змішувальні. У поверхневих теплообмінниках тепло передається через стінки з теплопровідного матеріалу, які розділяють робочі середовища. Натомість у змішувальних

апаратах тепло передається за рахунок безпосереднього контакту і перемішування робочих середовищ.

Змішувальні теплообмінники мають простішу конструкцію порівняно з поверхневими і забезпечують більш повне використання тепла. Однак їх застосування обмежене тими випадками, коли змішування середовищ допускається за технологічними умовами виробництва.

Поверхневі теплообмінники класифікуються на рекуперативні та регенеративні. У рекуперативних теплообмінниках передача тепла між теплоносіями здійснюється через розділові стінки, причому напрямок теплового потоку в кожній точці стінки залишається незмінним. У регенеративних теплообмінниках теплоносії по чергово контактують з однією і тією ж поверхнею нагріву, через що напрямок теплового потоку в кожній точці стінки змінюється періодично. У цьому розділі розглядаються рекуперативні теплообмінники безперервної дії, які є найпоширенішими в промисловості. [8].

Ключовими компонентами кожухотрубчастих теплообмінників є трубні пучечки, трубні решітки, корпуси, кришки та патрубки. У кожухотрубчастому теплообміннику (рис. 1.1, 1.2) середовище 1 обмінюється теплом та переміщається в трубному просторі, а середовище 2 - в міжтрубному просторі.

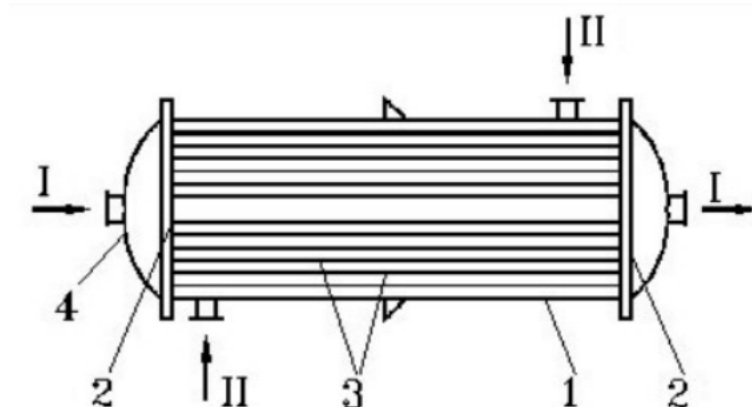


Рис. 1.1 Одноходовий кожухотрубчастий теплообмінник:
1 - корпуси; 2 - решітки для труб; 3 - трубки; 4 - кришка.

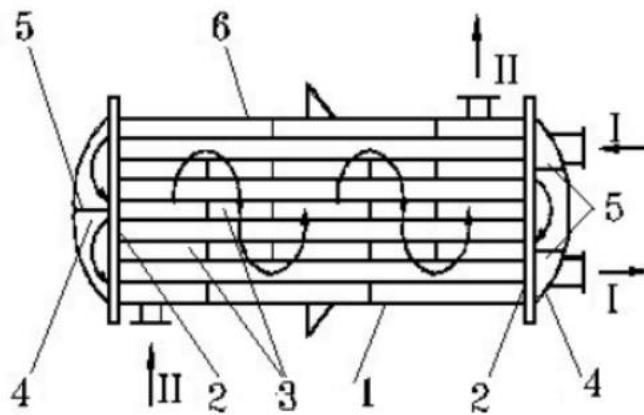


Рис. 1.2 Багатоходовий кожухотрубчастий теплообмінник:

1 - корпус; 2 –решітки трубні; 3 - труби; 4 - кришки; 5,6 - перегородки в кришках та в міжтрубному просторі.

Зазвичай середовища направляють протитечією, тобто в протилежних напрямках. У цьому випадку знизу вгору рухається середовище, яке нагрівається, а те середовище, що віддає тепло, — у зворотному напрямку. Така орієнтація руху кожного середовища відповідає напрямку, в якому природно рухатиметься рідина під впливом зміни щільності в процесі нагрівання та охолодження.

Такий напрямок руху середовищ забезпечує рівномірні умови для теплообміну по всій площі поперечного перерізу апарату та сприяє більш однорідному розподілу швидкостей. У протилежному випадку, коли холодніше середовище подається зверху теплообмінника, нагріта рідина, маючи меншу щільність, може скупчуватися у верхній частині апарату, що призводить до утворення застійних зон. Труби в решітках зазвичай розташовують рівномірно по периметру правильних шестикутників, тобто на вершинах рівносторонніх трикутників (рис. 1.3а). Рідше застосовується схема розташування труб по концентричних колах (рис. 1.3б). У деяких випадках, коли потрібен зручний доступ для очищення зовнішньої поверхні труб, їх розміщують по периметру прямокутників (рис. 1.3в). Усі ці варіанти мають одну спільну мету — забезпечити максимально компактне розташування

поверхні теплообміну всередині апарату. У більшості випадків найбільша компактність досягається при розміщенні трубок по периметрах правильних шестикутників

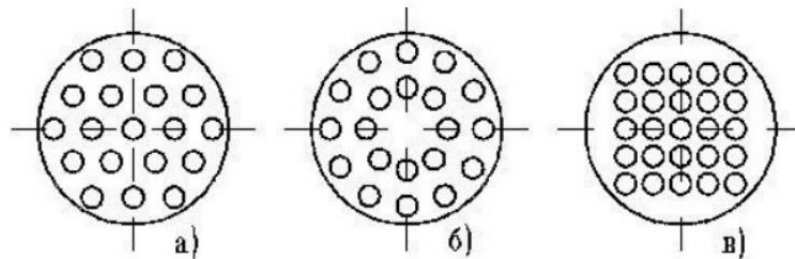


Рис. 1.3 Способи розміщення трубок в теплообмінниках:

а) по периметрах правильних шестикутників; б) по концентричних колах; в) по периметрах прямокутників (коридорне розташування).

Кожухотрубчасті теплообмінники можуть бути вертикальними, горизонтальними і похилими відповідно до вимог технологічного процесу або зручності монтажу.

Залежно від величини температурних подовжень трубок і корпусу застосовують кожухотрубчасті теплообмінники жорсткої, полужорсткої і нежорсткої конструкцій.

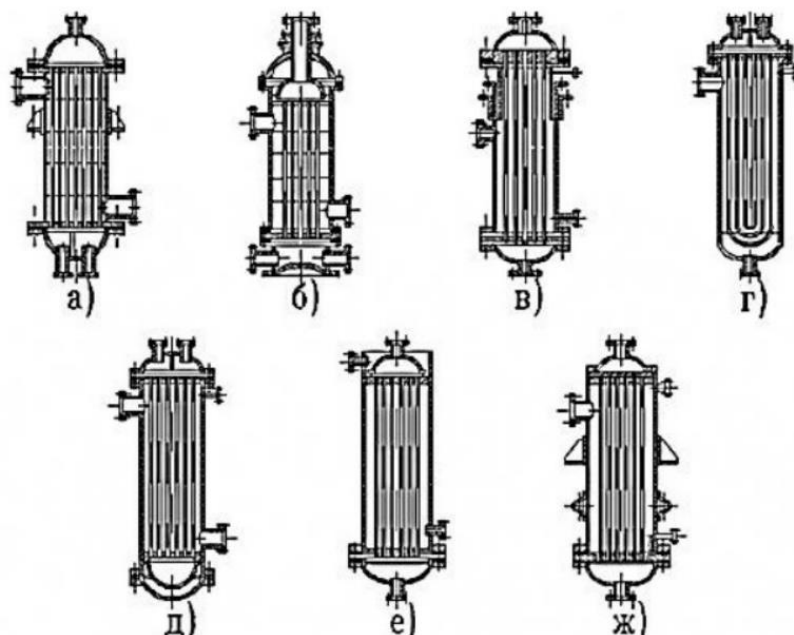


Рис. 1.4 Типові конструкції теплообмінників

Апарати жорсткої конструкції (рис. 1.4а) використовують при порівняно невеликих різницях температур корпусу і пучка труб, ці теплообмінники відрізняються простотою пристрою.

У кожухотрубних теплообмінниках нежорсткій конструкції передбачається можливість деякого незалежного переміщення теплообмінних труб і корпусу для усунення додаткових напружень і температурних подовжень. Не жорсткість конструкції забезпечується сальниковим ущільненням на патрубку (рис. 1.4б) або корпусі (рис. 1.4в), пучком U-образних труб (рис. 1.4г), рухомий трубної решітки закритого і відкритого типу (рис. 1.4д, е).

В апаратах полужорсткій конструкції температурні деформації компенсуються осьовим стисненням або розширенням спеціальних компенсаторів, встановлених на корпусі (рис. 1.4ж). Напівжорстка конструкція надійно забезпечує компенсацію температурних деформацій, якщо вони не перевищують 10- 15 мм, а умовний тиск в міжтрубному просторі становить не більше $2,5 \text{ кгс/см}^2$.

Теплообмінники складові (елементні).

