

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Пилипчак Наталія Олександрівна

група ЗТЕП – 23м

УДК:536.27:662.957

**ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

Спеціальність 144 Теплоенергетика

Кваліфікаційна робота магістра

Керівник
Крадожон Сергій Олександрович
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
Пилипчак Наталії Олександрівни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження шляхів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників.

Затверджена наказом по університету від «05» липня 2024р. № 602с

2. Термін здачі студентом закінченої роботи «1» грудня 2024р.

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їй належить розробити)

Розділ 1 Аналіз теплообмінних апаратів, що застосовується на підприємствах, та їх особливості

Розділ 2 Порівняльні дослідження способів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників

Розділ 3 Використання регенеративних теплообмінників для утилізації теплоти перехідних процесів ТСК.

Розділ 4 Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності регенеративних теплообмінників

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

Рис. 1.1. Принцип роботи роторного регенератора.

Рис. 1.2. Принципова схема припливно-витяжної вентиляції з регенеративним теплообмінником - утилізатором роторного типу.

Рис. 1.3. Принципова схема системи кондиціонування повітря з утилізацією теплоти вентиляційних викидів в регенеративному теплообміннику роторного типу.

- Рис. 1.4. Схема регенеративного теплообмінника з насадкою, що обертається.
 Рис. 1.5. Схема регенератора з нерухомою насадкою.
 Рис. 1.6. Схема пристрою регенеративних теплообмінників із рухомою насадкою.
 Рис. 1.7. Схема теплообмінника з рухомих твердим проміжним теплоносієм.
 Рис. 1.8. Деякі типи регенераторів.
 Рис. 3.1. Схема теплових потоків ТСК із регенерацією теплоти.
 Рис. 3.2. Теплова схема високотемпературного теплотехнологічного комплексу з інтеграцією ТСК.
 Рис. 4.1. Типи насадок регенеративних теплообмінників нагрівальних та плавильних печей.
5. Дата видачі завдання 07.08.2024р.

Керівник _____
 (підпис)

Завдання прийняв до виконання _____
 (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
 виконання атестаційної роботи магістра

№№ п	Назва етапів атестаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Розділ 1 Аналіз теплообмінних апаратів, що застосовується на підприємствах, та їх особливості	Серпень	
2	Розділ 2 Порівняльні дослідження способів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників	Вересень	
3	Розділ 3 Використання регенеративних теплообмінників для утилізації теплоти перехідних процесів ТСК.	Жовтень	
4	Розділ 4 Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності регенеративних теплообмінників	Листопад	

Студент _____
 (підпис)

Керівник _____
 (підпис)

Допущено до перевірки на академічну доброчесність.

Керівник _____
 (підпис)

Завідувач кафедри _____
 (підпис)

Анотація

На виробництві основна частина теплової енергії трансформується в різних теплообмінних апаратах. Навіть незначним підвищенням енергетичної ефективності теплоенергетичних установок, можна отримати значну економію палива, зниження собівартості продукції. Прагнення заощаджувати енергію і матеріали, облік економічних обставин, стимулюють створення більш ефективного теплообмінного обладнання..

У магістерській дисертації було проведено дослідження шляхів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників через конструктивні вдосконалення, використання нових матеріалів, інтенсифікацію теплопередачі, оптимізацію режимів роботи та застосування сучасних технологій для контролю і моніторингу процесів.

Розроблено методику та алгоритм розрахунку теплообмінних апаратів для випадків, коли в теплоакумуючих елементах регенераторів виготовлені матеріали з фазовим переходом. Такі матеріали є перспективними для створення системи регенерації теплоти перехідних процесів термосорбційних компресорів, спрямованих на підвищення їх енергоефективності.

Проаналізовано сучасні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей, можна зробити наступні висновки. Найбільш ефективними виявилася насадка Ліхте з вогнетривкої цегли та насадка корзинового типу, виконана з плавнелитих формових елементів.

Ключові слова: регенеративний теплообмінник, теплопровідність, типи насадок, теплопередача.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ НА ПІДПРИЄМСТВАХ, ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ	6
1.1. Загальні характеристики теплообмінних апаратів, які використовуються на підприємствах.	6
1.2. Регенеративні теплообмінні апарати, їх принцип роботи.	9
1.3. Регенератори з нерухомою та нерухомою насадкою.	14
1.4. Переваги та недоліки регенеративних теплообмінників на підприємствах.	22
1.5. Висновок до розділу 1.	24
РОЗДІЛ 2 ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ	26
2.1. Оптимізація конструкції теплообмінників.	26
2.2. Теплопровідність матеріалів та їх стійкість до корозії.	29
2.3. Інтенсифікація процесів теплопередачі.	32
2.4. Застосування сучасних технологій моделювання та аналізу.	34
2.5. Висновок до розділу 2.	36
РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТСК	37
3.1. Застосування регенеративних теплообмінників і водневих ТСК. ...	37
3.2. Розрахунок тривалості циклу роботи теплообмінника.	42
3.3. Висновок до розділу 3.	46
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ	47
4.1. Використання регенеративних теплообмінників з різними видами теплоакумулюючих насадок.	47
4.2. Використання теплоакумулюючих елементів з фазовим переходом в насадці регенераторів.	50
4.3 Висновок до розділу 4.	51
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55

ВСТУП

Актуальність теми.