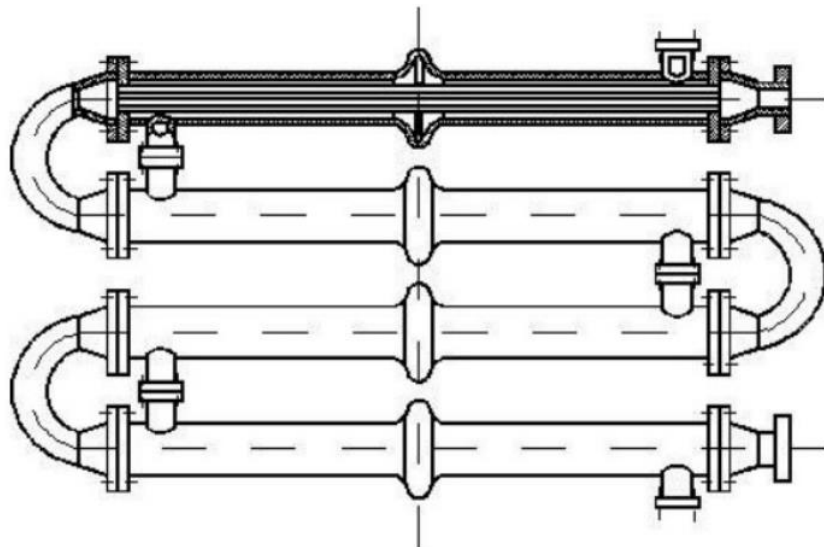


Рис. 1.5 Теплообмінники елементні

Елементні теплообмінники складаються з серії з'єднаних елементів-секцій (рис. 1.5). Комбінація декількох елементів з невеликою кількістю труб

відповідає принципу багатогодового кожухотрубного апарату, що працює за найбільш ефективною схемою протитечії. Ці теплообмінники особливо ефективні при змінах агрегатного стану робочих середовищ і доцільні при високих робочих тисках. Відсутність перегородок у конструкції знижує гідравлічний опір і зменшує рівень забруднення міжтрубного простору. Однак, у порівнянні з багатогодовими кожухотрубними теплообмінниками, елементні апарати займають більше місця та є дорожчими через додаткові елементи, такі як трубні решітки, фланцеві з'єднання, компенсатори тощо.[8]

Двотрубні теплообмінники типу "Труба в трубі".

Ці теплообмінники складаються з ряду послідовно з'єднаних секцій (рис. 6), де кожна секція містить дві співвісні труби. Для зручності очищення і заміни внутрішні труби зазвичай з'єднуються між собою за допомогою колін. Двотрубні теплообмінники з великою поверхнею нагріву складаються з кількох секцій, де кожна пара труб з'єднана паралельно. Такі теплообмінники часто використовуються для рідинних або газо-рідинних процесів. Завдяки правильному підбору діаметрів внутрішньої та зовнішньої труб можна забезпечити необхідну швидкість для обох робочих середовищ, що дозволяє досягти теплообміну високої інтенсивності.

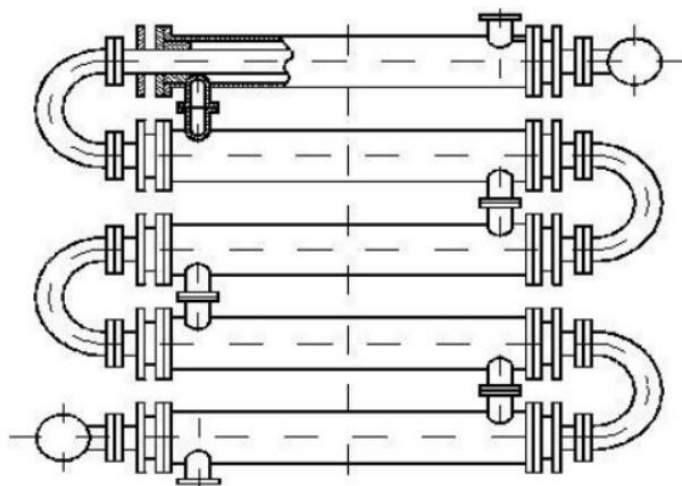


Рис. 1.6 Теплообмінник "Труба всередині труби"

Переваги двотрубного теплообмінника: високий коефіцієнт теплопередачі, здатність ефективно працювати при високому тиску для

нагріву або охолодження середовищ, простота виготовлення, монтажу та обслуговування.

Недоліки двотрубного теплообмінника: велика розмірність, висока вартість через значну витрату металу на зовнішні труби, що беруть участь у теплообміні, а також складнощі при очищенні кільцевого простору між трубами.

Кручені теплообмінники.

Поверхня нагріву кручених теплообмінників (рис. 7) складається з набору концентричних змійовиків, розташованих усередині кожуха та закріплених у спеціальних голівках.

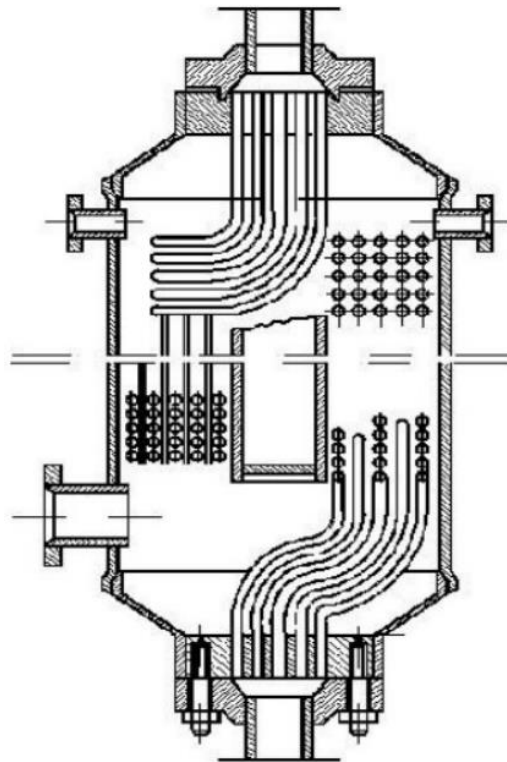


Рис. 1.7 Кручений теплообмінник

Теплоносії циркулюють як по трубному, так і по міжтрубному просторах. Кручені теплообмінники часто використовуються в апаратах високого тиску для процесів розділення газових сумішей методом глибокого охолодження. Вони відрізняються здатністю самокомпенсації, що дозволяє

їм ефективно витримувати деформації, спричинені температурними напруженнями.

Теплообмінники занурювані.

Занурювані теплообмінники складаються з плоских або циліндричних змійовиків (аналогічно до кручених), які занурені в посудину з рідким робочим середовищем. Через низьку швидкість омивання рідиною і недостатньо високу тепловіддачу зовні змійовика, ці теплообмінники мають обмежену ефективність. Вони є доцільними для використання, коли рідке робоче середовище перебуває в стані кипіння або містить механічні включення, а також у випадках, коли необхідно використовувати спеціальні матеріали для поверхні нагріву (наприклад, свинець, кераміка, ферросилід), для яких форма змійовика є найбільш зручним варіантом.

Зрошувальні теплообмінники.

Зрошувальні теплообмінники складаються з ряду прямих труб, розташованих одна над одною, які ззовні зрошуються водою (рис. 1.8). Труби з'єднуються між собою за допомогою зварювання або фланцевих з'єднань за допомогою "калачів".

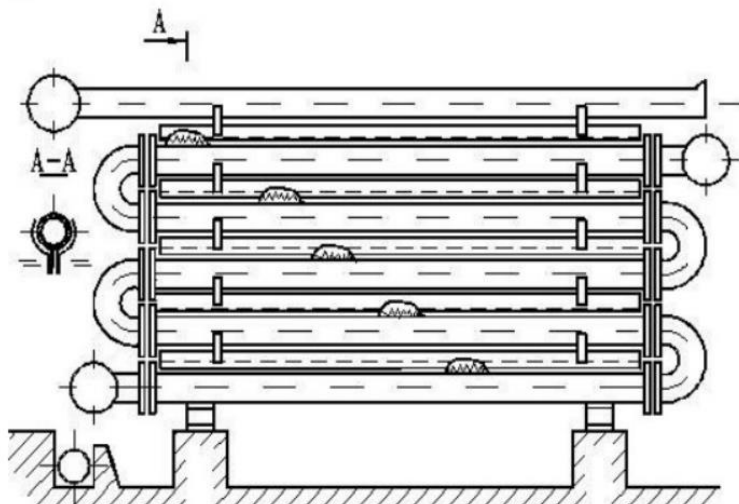


Рис. 1.8 Теплообмінник зрошувальний

Зрошувальні теплообмінники використовуються як охолоджувачі для рідин і газів, як конденсатори. Зрошувальна вода подається рівномірно з

верхньої частини через жолоб з зубчастими краями. Частина зрошувальної води випаровується, тому її витрата в таких теплообмінниках дещо нижча, ніж у холодильниках інших типів. Хоча зрошувальні теплообмінники є великими за розмірами та мають низьку інтенсивність теплообміну, вони відзначаються простотою в виготовленні та експлуатації. Їх використовують, коли потрібна невелика продуктивність, для охолодження хімічно агресивних середовищ або коли необхідно застосувати поверхню нагріву з особливих матеріалів (наприклад, для охолодження кислот використовуються апарати з кислототривкого ферросиліду, який важко обробляється).

Теплообмінники спіральні.

У спіральному теплообміннику (рис. 1.9) поверхня теплообміну складається з двох металевих листів 1 і 2, згорнутих по спіралі [4]. Внутрішні кінці листів приварені до глухої перегородки 3, а зовнішні кінці з'єднані між собою. Спіраль з обох кінців закривають плоскі кришки 4 і 5, встановлені на прокладках. Таким чином, всередині апарату утворюються два ізольованих один від одного спіральних канали (шириною 2-8 мм), по яких, як правило, теплоносій рухаються протитечією. Як показано на рис. 9, теплоносій 1 надходить через нижній штуцер і виводиться через бічний штуцер у правій кришці теплообмінника, а теплоносій 2 входить через верхній штуцер і виводиться через бічний штуцер у лівій кришці.

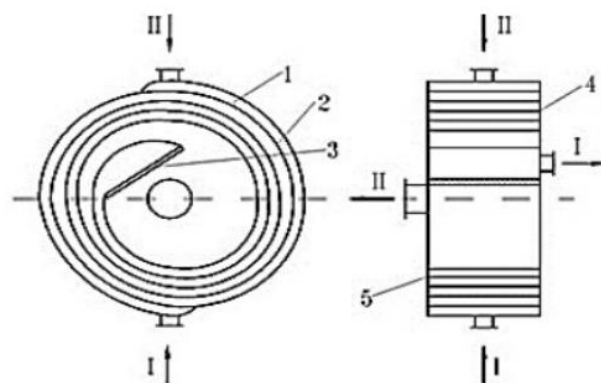


Рис. 1.9 Теплообмінник спіральний:

1 та 2 - листи, що згорнуті в спіраль; 3 - перегородка; 4 та 5 – кришки

Існують також конструкції спіральних теплообмінників перехресного потоку, які здебільшого використовуються для нагріву та охолодження газів, а також для конденсації пари. Спіральні теплообмінники відзначаються компактністю, здатні працювати при високих швидкостях теплоносіїв (для рідин до 1-2 м/с) і мають менший гідравлічний опір при рівних швидкостях середовищ порівняно з трубчастими теплообмінниками. Однак ці апарати складні у виробництві та можуть працювати при обмежених надлишкових тисках, що не перевищують $10 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ (10 ат), оскільки з товщиною листів ускладнюється намотування спіралей. Крім того, виникають труднощі в забезпеченні герметичності з'єднань між спіралями та кришками.

Пластинчасті теплообмінники.

Наразі набули поширення пластинчасті розбірні теплообмінники, які вирізняються високою інтенсивністю теплообміну, легкістю у виготовленні, компактними розмірами, низьким гідравлічним опором, а також зручністю монтажу та очищення від забруднень.

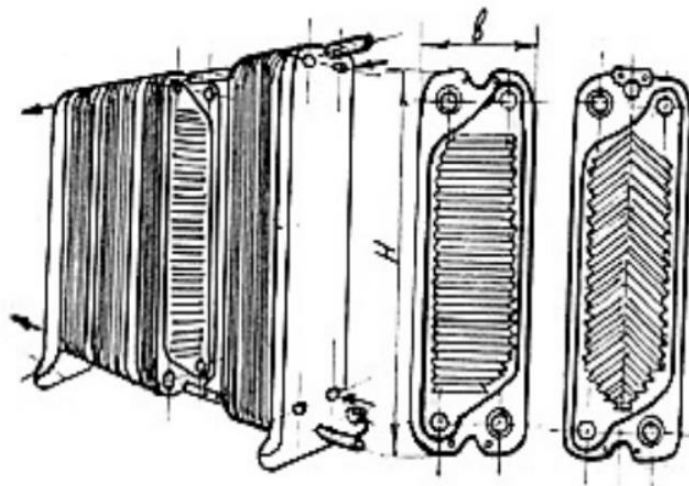


Рис. 1.10 Пластинчастий теплообмінник

Ці теплообмінники складаються з окремих, пластин, розміщених з гумовими прокладками, двох кінцевих камер, рами та стяжних болтів (рис. 1.10). Пластини виготовляються з тонколистової сталі (товщина 0,7 мм). Для

підвищення поверхні теплообміну та посилення турбулізації потоку теплоносія, проточну частину пластин виконують гофрованою або ребристою, причому гофри можуть бути горизонтальними або розташованими в ялинку (крок гофр - 11,5; 22,5; 30 мм; висота - 4-7 мм). Для герметизації конструкції до пластин прикріплюють гумові прокладки круглої або спеціальної форми. Теплоносій може рухатись або уздовж пластини, або через отвір у наступний канал.

Рух теплоносіїв у пластинчастих теплообмінниках може здійснюватися за різними схемами: прямогоду, протитечії або змішаною схемою [5]. Площа теплообмінної поверхні одного апарату коливається від 1 до 160 м², а кількість пластин — від 7 до 303. У розбірних пластинчастих теплообмінниках температура теплоносія обмежується 150°C (з урахуванням характеристик гумових прокладок), а максимальний тиск не повинен перевищувати 10 кгс/см². Потік робочого середовища в каналах, сформованих пластинами, піддається штучній турбулізації при невеликих витратах енергії. Завдяки оптимальним розмірам каналів та різним варіантам їх компоновки, процес теплопередачі можна інтенсифікувати в два–три рази порівняно з кожухотрубчастими теплообмінниками.

Принцип конструкції пластинчастого теплообмінника дозволяє використовувати різні варіанти розташування пластин для кожного робочого середовища, а також змінювати (збільшувати або зменшувати) поверхню теплообміну не тільки на етапі проектування, а й в процесі експлуатації апарату. Це дає змогу вносити корективи в схему руху потоків, а також об'єднувати на одній рамі кілька теплообмінних секцій для різних цілей, що дозволяє виконувати комплекс операцій технологічної обробки кількох робочих середовищ при різних температурних умовах в одному апараті.

Компонувальні можливості пластинчастих апаратів дають конструкторам змогу розробляти будь-які перетини для паралельних і послідовних потоків (а отже, забезпечувати оптимальні швидкості руху робочих середовищ при заданих витратах), а також підбирати для кожного

випадку найкращі умови теплообміну з максимальним використанням доступного напору. [6]

1.2. Характеристики основних конструкцій рекуперативних теплообмінників та огляд принципів їх роботи.

Рекуперативні теплообмінники передбачають безперервну теплопередачу між двома теплоносіями через роздільну теплопровідну стінку. Залежно від конструктивних особливостей та області застосування, виділяють кілька основних типів рекуперативних теплообмінників.

Трубчасті теплообмінники утворені пучком труб, що розташовані в кожусі. В цих теплообмінниках один теплоносій рухається всередині труб, а інший — у міжтрубному просторі. Можуть мати прямоточну, протиточну або перехресну схему руху теплоносіїв.

Матеріал труб: сталь, мідь, алюміній.

Теплопередаюча поверхня: гладка або з ребрами для збільшення ефективності.

Переваги: висока міцність, можливість роботи під високим тиском і температурами.

Недоліки: значні габарити, потреба в регулярному очищенні.

Застосування: хімічна промисловість, теплоенергетика (парогенератори, підігрівачі повітря).

Пластинчасті теплообмінники складаються з набору пластин із гофрованою поверхнею, між якими рухаються теплоносії. Пластини герметизовано прокладками або з'єднані методом зварювання.

Матеріал пластин: нержавіюча сталь, алюміній, титан.

Теплопередаюча поверхня: гофрована для підвищення турбулентності потоку.

Переваги: компактність, висока ефективність теплопередачі, простота очищення.

Недоліки: обмеження за робочим тиском і температурою.

Застосування: системи опалення, кондиціонування, харчова та фармацевтична промисловість.

Спіральні теплообмінники. Два канали у вигляді спіралей, утворені згорнутими в ролон плоскими пластинами. Один теплоносій рухається в одному каналі, другий — у сусідньому.

Матеріал пластин: сталь, мідь.

Переваги: високий ступінь самовентиляції, можливість роботи з в'язкими рідинами.

Недоліки: обмеження за габаритами та складність у виготовленні.

Застосування: хімічна промисловість, переробка відпрацьованих газів.

Повітряні (ребристо-трубчасті) теплообмінники виробляються з труб з ребрами (металеві пластини або дріт), через які протікає один теплоносій (газ), а другий — усередині труб.

Матеріал ребер: сталь, алюміній.

Переваги: підвищена площа теплопередачі, низький опір потоку газу.

Недоліки: потреба в захисті від забруднення та ерозії.

Застосування: теплообмін у вентиляційних системах, відведення тепла в електростанціях.

Регістрові теплообмінники – це апарати, що складаються з одного або кількох рядів труб, з'єднаних у формі регістра. Теплоносій рухається як усередині труб, так і навколо них.

Матеріал труб: сталь, чавун.

Переваги: простота конструкції, низька вартість.

Недоліки: обмежена ефективність теплопередачі.

Застосування: опалювальні системи, промислові обігрівальні установки.

Кожухотрубчасті теплообмінники. Трубчастий теплообмінник із додатковим кожухом, що забезпечує більшу площу теплопередачі. Один теплоносій проходить через трубки, другий — між ними та кожухом.

Переваги: висока стійкість до високого тиску та температур.

Недоліки: великі габарити, складність обслуговування.

Застосування: енергетика, нафтопереробка, охолодження в промислових процесах.

Ламельні теплообмінники. Складаються з труб із тонкими металевими пластинами (ламелями), які розширюють площу теплопередачі.

Матеріал пластин: алюміній, сталь.

Переваги: ефективність у роботі з повітряними потоками, компактність.

Недоліки: чутливість до забруднень.

Застосування: системи кондиціонування, теплові насоси.

Таблиця 1. Порівняння конструкцій

Типи теплообмінника	Ефективність	Робочий тиск	Робоча температура	Компактність	Вартість
Трубчастий	Середня	Високий	Висока	Низька	Висока
Поастинчастий	Висока	Середній	Середня	Висока	Середня
Спіральний	Висока	Низький	Середня	Середня	Середня
Повітряний	Середня	Низький	Низька	Середня	Низька
Регістровий	Низька	Середній	Середня	Низька	Низька
Кожухотрубчастий	Висока	Високий	Висока	Низька	Висока

Кожна конструкція має свої сильні та слабкі сторони, тому вибір типу теплообмінника визначається умовами експлуатації, характеристиками теплоносіїв та вимогами до ефективності.