Світове споживання енергії і палива зростає дуже швидкими темпами. Основна частина палива йде на виробництво електроенергії, на потреби промисловості і централізованого теплопостачання. Проблема раціонального і ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів є однією з найважливіших.

На виробництві основна частина теплової енергії трансформується в різних теплообмінних апаратах. Навіть незначним підвищенням енергетичної ефективності теплоенергетичних установок, можна отримати значну економію палива, зниження собівартості продукції. Прагнення заощаджувати енергію і матеріали, облік економічних обставин, стимулюють створення більш ефективного теплообмінного обладнання. Теплообмінний апарат (теплообмінник) - це пристрій, призначений для нагріву або охолодження матеріального потоку (теплоносія). Теплові процеси, що відбуваються в теплообмінних апаратах, можуть бути самими різними: нагрівання, охолодження, випаровування, кипіння, конденсація, плавлення, затвердіння і більш складні процеси.

Україна є однією з енергозалежних країн, де постійно спостерігається дефіцит енергетичних ресурсів, оскільки власний видобуток викопного палива задовольняє наявні потреби лише на 45%. Відповідно, одним із головних завдань держави є енергозбереження шляхом оптимізації теплопостачання міст та зменшення витрат енергоносіїв при виробництві, транспортуванні й споживанні теплової енергії [1]. Енергія є важливим фактором у промисловій діяльності, транспортуванні, виробничих процесах та інших потребах.

Враховуючи викладене, встановлення закономірностей процесів, що протікають у регенеративних 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. Дослідження шляхів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників. Для досягнення вказаної мети в роботі вирішувались наступні задачі:

1. Проаналізувати літературні джерела щодо шляхів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників.
2. Провести порівняльні дослідження шляхів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників.
3. Розробити найефективніші методи шляхів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників.

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

Предмет дослідження. Параметри теплотехнічних процесів, що протікають у регенеративних теплообмінниках.

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

Наукова новизна одержаних результатів. Отримали подальший розвиток закономірності процесів, що протікають у регенеративних теплообмінниках.

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 встановлені закономірності процесів, що протікають у регенеративних теплообмінниках.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені рекомендації по впровадженню шляхів підвищення ефективності регенеративних теплообмінників..

Структура роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 48 найменувань. Загальний обсяг дипломної роботи становить 57 сторінки, 11 рисунків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ НА ПІДПРИЄМСТВАХ, ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

1.1. Загальні характеристики теплообмінних апаратів, які використовуються на підприємствах.

Робочі середовища, що нагріваються або охолоджуються під час теплообміну, називають теплоносіями. Ефективність передачі тепла між теплоносіями, стабільність процесів нагрівання, кипіння, охолодження чи конденсації, а також надійність функціонування теплообмінника визначаються як конструктивними характеристиками апарата, так і параметрами, фізичними та хімічними властивостями теплоносіїв [2]. Саме фізико-хімічні характеристики теплоносіїв часто впливають на вибір типу та конструкції теплообмінного обладнання. Інтенсивність процесів тепломасообміну залежить від властивостей теплоносіїв, які характеризуються фізичними параметрами. Основними з них є:

- а) щільність ρ [кг/м³], яка припадає на одиницю об'єму речовини;
- б) в'язкість - характеризує за законом Ньютона сили внутрішнього тертя і визначається динамічним коефіцієнтом в'язкості μ [Па·с];
- в) коефіцієнт теплопровідності λ [Вт/(м·°C)] – який характеризується за законом Фур'є, здатність речовини проводити теплоту;
- г) питома теплоємність при постійному тиску C_p [Дж/(кг·°C)] - кількість теплоти, необхідної для нагрівання одиничної маси речовини на один градус;
- д) коефіцієнт температуропровідності α [м²/с] - характеризує швидкість вирівнювання температури при нагріванні або охолодженні речовини;
- е) r [Дж/кг] - кількість теплоти, що поглинається або виділяється при зміні агрегатного стану 1 кг речовини [3].

Теплоносії мають відповідати низці вимог: бути економічно доступними, широко поширеними серед вітчизняних ресурсів, зручними для

транспортування, стабільними під час тривалої експлуатації, мати високу щільність і теплоємність, бажано високий коефіцієнт теплопровідності та значну теплоту фазового переходу, а також низьку в'язкість. Класифікація теплоносіїв здійснюється за їхнім призначенням, агрегатним станом і діапазоном робочих температур.

Теплоносії класифікують за призначенням і агрегатним станом. Залежно від агента призначення виділені гарячі теплоносії, охолоджуючі (холодоносії), проміжні тепло- і холодоносії, холодоагенти (робочі тіла холодильних циклів), сушильні та інші.

За агрегатним станом теплоносії поділяються на однофазні та багатофазні (найчастіше двофазні). До однофазних належать низькотемпературна плазма (полум'я), гази (включно з димовими), неконденсуючі пари і їх газові суміші, рідини, що не киплять і не випаровуються за робочого тиску, а також їхні розчини й тверді сипучі матеріали. Багатофазні теплоносії включають рідини, які киплять, випаровуються або розпорюються за допомогою газу; пари, що конденсуються; парогазові суміші; тверді речовини, які плавляться або тверднуть; газосуспензії, аерозолі, емульсії та інші пилові газові потоки.

За параметром робочих температур виділяють високотемпературні, середньотемпературні, низькотемпературні теплоносії і теплоносії, що застосовуються при кріогенних процесах. До високотемпературних газоподібних теплоносіїв відносяться димові або топкові гази. Їх температура може досягати 1500°C . До високотемпературної теплоносії у вигляді крапельних рідин прийнято відносити речовини, температура кипіння яких за атмосферний тиск перевищує 200°C . Це мінеральні масла, дифенільні сполуки, гліцерин, розплави солей, рідкі метали та інші [4].

Середньотемпературними теплоносійми вважаються водяна пара, вода та повітря. Водяна пара використовує при температурі до 650°C , води — до 375°C , а повітря — до 100°C .

Низькотемпературними теплоносіями вважаються речовини з температурою кипіння при атмосферному тиску, що зазвичай не перевищує 0°C . До цієї категорії належать переважно холодильні агенти. Кріогенні теплоносії — це зріджені гази, такі як кисень, водень, азот, повітря тощо, а також їхні пари. Вони застосовуються при температурах нижче -150°C .

У тепломасообмінних установках найчастіше використовуються газоподібні та рідкі теплоносії, а також водяна пара. Серед газоподібних теплоносіїв найбільш поширеними є повітря, димові та топкові гази. Хоча ці теплоносії мають певні переваги, вони також характеризуються суттєвими недоліками: низькою теплоємністю та малою щільністю. Як наслідок, коефіцієнти тепловіддачі від газового потоку до стінки залишаються невисокими (близько $10\text{--}100 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$). Це призводить до необхідності створення теплообмінних апаратів із великою площею теплообміну, що, у свою чергу, збільшує енергетичні витрати на прокачування теплоносіїв і робить такі установки громіздкими.

На відміну від газоподібних теплоносіїв, вода має суттєво інші фізичні та термодинамічні властивості, зокрема високу теплоємність і значну щільність. Її коефіцієнти тепловіддачі до стінок у робочому діапазоні швидкостей потоку становлять $1000\text{--}15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. Завдяки цьому теплообмінні апарати з водою як теплоносієм є більш компактними, потребують меншої площі нагрівальних поверхонь і витрачають менше енергії на прокачування теплоносія порівняно з апаратами, що працюють із газами. Проте важливим недоліком води як теплоносія є її низька температура кипіння, підвищення якої вимагає збільшення тиску, що ускладнює конструкцію теплообмінного обладнання. Тому вода зазвичай використовується як низькотемпературний теплоносій, зокрема для опалення або охолодження робочих середовищ у технологічних процесах.

Водяна пара, навпаки, широко застосовується в теплообмінних апаратах як середовище для нагрівання. У процесі конденсації її коефіцієнти тепловіддачі досягають 3000–15000 Вт/(м²·°C) [5].

1.2. Регенеративні теплообмінні апарати, їх принцип роботи.

Теплообмінні апарати класифікують за принципом дії на три основні типи: регенератори, рекуператори та змішувальні апарати. Для підвищення ефективності теплотехнологічних систем, які працюють в умовах значного перепаду температур між теплоносіями, доцільно використовувати регенеративні теплообмінники.

У регенеративних теплообмінниках гарячий теплоносій передає теплоту пристрою, що її акумулює, а той згодом передає теплоту холодному теплоносію. У таких апаратах одна і та ж поверхня поперемінно контактує з гарячим і холодним теплоносієм. Переважна більшість регенераторів працює за принципом періодичної дії.

Регенеративний теплообмінник — це пристрій, у якому тепло передається від одного теплоносія до іншого через теплоакumuлюючу масу, звану насадкою [6]. Під час першого циклу (нагрівання насадки) через апарат проходить гарячий теплоносій, що віддає теплоту насадці. У другому циклі (охолодження насадки) через апарат проходить холодний теплоносій, який нагрівається завдяки теплу, накопиченому в насадці.

Теплообмінники, що працюють на основі періодичної зміни потоків теплоносіїв, називаються апаратами періодичної дії. У них гарячий і холодний теплоносії подаються в різний час. Тривалість циклів нагрівання й охолодження насадки може варіюватися від кількох хвилин до кількох годин.

[7] Мукмінов І., Бошкова І., Волгушева Н., Альтман Е. та Потапов М. дослідили ефективність акумуляції теплоти повітря гранульованою насадкою в ґрунтовому регенеративному теплообміннику, а також можливості моделювання процесів поширення теплового фронту уздовж насадки в часі. У своїй роботі вони розглянули один із прикладів використання

регенеративного апарата зі щільним шаром, де джерелом теплоти виступає сонячне випромінювання, а сам регенератор розробляється для створення та підтримки оптимального температурного режиму в теплицях. Також було представлено результати випробувань пілотної установки в реальних умовах.

Дослідження процесу теплообміну між потоком повітря та частками щебеню в каналі показали, що різниця температур між стінкою каналу та частками є незначною, тому похибку вимірювання температур через випромінювання можна ігнорувати. Встановлено, що теплота, акумульована частками, передається в навколишнє середовище протягом тривалого часу, що підтверджує доцільність використання щебеню як гранульованої насадки в регенеративних теплообмінниках.