Рекуперативні теплообмінники є пристроями, які здійснюють передачу теплової енергії між теплоносіями через роздільну стінку, без змішування потоків. Це один із найпоширеніших типів теплообмінників, що використовується у промислових і комунальних теплоенергетичних установках.

У рекуперативному теплообміннику теплота передається за рахунок різниці температур між теплоносіями через тверду стінку. Цей процес здійснюється на основі трьох основних механізмів теплопередачі:

- **Теплопровідність** (через стінку).
- **Конвекція** (від теплоносія до стінки).
- **Радіація** (у деяких випадках, якщо теплообмін відбувається за високих температур).

Теплопровідність.

Теплопровідність — це механізм передачі тепла через тверді тіла або рідини за рахунок руху та взаємодії молекул, атомів або електронів.

Основні принципи:

- Теплопровідність виникає, коли існує температурний градієнт (перепад температур) у матеріалі.
- Тепло передається від більш гарячих областей (вищий енергетичний рівень частинок) до холодніших (нижчий енергетичний рівень).

Формула:

Кількість тепла, що передається через стінку, можна описати законом Фур'є:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot A \quad (1.2.1)$$

де:

q — потік тепла (Вт),

λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу (Вт/м·К),

$\frac{dT}{dx}$ — градієнт температури в напрямку теплопередачі,

A — площа теплопередаючої поверхні (м²).

Фактори, що впливають на теплопровідність:

- **Матеріал стінки:** Метали (наприклад, мідь, алюміній) мають високу теплопровідність, а неметали — низьку.

- **Температура:** Для деяких матеріалів теплопровідність змінюється залежно від температури.
- **Товщина стінки:** Чим товстіша стінка, тим більший опір теплопередачі.

Конвекція.

Це передача тепла внаслідок руху теплоносія (рідини або газу). Конвекція виникає через різницю температур, що викликає зміну густини та утворення потоків.

Типи конвекції:

- **Природна (вільна) конвекція:**

Виникає через різницю густини, яка змушує нагрітий теплоносій підніматися вгору, а холодний — опускатися. Наприклад, природна циркуляція повітря біля радіатора опалення.

- **Примусова конвекція:**

Виникає через механічний рух теплоносія, наприклад, за допомогою насосів або вентиляторів. Наприклад, охолодження двигунів потоком повітря.

Формула:

Кількість тепла, що передається конвекцією, розраховується за формулою:

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (1.2.2)$$

де:

q — потік тепла (Вт),

h — коефіцієнт тепловіддачі (Вт/м²·К),

A — площа поверхні теплопередачі (м²),

ΔT — температурний перепад між поверхнею та теплоносієм (°С).

Фактори, що впливають на конвекцію:

- **Скорість руху теплоносія:** Зі збільшенням швидкості коефіцієнт тепловіддачі зростає.

- **Фізичні властивості теплоносія:** В'язкість, густина, теплоємність, теплопровідність.
- **Геометрія поверхні:** Гладкі або турбулізовані поверхні мають різний опір руху теплоносія.

Теплове випромінювання.

Теплове випромінювання — це механізм передачі енергії у вигляді електромагнітних хвиль (інфрачервоне випромінювання), який не потребує фізичного контакту або середовища.

Основні принципи:

- Тепло передається між двома тілами за рахунок різниці їх температур.
- Інтенсивність випромінювання визначається температурою тіла та його емітуючими властивостями.

Закон Стефана-Больцмана:

Потік теплової енергії, випромінюваної тілом, визначається за формулою:

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.2.3)$$

де:

q — потік тепла (Вт),

σ — стала Стефана-Больцмана (5.67×10^{-8} Вт/м²·К⁴),

ε — коефіцієнт випромінювання поверхні (безрозмірна величина, залежить від матеріалу),

A — площа поверхні (м²),

T_1, T_2 — абсолютні температури випромінювального та приймаючого тіла (К).

Особливості теплового випромінювання:

- Воно стає значним лише за високих температур.
- Залежить від властивостей поверхонь (чорне тіло випромінює найбільше).

У рекуперативних теплообмінниках одночасно діють усі три механізми теплопередачі:

- Конвекція забезпечує передачу тепла від теплоносія до поверхні стінки і від стінки до іншого теплоносія.
- Теплопровідність передає тепло через стінку між теплоносіями.
- Теплове випромінювання може бути значним у високотемпературних процесах (наприклад, у котельних установках).

Для ефективного проектування теплообмінника необхідно враховувати вплив кожного з цих механізмів та оптимізувати їхню взаємодію.

1.3. Висновок до розділу 1.

1. У першому розділі розглянуто основи теплообміну та класифікацію теплообмінників, зокрема рекуперативних типів. Було з'ясовано, що теплообмінники є ключовими елементами для забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів у промислових системах, де важливою характеристикою є здатність до зворотного обміну теплотою між теплоносіями. Рекуперативні теплообмінники, завдяки своїй конструктивній простоті та ефективності, займають важливе місце в промислових застосуваннях.

2. У процесі огляду різних конструкцій рекуперативних теплообмінників було підкреслено важливість їх конструкційних особливостей, таких як типи поверхонь, наявність ребер або турбулізаторів, що забезпечують інтенсифікацію процесу теплопередачі. Важливим є правильний вибір конструкції залежно від умов роботи, що дозволяє забезпечити оптимальні показники ефективності.

3. Загалом, знання теоретичних основ теплообміну, класифікація та характеристики конструкцій теплообмінників є основою для подальшого

дослідження можливих шляхів підвищення їх ефективності та адаптації до сучасних промислових вимог.

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ

2.1. Типові галузі застосування рекуперативних теплообмінників.

Рекуперативні теплообмінники відіграють важливу роль у багатьох галузях промисловості, де ефективність теплопередачі є ключовим фактором для оптимізації процесів. Вони дозволяють зменшити витрати енергії, підвищити продуктивність виробництва та знизити негативний вплив на екологію. Нижче наведено основні галузі, в яких застосування цих пристроїв є найбільш доцільним:

Металургія.

У металургійній промисловості рекуперативні теплообмінники застосовуються для утилізації тепла, що виділяється під час плавлення металів, нагрівання сировини або роботи печей. Це дозволяє знижувати витрати енергії на нагрівання та підвищувати загальну ефективність виробництва.

Хімічна промисловість.

У хімічних процесах, які супроводжуються великими тепловиділеннями, такі теплообмінники забезпечують повторне використання тепла для підігріву реагентів або переробки відходів. Це сприяє зменшенню експлуатаційних витрат та покращенню екологічних показників.

Енергетика та теплоенергетика.

У системах тепlopостачання та енергогенерації рекуперативні теплообмінники використовуються для утилізації тепла димових газів, нагріву води або пари. Це дозволяє підвищити ефективність роботи котлів, зменшити споживання палива та знизити викиди в атмосферу.

Харчова промисловість.

У виробничих процесах харчової промисловості, таких як пастеризація, охолодження чи сушіння, рекуперативні теплообмінники дозволяють повторно використовувати тепло технологічних потоків, забезпечуючи стабільність температурних режимів та економію ресурсів.

Вентиляційні та кондиціонерні системи.

У системах вентиляції та кондиціонування повітря рекуперативні теплообмінники забезпечують утилізацію тепла витяжного повітря для підігріву припливного. Це дозволяє значно знизити енергоспоживання будівель та підвищити комфорт у приміщеннях.

Нафтогазова промисловість.

У нафтогазовій галузі теплообмінники використовуються для охолодження або нагрівання продуктів переробки, таких як нафта, газ або хімічні сполуки. Вони забезпечують стабільність технологічних процесів і дозволяють ефективно утилізувати залишкове тепло.

Будівництво та інфраструктура.

У будівельній сфері такі системи інтегруються в енергоефективні будівлі для забезпечення оптимального мікроклімату, зниження витрат на опалення та кондиціонування.

Таким чином, рекуперативні теплообмінники є універсальними пристроями, які сприяють не лише економії енергії, але й значному покращенню екологічних характеристик багатьох галузей промисловості.

2.2. Переваги рекуперативних теплообмінників.

Рекуперативні теплообмінники є одним із ключових елементів сучасних промислових систем, спрямованих на підвищення енергоефективності та оптимізацію виробничих процесів. Їхнє використання дозволяє ефективно повторно використовувати тепло, яке інакше втрачалося б, що сприяє зниженню витрат на енергоносії та скороченню негативного

впливу на навколишнє середовище. Завдяки своїй надійності, довговічності та універсальності, рекуперативні теплообмінники широко застосовуються в різних галузях промисловості, забезпечуючи суттєві економічні й екологічні переваги. Розглянемо основні переваги використання цих пристроїв у промислових системах.

Енергоефективність: рекуперативні теплообмінники дозволяють зменшити витрати енергії, використовуючи тепло відпрацьованих газів чи рідин для нагрівання свіжих потоків.

Зниження експлуатаційних витрат: завдяки економії енергії зменшується споживання палива, що сприяє скороченню витрат на експлуатацію.

Екологічність: використання рекуператорів знижує викиди парникових газів та інших шкідливих речовин, що є важливим для дотримання екологічних норм.

Універсальність: вони підходять для роботи з різними середовищами (газами, рідинами) та у різних галузях (металургія, харчова промисловість, енергетика).

Підвищення ефективності виробничих процесів: зниження теплових втрат дозволяє досягти більш високої загальної ефективності систем.

Компактність: деякі типи рекуператорів мають компактну конструкцію, що є зручним для інтеграції у виробничі процеси.

2.3. Обмеження та виклики у використанні.

Попри значні переваги, рекуперативні теплообмінники мають певні обмеження, які впливають на їхнє застосування в промисловості. Високі початкові інвестиції, складність експлуатації у важких умовах та необхідність регулярного технічного обслуговування можуть ускладнювати впровадження цієї технології. Крім того, специфічні вимоги до роботи з агресивними або забрудненими середовищами обмежують їхню

універсальність. Розглянемо основні виклики, які можуть виникати під час використання рекуперативних теплообмінників, а також аспекти, що потребують особливої уваги під час їх вибору та експлуатації.

Початкові витрати: встановлення таких систем може потребувати значних інвестицій через високу вартість обладнання та монтажу.

Чутливість до забруднень: у промислових умовах теплообмінники можуть засмічуватися твердими частинками чи відкладеннями, що знижує їхню ефективність і потребує регулярного очищення.

Обмеження температурного режиму: не всі матеріали теплообмінників можуть витримувати дуже високі або низькі температури, що обмежує їх застосування в певних галузях.

Складність технічного обслуговування: деякі конструкції рекуператорів складно демонтувати для ремонту чи очищення, що може збільшити час простою.

Втрати енергії при недостатньому теплообміні: у випадку поганої конструкції чи експлуатації можливі втрати тепла, що знижує ефективність системи.

Ризик корозії: високотемпературні або агресивні середовища можуть викликати корозію матеріалів, особливо якщо не дотримані вимоги до вибору матеріалів.

Обмеження для нестабільних потоків: рекуперативні теплообмінники менш ефективні в системах з постійними змінами параметрів потоку (тиск, температура, витрати).

2.4. Висновок до розділу 2.

1. У розділі було розглянуто ключові аспекти використання рекуперативних теплообмінників у промисловості. Ці теплообмінники знаходять широке застосування у різних галузях, таких як хімічна, харчова,

металургійна та енергетична промисловість, завдяки своїй високій ефективності у передачі тепла між робочими середовищами.

2. Переваги рекуперативних теплообмінників, зокрема, полягають у зниженні енергетичних витрат і поліпшенні екологічних характеристик виробництва. Проте їх використання має певні обмеження, такі як висока вартість, складність в обслуговуванні та вимоги до високої герметичності конструкції.

3. Загалом, застосування рекуперативних теплообмінників вимагає детального аналізу умов експлуатації та технічних характеристик, але їх потенціал у зниженні енергоспоживання та покращенні ефективності виробничих процесів робить їх незамінними в сучасній промисловості.

РОЗДІЛ 3

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

3.1. Загальні рівняння теплопередачі та температурний напір.

Теплопередача в рекуперативних теплообмінниках описується законами термодинаміки, основними рівняннями теплопровідності, конвекції та теплового балансу.

Для будь-якого рекуперативного теплообмінника справедливий **закон збереження енергії**:

$$Q = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot (T_{1,in} - T_{1,out}) = \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot (T_{2,out} - T_{2,in}) \quad (3.1.1)$$

де:

Q — кількість переданого тепла (Вт),

\dot{m}_1, \dot{m}_2 — масові витрати теплоносіїв (кг/с),

c_1, c_2 — теплоємності теплоносіїв (Дж/кг·К),

$T_{1,in}, T_{1,out}$ — температури теплоносіїв на вході та виході з теплообмінника (°С).

Процес теплопередачі через стінку описується **рівнянням теплопровідності для стаціонарного режиму**:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{середнє}} \quad (3.1.2)$$

де:

U — коефіцієнт теплопередачі (Вт/м²·К),

A — площа теплообмінної поверхні (м²),

$\Delta T_{\text{середнє}}$ — середній логарифмічний температурний напір (°С).

У рекуперативних теплообмінниках температурний напір між потоками змінюється вздовж теплообмінника. Середнє значення визначається за формулою:

$$\Delta T_{\text{середнє}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (3.1.3)$$

де:

$$\Delta T_1 = T_{1,\text{in}} - T_{2,\text{out}},$$

$$\Delta T_2 = T_{1,\text{out}} - T_{2,\text{in}}.$$

Ця формула застосовується для теплообмінників з постійним напрямком потоків (прямоток або протиток).

3.2. Визначення коефіцієнта теплопередачі та термічних опорів. Режими течії.

Коефіцієнт теплопередачі U відображає ефективність процесу теплопередачі через поверхню, яка розділяє теплоносії. Він показує кількість теплової енергії, що передається за одиницю часу через одиницю площі поверхні при різниці температур у 1 К, і вимірюється у Вт/м²·К.

Визначення U базується на співвідношенні:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{середнє}} \quad (3.2.1)$$

де:

Q — кількість теплоти, що передається через стінку (Вт),

A — площа поверхні теплопередачі (м²),

$\Delta T_{\text{середнє}}$ — середня різниця температур між теплоносіями (°С).

Коефіцієнт теплопередачі U залежить від характеристик теплообмінника і визначається через опори теплопередачі:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (3.2.2)$$

де:

h_1, h_2 — коефіцієнти тепловіддачі з боку першого і другого теплоносія (Вт/м²·К),

δ — товщина стінки теплообмінника (м),

λ — теплопровідність матеріалу стінки (Вт/м·К).

Ця формула враховує три основних термічних опори:

Опір тепловіддачі з боку першого теплоносія:

$$R_1 = \frac{1}{h_1} \quad (3.2.3)$$

Опір теплопровідності стінки:

$$R_{\text{стінки}} = \frac{\delta}{\lambda} \quad (3.2.4)$$

Опір тепловіддачі з боку другого теплоносія:

$$R_2 = \frac{1}{h_2} \quad (3.2.5)$$

Загальний термічний опір:

$$R_{\text{загальний}} = R_1 + R_{\text{стінки}} + R_2 \quad (3.2.6)$$

Зворотна величина до загального термічного опору визначає коефіцієнт теплопередачі:

$$U = \frac{1}{R_{\text{загальний}}} \quad (3.2.7)$$

Коефіцієнти тепловіддачі h_1 і h_2 визначаються емпіричними залежностями, які враховують режим руху теплоносія, тип теплоносія (газ або рідина) і конструктивні особливості поверхні. Вони виражаються через безрозмірні критерії теплопередачі:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad (3.2.8)$$

Де:

Nu — число Нуссельта,

L — характерний розмір (довжина труби, діаметр тощо) (м),

λ — теплопровідність теплоносія (Вт/м·К).

Коефіцієнти тепловіддачі визначаються залежно від режиму течії та геометрії поверхні.

Коефіцієнт тепловіддачі h визначається з рівнянь подібності, які враховують тип течії (ламінарний або турбулентний).

Для ламінарного режиму тепловіддачу можна розрахувати за формулою:

$$Nu = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.2.9)$$

де:

$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}$ — число Нуссельта,

$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$ — число Рейнольдса,

$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}$ — число Прандтля.

ρ — густина теплоносія (кг/м³),

v — швидкість теплоносія (м/с),

μ — динамічна в'язкість (Па·с),

c — теплоємність (Дж/кг·К).

Для турбулентного режиму використовується інше рівняння:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.2.10)$$

Для підвищення ефективності рекуперативного теплообмінника необхідно зменшити термічний опір і збільшити коефіцієнт тепловіддачі. Це досягається через:

- **Рибристі поверхні:** збільшують ефективну площу теплопередачі A , підвищуючи U .

- **Гофровані пластини:** сприяють утворенню турбулентного потоку, що підвищує h_1 і h_2 .
- **Теплопровідні матеріали:** вищі значення λ зменшують $R_{\text{стінки}}$.

3.3. Висновки до розділу 3.

В розділі були описані процеси теплопередачі у рекуперативних теплообмінниках як аналітично, так і чисельно, що є основою для подальшого моделювання та оптимізації.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

4.1. Інтенсифікація процесів теплопередачі: використання турбулізаторів і ребристих поверхонь.

Інтенсифікація процесів теплопередачі є важливою складовою у вдосконаленні ефективності теплообмінників. Для підвищення коефіцієнта теплопередачі в рекуперативних теплообмінниках використовуються різноманітні конструктивні рішення, серед яких важливе місце займають **турбулізатори** та **ребристі поверхні**. Обидва ці елементи значно впливають на характер теплопередачі та можуть значно знизити енергетичні витрати в промислових системах.

Турбулізатори.

Турбулізатори — це елементи, які додаються до каналу теплообмінника для створення або підсилення турбулентності в потоці теплоносія. Турбулентний потік має велику кількість мікроскопічних вихорів, що збільшує ефективність переносу тепла між поверхнею теплообмінника та теплоносієм. Вони можуть бути виконані у вигляді пластин, стержнів або спеціальних форм, які вносять збурення у потік.

Переваги використання турбулізаторів:

Покращення теплопередачі: Турбулентний потік значно збільшує коефіцієнт теплопередачі через поліпшення змішування теплоносія і підвищення рівномірності температури.

Зменшення теплових опорів: Підвищення турбулентності дозволяє забезпечити більш ефективний теплообмін при порівняно малих швидкостях потоку, що знижує енергетичні витрати на перекачування теплоносія.

Адаптивність до різних умов: Турбулізатори можуть бути адаптовані до різноманітних конструкцій та типів теплообмінників, що робить їх універсальними у використанні.