На основі проведених досліджень було виконано комп'ютерне моделювання процесу нагрівання щільного шару часток у теплообмінному каналі. Це дозволило спрогнозувати швидкість поширення теплового фронту за різних вихідних умов, а також визначити оптимальні геометричні характеристики каналу та робочі параметри, такі як температура і витрата повітря, тривалість циклів нагрівання й охолодження.

Прикладом регенеративного теплообмінника є роторні теплообмінники, які широко застосовуються в системах припливно-витяжної вентиляції.

Роторні теплообмінники [7] відносяться до класу регенеративних теплообмінників та найчастіше використовуються в системах припливновитяжної вентиляції. Принцип дії роторного теплообмінника заснований на передачі тепла від гарячого газу до холодного через циліндр, що обертається (ротор), який складається з набору тонких металевих (як правило алюмінієвих) пластин.

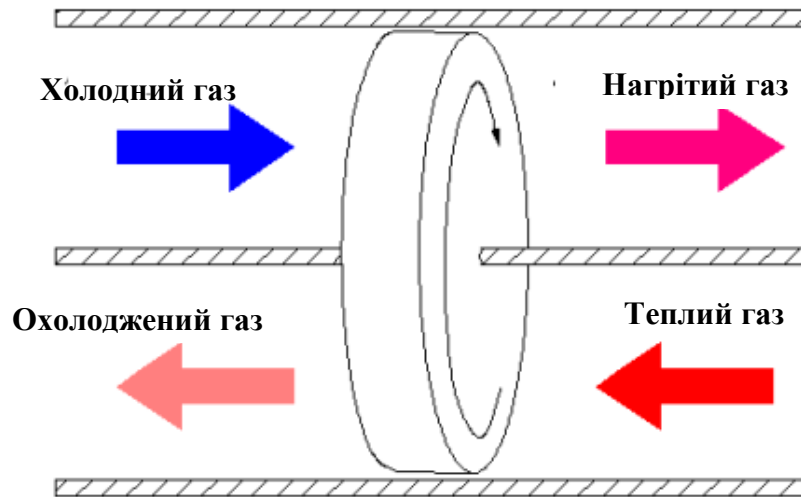


Рис. 1.1. Принцип роботи роторного регенератора.

Роторні теплообмінники мають складну конструкцію і рухомі частини, що зменшує надійність та сферу застосування. Для критичних та промислових ситуацій застосування використовують простий, за своєю конструкцією, регенеративний теплообмінник з насадкою.

Схеми використання регенеративних теплообмінників роторного типу у зазначених системах наведені на рис. 1.2 і 1.3.

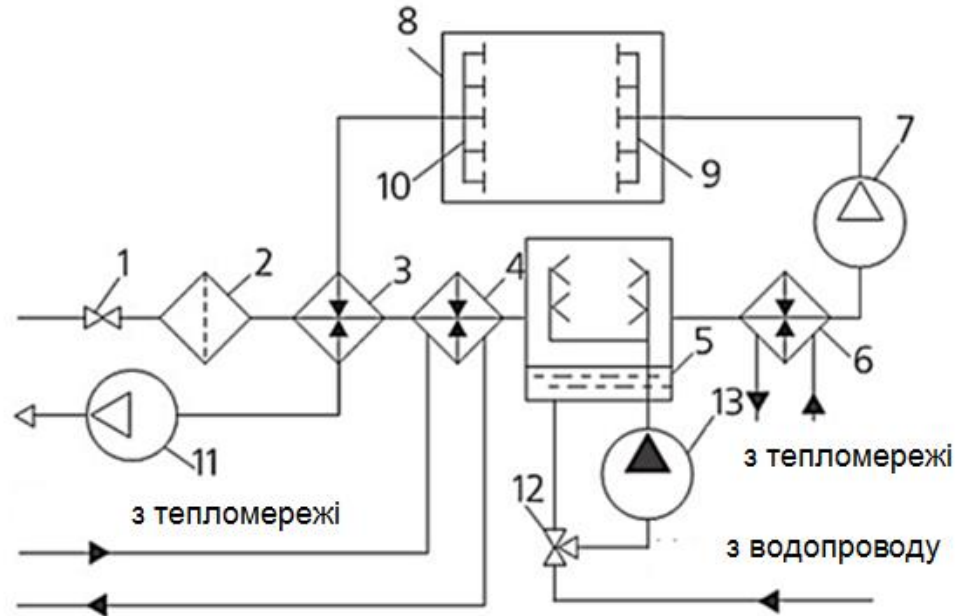


Рис. 1.2. Принципова схема припливно-витяжної вентиляції з регенеративним теплообмінником - утилізатором роторного типу:
 1 - припливний вентилятор; 2 - вентилязоване приміщення; 3 - витяжний вентилятор; 4 - регенеративний теплообмінник з насадкою, що обертається;
 5 - рекуперативні теплообмінники «повітря-рідина».

Ці теплообмінники є складнішими в експлуатації та потребують додаткових енергетичних витрат для роботи електродвигуна, який приводить ротор у рух. Крім того, через конструктивні особливості таких теплообмінників до 2% витяжного повітря може змішуватися з припливним.

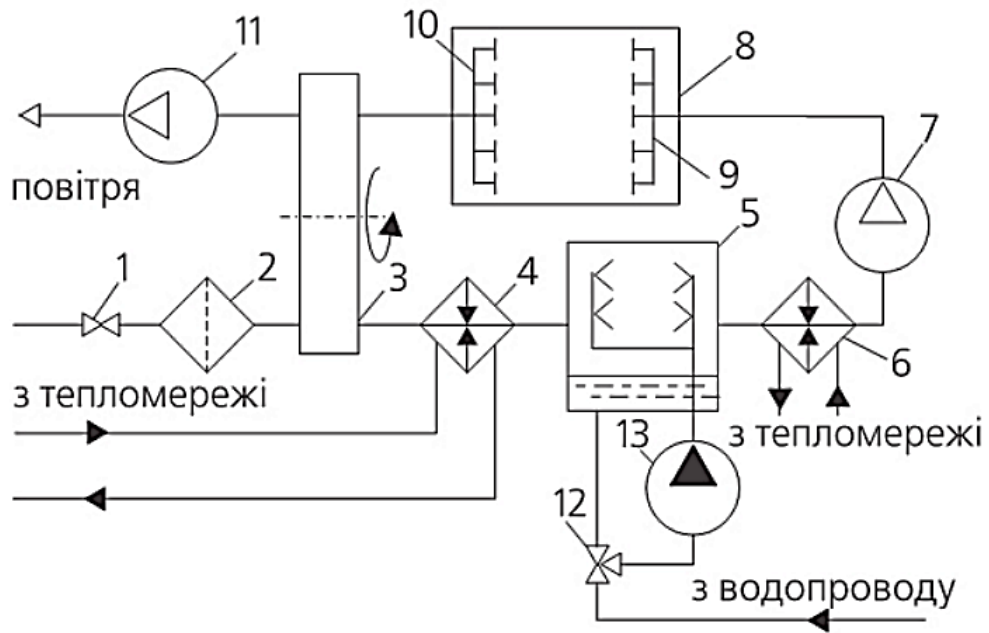


Рис. 1.3. Принципова схема системи кондиювання повітря з утилізацією теплоти вентиляційних викидів в регенеративному теплообміннику роторного типу:

1- припливний клапан; 2 - повітряний фільтр; 3 - регенеративний теплообмінник роторного типу; 4 - калорифер першого ступеню підігріву повітря; 5 - камера зрошення; 6 - калорифер другого ступеню підігріву повітря; 7 - припливний вентилятор; 8 - обслуговуюче приміщення; 9 - система припливних повітроводів; 10 - система витяжних повітроводів; 11- витяжний вентилятор; 12 -триходовий клапан; 13 - циркуляційний насос.

Роторний регенеративний теплообмінник з обертовою насадкою (рис. 1.4) представляє собою плоский корпус, в якому розміщена теплоакмулююча насадка, сформована з пакетів листів або сіток.

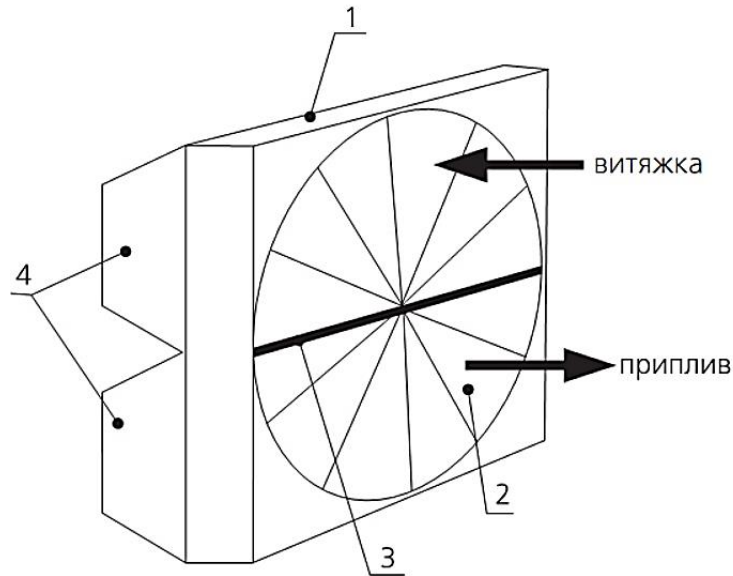


Рис. 1.4. Схема регенеративного теплообмінника з насадкою, що обертається:

1 - корпус; 2 - ротор, що обертається; 3 - перегородка; 4 - патрубки

У теплообмінниках відбувається конденсація вологи, насадка заповнюється тонкими листами картону або іншими матеріалами, просоченими розчином хлористого натрію. Насадка обертається, забезпечуючи цикл передачі тепла: витяжне повітря нагріває частину насадки, яка перебуває в зоні його потоку, потім як інша частина, що знаходиться в зоні припливного повітря, охолоджується. Цей процес повторюється циклічно в міру обертання насадки.

1.3. Регенератори з нерухомою та нерухомою насадкою.

Для безперервної передачі теплоти від одного теплоносія до іншого також використовують два регенератори. Під час роботи одного з них гарячий теплоносій охолоджується, а в інший відбувається нагрівання холодного теплоносія [8]. Після цього апарати перемикаються, і процес теплопередачі змінює напрямок у кожного з регенераторів. Схема з'єднання та перемикування пари регенераторів показана на рисунку 1.5.