Недоліки:

Збільшення гідравлічних втрат: Введення турбулізаторів може призвести до підвищення опору потоку, що вимагає збільшення енерговитрат на перекачування теплоносія.

Високі вимоги до матеріалів: Турбулізатори можуть бути піддані абразивному зносу, що вимагає використання більш міцних матеріалів.

Рибристі поверхні.

Рибристі поверхні — це спеціальні конструкції, що складаються з ребер або пластин, які додаються до стінок теплообмінника з метою збільшення поверхні контакту з теплоносієм. Вони дозволяють значно збільшити площу поверхні, доступної для теплообміну, без значного збільшення розмірів самого теплообмінника.

Переваги використання ребристих поверхонь:

Збільшення площі теплообміну: Ребра на поверхні теплообмінника суттєво збільшують площу, доступну для контакту з теплоносієм, що підвищує ефективність теплопередачі.

Покращення турбулентності: Ребра створюють мікробурення в потоці теплоносія, що сприяє розвитку турбулентності та поліпшенню теплообміну.

Компенсація втрат: Рибристі поверхні можуть компенсувати втрати тепла при малих швидкостях потоку, забезпечуючи достатній рівень теплопередачі при збереженні компактних розмірів теплообмінника.

Недоліки:

Збільшення опору потоку: Наявність ребер підвищує гідравлічний опір потоку, а це може привести до необхідності використання потужніших насосів або вентиляторів для циркуляції теплоносія.

Складність виготовлення та обслуговування: Ребристі поверхні можуть бути складними у виробництві та обслуговуванні, особливо при використанні в агресивних середовищах.

Комбінація турбулізаторів і ребристих поверхонь

Одним із ефективних підходів є **комбінація турбулізаторів і ребристих поверхонь** в одному теплообміннику. Така комбінація дозволяє досягти одночасного підвищення площі теплообміну і створення додаткової турбулентності, що значно поліпшує процеси теплопередачі при знижених гідравлічних витратах.

Переваги комбінованого підходу:

Комплексний ефект інтенсифікації теплообміну: Комбінація цих двох елементів дає синергічний ефект, що дозволяє досягти найкращих показників теплопередачі при порівняно низьких енергетичних витратах.

Підвищення експлуатаційної ефективності: Підвищення інтенсивності теплообміну дозволяє зменшити розміри теплообмінника, що важливо для компактних і економічних систем.

4.2. Оптимізація конструкції стінок (матеріали з високою теплопровідністю, багат шарові стінки).

Оптимізація конструкції стінок рекуперативних теплообмінників є важливою складовою для підвищення ефективності теплообміну та зниження енергетичних витрат у промислових процесах. Один із напрямків такої оптимізації полягає у використанні **матеріалів з високою теплопровідністю та багат шарових конструкцій стінок**, які забезпечують більш інтенсивний теплообмін та дозволяють покращити загальну ефективність роботи теплообмінника.

Матеріали з високою теплопровідністю.

Матеріали з високою теплопровідністю є основою для конструкцій стінок теплообмінників, оскільки їх здатність швидко передавати тепло

дозволяє знизити термічний опір і покращити ефективність теплообміну. Для забезпечення високої теплопередачі застосовуються різні матеріали, серед яких особливо виділяються:

Металеві матеріали:

Мідь: Мідь має одну з найвищих теплопровідностей серед металів (приблизно 400 Вт/м·К), що робить її ідеальним матеріалом для конструкцій теплообмінників, де важливе швидке та ефективне передавання тепла.

Алюміній: Алюміній також має високу теплопровідність (приблизно 205 Вт/м·К) і є більш легким і економічним матеріалом порівняно з міддю. Завдяки своїй легкості та хорошій теплопередачі він широко використовується в кондиціонерах і автомобільних теплообмінниках.

Нержавіюча сталь та сплави: Для високотемпературних застосувань використовуються спеціальні сплави з підвищеною стійкістю до корозії та зношування. Хоча теплопровідність таких матеріалів нижча, ніж у міді, їх довговічність і стійкість до агресивних середовищ часто компенсують цей недолік.

Композитні матеріали:

Графіт та кераміка: У деяких випадках для специфічних застосувань можуть використовуватися графітові або керамічні матеріали, які мають високу теплопровідність при забезпеченні високої стійкості до високих температур та агресивних середовищ.

Вуглецеві волокна: Застосовуються в спеціалізованих теплообмінниках, де важливо поєднати високу теплопровідність і малу вагу.

Наноматеріали:

Нанотехнології: Використання наноматеріалів для створення спеціальних теплообмінних поверхонь набуває популярності завдяки високим термічним властивостям і можливості оптимізації конструкцій з мінімальними витратами.

Переваги використання матеріалів з високою теплопровідністю:

Підвищена ефективність теплообміну.

Зниження термічних опорів, що дозволяє скоротити розміри теплообмінника.

Зменшення енергетичних витрат на передачу тепла.

Недоліки:

Вартість високоякісних матеріалів може бути високою (особливо для міді і спеціальних сплавів).

Необхідність застосування корозійно-стійких матеріалів для тривалого використання в агресивних середовищах.

Багатошарові стінки.

Багатошарові конструкції стінок теплообмінників є ще одним важливим напрямком оптимізації, що дозволяє комбінувати різні матеріали для досягнення найкращих показників теплообміну, зниження теплових втрат і підвищення механічної міцності.

Принцип багатошарової конструкції

Багатошарові стінки складаються з кількох шарів матеріалів, кожен з яких виконує певну функцію:

Внутрішній шар — матеріал з високою теплопровідністю для забезпечення ефективної передачі тепла.

Проміжні шари — можуть бути з матеріалів з більш низькою теплопровідністю або спеціальних ізоляційних матеріалів для зменшення теплових втрат або зниження теплових опорів.

Зовнішній шар — захисний шар, який може бути виготовлений із матеріалу з високою стійкістю до механічних навантажень, корозії або високих температур.

Приклад застосування багатошарових стінок

Композитні теплообмінники: Для роботи в умовах підвищених температур і агресивних середовищах можуть використовуватись багатошарові теплообмінники з внутрішнім шаром з високої теплопровідності (наприклад, мідь або алюміній) і зовнішнім шаром з корозійностійкого матеріалу (нержавіюча сталь або титан).

Теплообмінники з пористими шарами: Для покращення теплообміну можна використовувати пористі матеріали або багатошарові конструкції з поєднанням матеріалів, що сприяють кращому змішуванню потоку теплоносія.

Переваги багатошарових стінок:

Покращена теплопередача завдяки оптимальному поєднанню матеріалів з різними теплопровідними властивостями.

Зменшення механічних навантажень на матеріали завдяки розподілу температури та забезпеченню більшої стійкості конструкції.

Підвищена термостійкість і корозійна стійкість за рахунок зовнішніх захисних шарів.

Недоліки:

Більш складна і дорога технологія виготовлення теплообмінників.

Може виникнути складність в обслуговуванні і ремонті, якщо використовуються матеріали з різними властивостями.

4.3. Використання сучасних теплоносіїв із покращеними характеристиками.

Вибір теплоносія є критичним аспектом при проектуванні та експлуатації теплообмінних систем, особливо для рекуперативних теплообмінників, де ефективність теплопередачі безпосередньо залежить від властивостей теплоносія. Сучасні теплоносії з покращеними характеристиками дозволяють значно підвищити ефективність теплопередачі, зменшити енергетичні витрати та знизити екологічний вплив. У цьому контексті виділяються новітні теплоносії, які включають не тільки традиційні рідини, але й гази, суміші та нанорідини, які мають поліпшені властивості.

Типи сучасних теплоносіїв

Рідини:

Синтетичні та екологічно чисті рідини:

Гліколі (етиленгліколь, пропіленгліколь): Є найпоширенішими рідинами, використовуваними в теплообмінних системах, особливо в умовах, де є необхідність в захисті від замерзання. Пропіленгліколь є більш екологічним і менш токсичним, що робить його перспективним для систем опалення і охолодження.

Мінеральні масла та діелектричні рідини: Ці рідини використовуються для теплопередачі в енергетичних і високотехнологічних системах, таких як трансформатори та інші елементи з високими вимогами до теплообміну.

Нанорідини:

Нанофлюїди (нанорідини): Сучасні дослідження показують, що додавання наночасток (наприклад, оксидів металів, вуглецевих нанотрубок або графену) до рідин, таких як вода або масло, може значно покращити їх теплопередачу. Нанорідини мають кращу теплопровідність завдяки високій поверхневій активності наночасток, що збільшує ефективність теплообміну, не змінюючи значно властивості рідини.

Приклади нанорідин: водні суспензії оксидів металів (алюмінію, міді), вуглецеві нанотрубки, графенові наночастки, що дозволяє створити більш ефективні теплообмінні системи при меншій кількості використаного теплоносія.

Газові теплоносії:

Вуглекислий газ (CO₂):

CO₂ є перспективним теплоносієм для високотемпературних рекуперативних теплообмінників завдяки його високій теплоємності, нетоксичності, низьким викидам в атмосферу та доступності. Він також не є горючим і має хорошу здатність до теплообміну при високих температурах, що робить його підходящим для використання в енергетичних установках.

Гелієвий газ:

Гелій має високу теплопровідність і стабільність при високих температурах, що робить його ефективним теплоносієм для високотемпературних теплових процесів, таких як в ядерних реакторах або в спеціалізованих промислових процесах.

Гідрофторвуглеці (HFC) та перфторвуглеці (PFC):

Ці гази використовуються в якості теплоносіїв у холодильних системах завдяки своїй здатності до великої теплопередачі при низьких температурах. Вони є альтернативами для хлорфторвуглеців, оскільки мають менший вплив на озоновий шар.

Поєднання рідин і газів:**Гібридні теплоносії:**

У деяких випадках використовуються суміші рідких і газоподібних теплоносіїв, що дозволяє комбінувати переваги обох типів. Такі суміші можуть працювати в різних діапазонах температур і забезпечувати високу ефективність теплообміну при зниженому гідравлічному опорі.

Покращені характеристики сучасних теплоносіїв**Вища теплопровідність:**

Теплоносії з покращеними властивостями мають значно більшу теплопровідність порівняно з традиційними рідинами, що дозволяє зменшити розміри теплообмінників і підвищити їх ефективність. Наприклад, наноріди мають теплопровідність в кілька разів вищу, ніж звичайні рідини.

Розширений температурний діапазон:

Сучасні теплоносії мають більший робочий температурний діапазон, що дозволяє використовувати їх у більш складних умовах, таких як високі температури в енергетичних системах або знижені температури в холодильних установках.

Знижений рівень викидів і токсичності:

Сучасні теплоносії, особливо екологічно чисті рідини та гази (наприклад, CO₂, пропіленгліколь), мають значно менший вплив на

навколишнє середовище і здоров'я людини. Це важливо для створення сталих і безпечних систем.

Стабільність і довговічність:

Покращені теплоносії мають високу хімічну стабільність і корозійну стійкість, що знижує витрати на обслуговування та збільшує довговічність обладнання, особливо при високих температурах і агресивних середовищах.

Переваги використання сучасних теплоносіїв в рекуперативних теплообмінниках

Збільшення ефективності теплообміну: Сучасні теплоносії, такі як наноріди або спеціалізовані гази, мають високу теплопровідність, що дозволяє зменшити розміри теплообмінника і покращити його ефективність.

Зниження енергетичних витрат: Завдяки поліпшеним теплофізичним властивостям можна досягти високих коефіцієнтів теплопередачі при зниженні енергетичних витрат на перекачування теплоносія.

Екологічна безпека: Використання екологічно чистих теплоносіїв, таких як CO₂ або пропіленгліколь, знижує шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Універсальність і адаптивність: Сучасні теплоносії можуть бути адаптовані до різних умов експлуатації, таких як високі або низькі температури, що дозволяє використовувати їх у більш широкому спектрі промислових і енергетичних застосувань.

4.4. Застосування автоматизованих систем керування температурними режимами.

Автоматизовані системи керування температурними режимами в рекуперативних теплообмінниках відіграють ключову роль у підвищенні ефективності теплообміну, зменшенні енергетичних витрат та забезпеченні стабільної роботи системи. Використання автоматизації в теплотехнічних процесах дозволяє адаптувати температуру та потоки теплоносіїв до змінних

умов експлуатації, що особливо важливо для промислових процесів, де коливання температур можуть вплинути на якість продукції чи ефективність виробництва.

Принципи роботи автоматизованих систем керування температурними режимами

Автоматизовані системи керування температурними режимами в рекуперативних теплообмінниках базуються на принципі регулювання температури теплоносіїв і потоків в режимі реального часу для досягнення оптимальних умов теплообміну. Ключові елементи таких систем включають:

Сенсори і датчики.

Температурні датчики: Для моніторингу температури теплоносіїв використовуються високоточні температурні сенсори (термопари, терморезистори), які дають точну інформацію для регулювання системи.

Датчики потоку: Ці датчики контролюють швидкість потоку теплоносія, що дозволяє коригувати режим теплообміну в залежності від поточних потреб системи.

Контролери та програмовані логічні контролери (PLC).

PLC (Програмовані логічні контролери): Вони використовуються для обробки сигналів від сенсорів і управління виконуваними елементами (наприклад, вентилями, насосами, нагрівальними елементами) на основі заданих параметрів. PLC забезпечують гнучкість в налаштуваннях та інтеграцію з іншими системами управління.

PID-регулятори: Це один з найбільш поширених типів контролерів, що використовуються для підтримки стабільної температури в межах заданих значень. Регулятори PID (пропорційно-інтегрально-диференціальний) дозволяють мінімізувати відхилення температури від бажаного значення, компенсуючи збурення та зміни в умовах роботи системи.

Виконавчі механізми.

Регулювання клапанів і насосів: Автоматизовані системи можуть коригувати потік теплоносія або управляти його температурою через регулювання клапанів (для рідин) або вентиляційних елементів (для газів).

Нагрівальні елементи або охолоджувачі: В залежності від вимог до температури, автоматизовані системи можуть вмикати або вимикати нагрівальні елементи або регулювати інші пристрої, щоб підтримувати необхідний температурний режим.

Переваги застосування автоматизованих систем керування температурними режимами

Підвищення ефективності теплообміну.

Автоматичне коригування температури і потоків теплоносіїв дозволяє підтримувати оптимальний температурний режим для кожного етапу процесу, що максимізує ефективність теплообміну і мінімізує теплові втрати. Це забезпечує зниження витрат енергії та зменшує потребу в додаткових енергетичних ресурсах.

Зниження енергетичних витрат.

Оскільки автоматизовані системи регулюють температуру та потік теплоносія в реальному часі, вони забезпечують збереження енергії, працюючи на оптимальних налаштуваннях. Це дозволяє знизити витрати на опалення, охолодження та підтримку температурних режимів у різних частинах теплообмінного процесу.

Підвищення стабільності роботи.

Автоматизація забезпечує більш точне та стабільне підтримання заданих температурних режимів. Система миттєво реагує на зміни в умовах роботи, що знижує ймовірність виникнення температурних коливань або перегріву/перехолодження теплоносіїв, що може сприяти зниженню ефективності чи пошкодження обладнання.

Підвищення безпеки та зниження людського фактору.

Автоматизовані системи можуть виявляти небезпечні умови (наприклад, перегрів або недостатній потік теплоносія) і відразу активувати аварійні протоколи, такі як вимкнення обладнання або сигналізація про необхідність втручання оператора. Це значно знижує ризик аварій та поломок.

Типи автоматизованих систем керування температурними режимами

Інтелектуальні системи управління (ICS).

Інтелектуальні системи управління використовують передові алгоритми для адаптації до змінних умов в процесі теплообміну. Вони можуть включати машинне навчання для оптимізації налаштувань і забезпечення максимального коефіцієнта корисної дії (ККД) в реальному часі.

Модульні системи управління.

Ці системи складаються з кількох окремих блоків, кожен з яких керує певною частиною теплообмінного процесу (температурою, потоком теплоносія, тиском). Такі системи можна масштабувати в залежності від розміру і складності установки.

Системи на основі хмарних технологій.

Системи управління, інтегровані з хмарними технологіями, дозволяють віддалено моніторити і коригувати роботу теплообмінників з будь-якої точки світу, що дає можливість проводити діагностику і аналіз даних безпосередньо в процесі експлуатації.

4.5. Порівняння турбулізації та використання вторинних випромінювачів в каналах рекуперативних трубчастих теплообмінників.

Сучасні трубчасті теплообмінники зазвичай оснащуються внутрішніми вставками, які покращують теплообмін усередині труб. При порівняно низьких температурах процесів основна функція таких вставок або пристінних пристроїв, що підвищують шорсткість поверхонь чи викликають регулярні та нерегулярні збурення течії, полягає у турбулізації пограничного шару та посиленні конвективного теплообміну.

За умов підвищених або дуже високих температур первинного теплоносія (до 1000 °С і більше) основна роль вставок змінюється — вони слугують додатковими адіабатними поверхнями, які поглинають тепло випромінюванням від теплообмінних труб і передають його конвекцією повітрю або іншому теплоносію.

Використання вторинних випромінювачів у каналах рекуперативних теплообмінників є ефективним способом підвищення інтенсивності теплообміну. Цей підхід застосовується як для повітряних потоків (у трубчастих конвективних рекуператорах), так і для потоків продуктів згоряння (у радіаційних щілинних і кошикових рекуператорах).

На відміну від методів інтенсифікації, які передбачають встановлення турбулізаторів (ефективність яких супроводжується значним зростанням гідравлічного опору), вторинні випромінювачі збільшують площу теплообміну за допомогою елементів простої геометрії, забезпечуючи лише помірне підвищення опору тракту. [19]

Таблиця 2. Порівняння турбулізації та вторинних випромінювачів

Критерій	Турбулізація	Вторинні випромінювачі
Механізм підвищення ефективності	Підсилення конвективної теплопередачі за рахунок створення турбулентного потоку.	Посилення теплового випромінювання через встановлення додаткових випромінювальних поверхонь.
Ефективність	Найбільш ефективна для низько- і середньотемпературних режимів, де основним механізмом передачі тепла є конвекція.	Максимально ефективна при високотемпературних режимах (понад 300°C), де випромінювання стає домінуючим механізмом теплопередачі.
Гідравлічні втрати	Значно підвищуються через збільшення опору потоку в каналах.	Практично не впливають на гідравлічний опір потоку.
Конструктивна складність	Простий у реалізації: достатньо додати турбулізуючі елементи (ребра, спіралі, виступи).	Складніший у виготовленні: потребує додаткових випромінювальних поверхонь із специфічними властивостями.
Вартість	Низька вартість матеріалів і виготовлення.	Вища вартість через необхідність розробки спеціальних матеріалів і складного виготовлення.
Довговічність	Можливе зношування через підвищену турбулентність і ерозію стінок каналів.	Більш довговічні за умови правильного вибору матеріалів.
Температурний діапазон	Ефективний у низько- і середньотемпературних системах.	Ефективний у високотемпературних системах.
Складність обслуговування	Легше чистити, але можливе накопичення забруднень у турбулізуючих елементах.	Менш схильні до забруднень, але складніше в очищенні через складну конструкцію.
Сумісність із існуючими системами	Може бути легко інтегрований у вже встановлені системи.	Вимагає модифікації конструкції або повної заміни.