Перемикання відбувається шляхом повороту клапанів 3 і 4, причому напрямку руху теплоносіїв позначеними стрілками. У кожному конкретному випадку процес перемикання відбувається автоматично через задані проміжки часу.

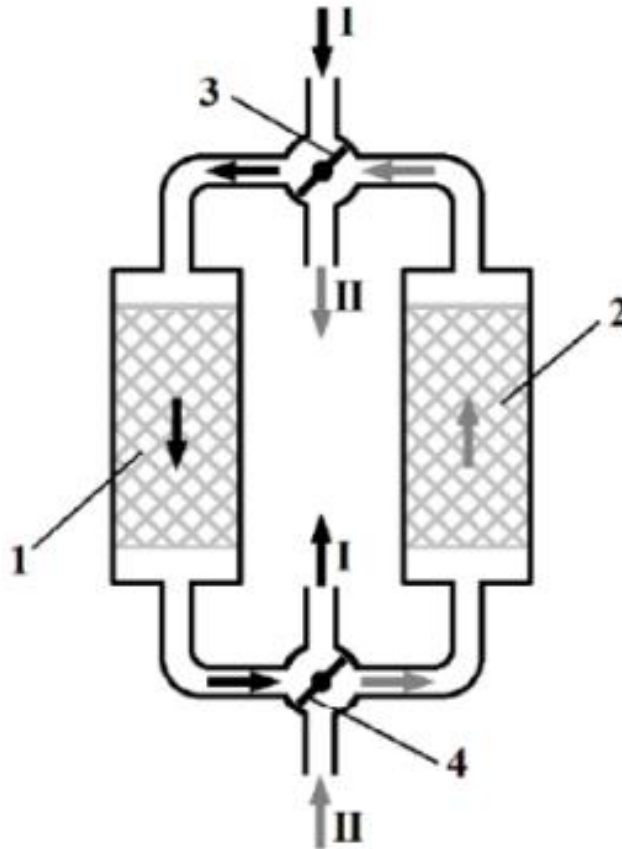


Рис. 1.5. Схема регенератора з нерухомою насадкою:

I - холодний теплоносій

II - гарячий теплоносій;

1, 2 - теплоносії;

3, 4 – клапани.

Іншим варіантом є регенератори безперервної дії з рухомою насадкою [9]. Така насадка може складатися із зернистого матеріалу, який переміщується через апарат під дією власної ваги. Як показано на рисунку 1.6, апарат має дві складові розташовані камери.

Коли шар насадки проходить через верхню камеру 1, він нагрівається, поглинаючи тепло від гарячого теплоносія. У нижній камері 3 насадка віддає накопичене тепло холодному теплоносію. Після охолодження насадка пропускається до збірника 4, звідки за допомогою елеватора 5 транспортується до бункера 8. З бункера насадка дозуючим пристроєм знову подається у верхню камеру для повторного циклу.

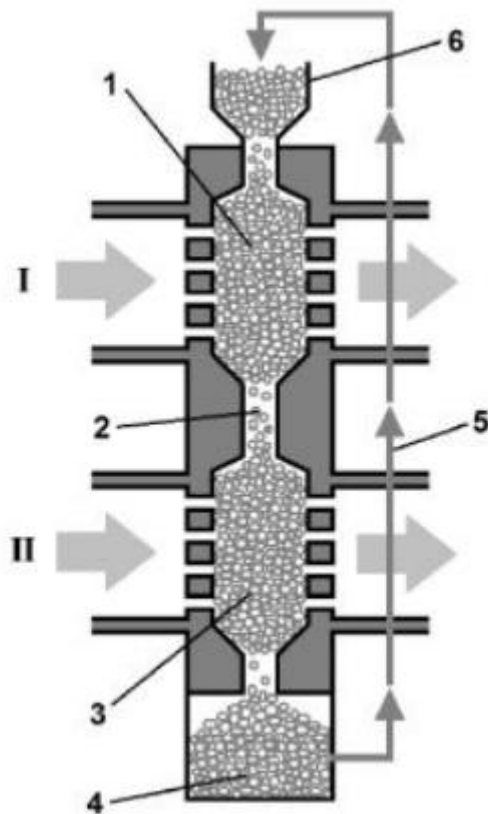


Рис. 1.6. Схема пристрою регенеративних теплообмінників із рухомою насадкою:

- 1 - камера нагрівання насадки;
- 2 - перетікання насадки між камерами;
- 3 - камера охолодження насадки;
- 4 - збірник охолодженої насадки;
- 5 - транспортер (елеватор) насадки;
- 6 - бункер охолодженої насадки;
- I - теплоагент;

II – холодоагент.

На рисунку 1.7 показана принципова схема регенератора, рухома насадка в якому, виконана у вигляді металевих куль. Через регенератор 1 пропускається гарячий теплоносій, при цьому насадка нагрівається. Насадка безперервно вивантажується через регулюючий затвор 3 і надходить в регенератор 2, через який пропускається холодний теплоносій. З регенератора 2 насадка надходить в ковшовий елеватор 5 і подається їм знову в регенератор 1. Таким чином, відпадає необхідність перемикання регенератора, і теплота передається від гарячого теплоносія до холодного за допомогою насадки, безперервно циркулює через обидва регенератора.

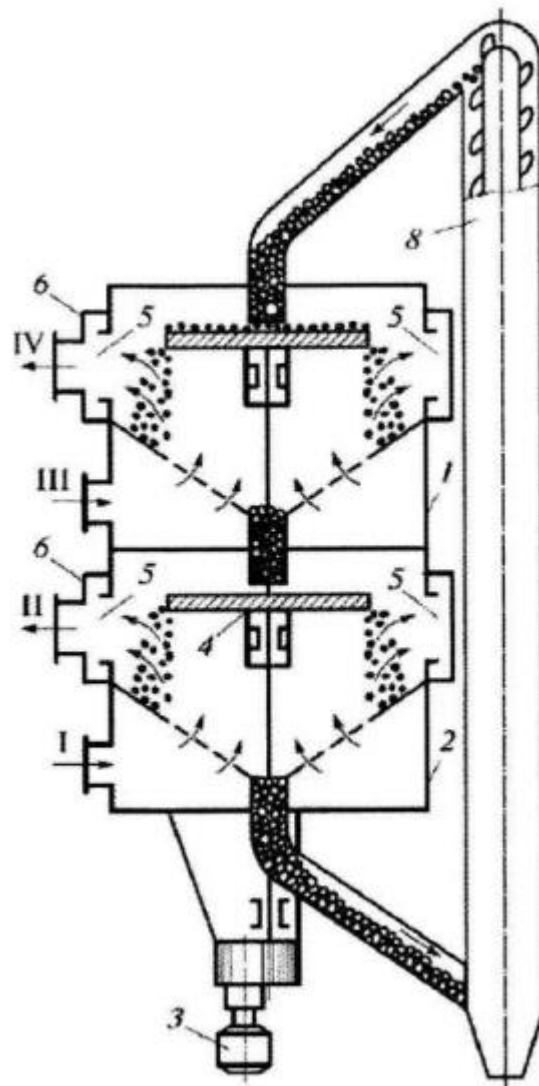


Рис. 1.7. Схема теплообмінника з рухомим твердим проміжним теплоносієм:

I - холодний газ;

II - нагрітий газ;

III - гарячий газ;

IV - охолоджений газ

1, 2 - камери відповідно охолоджуваного і нагрівається газів;

3 - обертовий диск, що регулює подачу твердих частинок;

4 - електродвигун з редуктором;

5 - ковшовий елеватор;

6, 7 - колектори відповідно охолодженого і нагрітого газу;

8 - вікна колектора.

Деякі типи регенераторів зображено на рис. 1.8, де показана схема роботи регенератора мартенівської печі, що використовує мазут як паливо. У положенні перекидного шибера, яке ілюструє рис. 1.8а, повітря проходить через ліву камеру, нагріваючись до необхідної температури, а насадка цієї камери при цьому охолоджується. Одночасно гарячі продукти згоряння, що відходять, нагрівають насадку правої камери.

Через певний проміжок часу перекидний шибер змінює своє положення, змінюючи напрямок руху повітря та гарячих газів. У новому циклі насадка лівої камери нагрівається гарячими газами, тоді як насадка правої камери охолоджується, нагріваючи повітря. Одночасно з перемиканням шибера вмикаються форсунки з лівого боку печі та вмикаються форсунки з правого боку.

У мартенівських печах, що працюють на газовому паливі, нагріванню підлягає не лише повітря, а й горючий газ. Тому з кожного боку печі встановлюють по дві камери з насадкою.