Переваги	<ul style="list-style-type: none"> - Простота впровадження. - Підходить для широкого діапазону робочих умов. 	<ul style="list-style-type: none"> - Висока ефективність при роботі у високотемпературних середовищах. - Менші втрати енергії на перекачування.
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> - Значне підвищення гідравлічних втрат. - Може викликати ерозію. 	<ul style="list-style-type: none"> - Висока початкова вартість. - Складність у виготовленні та впровадженні.

4.6. Висновки до розділу 4.

1. Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників вказує на важливі напрямки для інтенсифікації процесів теплопередачі та оптимізації їх конструкцій. Використання турбулізаторів і ребристих поверхонь, поряд із застосуванням сучасних матеріалів з високою теплопровідністю, дозволяє значно підвищити ефективність теплообміну. Проте важливо враховувати, що ці інноваційні рішення можуть призводити до підвищення гідравлічного опору, що вимагає обґрунтованої оптимізації параметрів системи.

2. Крім того, впровадження сучасних теплоносіїв з покращеними характеристиками, таких як нанорідни та екологічно чисті рідини, є важливим кроком до покращення теплопередачі та зниження енергетичних витрат. Використання спеціалізованих газів та матеріалів дозволяє досягти більш високих показників ефективності та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, що робить цей напрямок перспективним для розвитку теплотехнічної галузі.

3. Впровадження автоматизованих систем керування температурними режимами є важливим елементом для забезпечення стабільності та безпеки роботи рекуперативних теплообмінників. Використання сенсорів і інтелектуальних алгоритмів дозволяє точніше регулювати параметри

системи, знижуючи енергетичні витрати та підвищуючи ефективність процесів.

4. Нарешті, порівняння турбулізації і вторинних випромінювачів у різних температурних діапазонах підтверджує, що для низько- та середньотемпературних систем ефективніше використовувати турбулізацію, а для високотемпературних — вторинні випромінювачі. Комбінований підхід, що поєднує обидва методи, може бути оптимальним у тих випадках, коли конструктивні та економічні умови дозволяють його реалізувати.

5. Таким чином, комплексний підхід до інтенсифікації процесів теплопередачі, оптимізації конструкцій та використання інноваційних технологій є ключем до підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників та забезпечення їх економічної доцільності в умовах сучасного виробництва.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень було розглянуто основні теоретичні аспекти теплообміну, класифікацію та конструкційні особливості рекуперативних теплообмінників. Отримане нове вирішення **актуального наукового завдання** встановлення закономірностей процесів, що протікають у рекуперативних теплообмінниках.

1. У процесі аналізу різних типів рекуперативних теплообмінників було виявлено, що інтенсифікація процесів теплопередачі шляхом використання турбулізаторів та ребристих поверхонь має значний вплив на підвищення їх ефективності. Однак, ці конструктивні рішення можуть призвести до збільшення гідравлічного опору, що вимагає ретельного балансу між ефективністю теплообміну та енергетичними витратами на прокачування теплоносіїв.

2. Зроблено акцент на оптимізації конструкцій стінок теплообмінників, зокрема використання матеріалів з високою теплопровідністю та багатошарових конструкцій, що дозволяє знизити термічні опори та покращити теплообмін. Використання сучасних теплоносіїв з покращеними характеристиками та автоматизованих систем керування температурними режимами також є перспективними напрямками для підвищення ефективності роботи рекуперативних теплообмінників. Це дозволяє досягти значного зниження енергетичних витрат, підвищення продуктивності та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

3. Порівняння турбулізації та використання вторинних випромінювачів у каналах рекуперативних трубчастих теплообмінників показало, що оптимальний вибір технології залежить від температурного режиму системи. Для низько- та середньотемпературних систем ефективніше використовувати турбулізацію, а для високотемпературних – вторинні випромінювачі.

Комбіноване використання цих методів може дати найкращі результати, якщо це дозволяють конструктивні та економічні умови.

4. Таким чином, підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників потребує комплексного підходу, включаючи інтенсифікацію теплообміну, оптимізацію конструкцій, застосування нових матеріалів і теплоносіїв, а також впровадження автоматизованих систем управління. Ці заходи дозволять значно зменшити енергетичні витрати та підвищити ефективність промислових процесів у сучасних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балан С. В. Інтенсифікація теплопередачі в теплообмінниках. — Одеса: Астропринт, 2016. — 270 с.
2. Баран Є.Л. "Основи теплопередачі та її використання у промисловості" — Львів: Видавництво ЛНУ ім. Івана Франка, 2017.
3. Бухміров В.В. Тепловий розрахунок рекуперативного теплообмінного апарата [Текст] / В.В. Бухміров, Д.В. Ракутина. - Л.: Машинобудування, 2013. - 124 с.
4. Василенко С. М. Теплообмінні апарати. Основи розрахунку та вибору: [навч. посіб. для студ. техн. спец.] / С. М. Василенко, В. В. Шутюк. — Київ УДУХТ, 2000. — 36 с.
5. Галушак А.В., Чайковський Р.П. "Теплогідравлічні характеристики модернізованих теплообмінників". Енергозбереження та теплофізика, 2020, №4, с. 32–40.
6. Голінко І. М. Моделювання та оптимізація систем керування / І.М. Голінко, А. І Кубрак. — Кам'янець–Подільський : Буйницький, 2012. — 262 с.
7. Гузій В.М., Шуляренко Д.В. "Теплообмінні апарати: теорія, розрахунок, проектування" — Київ: Видавництво НТУУ "КПІ", 2019.
8. Гуцин М. А., Савельєв Є. С. Конструкції та технології теплообмінного обладнання. — Харків: Техніка, 2018. — 290 с.
9. Зеленюк М.В. "Оптимізація конструкції рекуперативних теплообмінників у контексті енергозбереження". Вісник НТУУ "КПІ". Серія енергозбереження та екологія, 2021, №1, с. 12–18.
10. Іванов В. В., Петрова О. С. Теплообмін і теплообмінники. — Київ: Наукова думка, 2015. — 320 с.

- 11.Константинов С. М. Теплообмін : підруч. для студ. вищ. техн. навч. закл. / С. М. Константинов ; М-во освіти і науки України, Нац. тех. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – Київ : Політехніка : Інрес, 2005. – 304с.
- 12.Кравченко С.М., Дробик Ю.В. "Аналіз використання турбулізаторів у каналах теплообмінників". Наукові записки НТУ "ХПІ", 2021, №3, с. 67–72.
- 13.Левченко Б. О. Тепло- і масообмінні апарати і установки промислових підприємств : [навч. посіб. студ. техн. спец] / Б. О. Левченко [та ін.]. – Харків : ХГПУ, 1999. – Ч.1. – 420 с.
- 14.Павлов О.В. "Енергоефективність промислового обладнання" – Харків: Видавництво ХНУРЕ, 2021.
- 15.Романюк Л.О., Соколовський Б.М. "Теплотехніка: навчальний посібник" – Київ: КНЕУ, 2018
- 16.Ружинська Л.І. Проектування реакторів біотехнологічних та фармацевтичних виробництв. Навч. посібник/ Укладачі: Л.І. Ружинська, І.А. Буртна, В.М. Поводзинський, В.Ю. Шибецький - К.: НТУУ «КПІ», 2014-130 с.
- 17.Сокирко В.М., Бойко М.М. "Підвищення ефективності рекуперативних теплообмінників для систем вентиляції". Вісник Київського політехнічного інституту. Серія теплотехніка, 2020, №2, с. 45–53.
- 18.Сорока Б.С., Воробйов Н.В., Кудрявцев В.С., Згурський В.А. Комплексний аналіз робочого процесу у високотемпературному рекуператорі // Енерготехнології і ресурсозбереження, №4, 2012. – С.71 – 80.
- 19.Сорока Б.С., Воробйов Н.В., Згурський В.А., Кудрявцев В.С. Теплообмін і опір в високотемпературному рекуператорі // XIV – К.: АНК «Інститут тепло- и масообміну ім. А.В.Ликова» НАНБ: 2012.– С. 148 – 151.
- 20.Співак, О. Ю. Тепломасообмін. Методи інтенсифікації: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного)

- використання [Електронний ресурс] / О. Ю. Співак., Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 112 с
- 21.Таран І.П., Жученко О.О. "Дослідження ефективності вторинних випромінювачів у промислових теплообмінниках". Промислова теплотехніка України, 2019, №1, с. 90–98.
- 22.Ресурс: База даних Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського <http://www.nbuv.gov.ua>.
- 23.Ресурс: Вісник українських технічних університетів Журнали Київського, Львівського та Харківського політехнічних інститутів часто публікують дослідження в цій галузі.
- 24.Хейфец Р.Г., Куваєв Г.Н. Теплоенергетика металургійних заводів. Нч. посіб. – Д.:НМетАУ, 2000. - 66с.
- 25.Патент України на винахід 101124, МПК: F23L 15/04; F27D 17/00. Рекуператор. Сорока Б.С., Шандор П., Кудрявцев В.С., Воробьев Н.В. / заявник та патентовласник Інститут газу НАНУ. № а201201938 Заявл. 21.02.2012; Опубл. 25.02.2013, Бюл. 4, 2013.