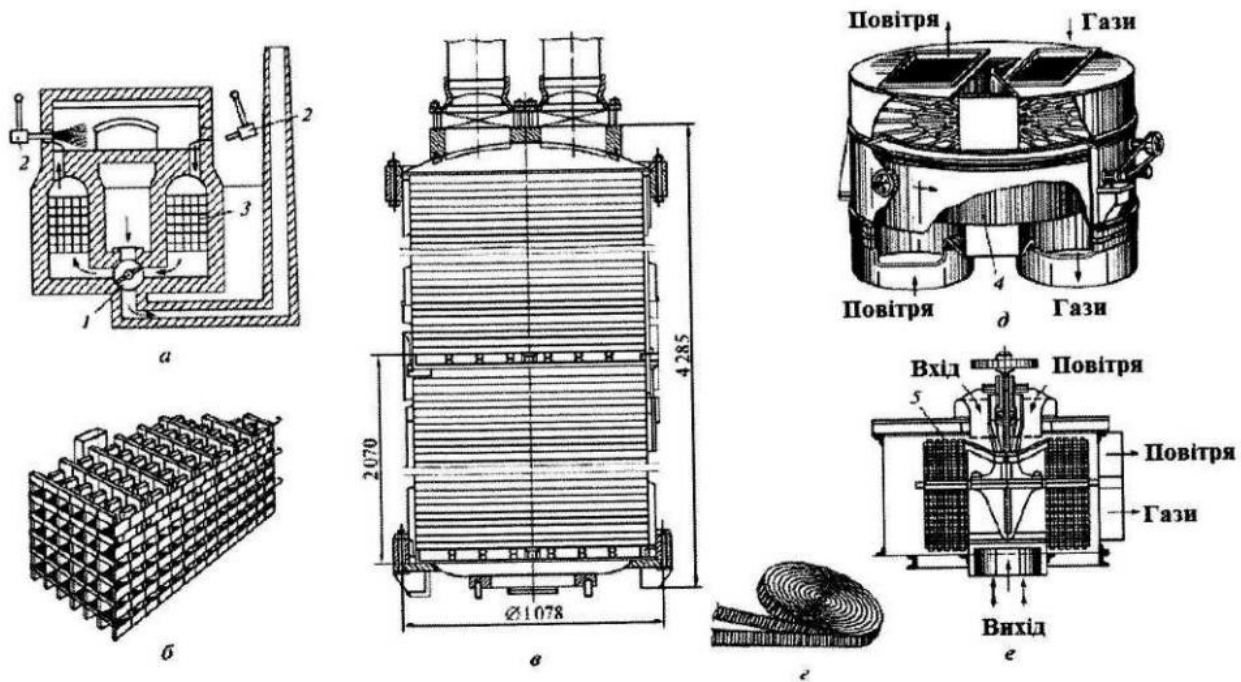


Рис. 1.8. Деякі типи регенераторів:

- а - схема мартенівської печі з регенераторами;
- б - регенеративна насадка з вогнетривкої цегли;
- в - регенератор з нерухомою насадкою,
- г - елемент гофрованої насадки з алюмінію;
- д - обертовий регенератор системи Юнгстрема;
- е - комбінований вентилятор-димосос;
- 1 - перекидний шибер;
- 2 - форсунки;
- 3 - насадка;
- 5 — ротор

На рис. 1.8б наведена схема цегляної насадки, в якій вогнетривкі цеглини укладені у вигляді суцільних каналів. Це найбільш поширений на практиці тип насадки, хоча, взагалі кажучи, типи цегляних насадок досить різноманітні. Товщина цегли, яка використовується для регенеративних насадок, становить 40-50 мм, при цьому форма цегли може бути звичайною і спеціальною.

Недоліками регенераторів з нерухою цегляною насадкою є громіздкість, ускладнення експлуатації, що пов'язана з необхідністю періодичних перемикачів регенераторів, і коливання температури в робочому просторі печі або внаслідок зміни температури насадки в процесі теплообміну, тому вони знаходять застосування лише при високих температурах теплоносіїв, що не дозволяють використовувати металеві рекуператори.

На рисунку 1.8в зображено регенератор із нерухою насадкою, виготовленою з алюмінієвої гофрованої стрічки (рис. 1.8г). Такий тип теплообмінника використовується в холодильних установках для глибокого охолодження азоту до $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перевагою металеві насадки є висока питома поверхня теплообміну за невеликого об'єму: в 1 м^3 насадки можна розмістити алюмінієву стрічку з площею теплообміну до 2000 м^2 . Різниця температур між теплоносієм і насадкою залишається не менше $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ майже по всій довжині. Недоліком цього апарату є високий гідравлічний опір.

На рисунку 1.8д представлено регенератор системи Юнгстрьома з обертовою металеві насадкою, який широко застосовується на електростанціях як повітропідігрівач для утилізації тепла димових газів котлів. Насадка цього апарату складається з профільованих металевих пластин, які, обертаючись, по черзі проходять через канали гарячих газів і холодного повітря, забезпечуючи нагрівання повітря. Швидкість обертання ротора зазвичай не перевищує $3\text{--}6$ об/хв. Порівняно з нерухою насадками, регенератор Юнгстрьома забезпечує стабільну температуру нагрітого повітря, залежну лише від температури вхідних гарячих газів. Його компактність є значною перевагою порівняно з рекуперативними підігрівачами. Недоліками є складність конструкції та можливість забруднення повітря газами.

На рисунку 1.8е показано регенератор із рухою поверхнею нагрівання. Комбінований агрегат, який поєднує функції вентилятора і

димососа, має ротор із герметичними ребристими лопатками, частково заповненими водою. У нижній частині агрегата через лопатки проходять димові гази, які випаровують воду, що знаходиться в нижній зоні. У верхній частині холодне повітря нагрівається, контактуючи з поверхнею лопаток, заповнених парою, при цьому пара конденсується і стікає назад.

Незважаючи на інноваційність, комбіновані агрегати з рухомою поверхнею нагрівання поки що мають нижчий ККД, ніж традиційні вентилятори та димососи.

Останнім часом у нафтопереробній, нафтохімічній та інших галузях промисловості, а також в енергетичних установках з високотемпературними процесами, де навіть високолеговані сталі виявляються недостатньо жаростійкими, набули поширення теплообмінні апарати з нерухомим киплячим або падаючим шаром твердого жаростійкого проміжного теплоносія. У таких теплообмінниках здійснюється нагрівання повітря, газів і парів органічних рідин до температур 1600–2000 °С, а також **перегрівання водяної пари**.

Як проміжні теплоносії використовують тверді частинки або кульки з оксидів алюмінію, цирконію, магнію, каоліну, муліту тощо, розміром 8–12 мм. Матеріал таких теплоносіїв повинен відповідати ряду вимог: бути жаростійким (не розм'якшуватися і не плавитися за високих температур), хімічно стійким (не окислюватися), не тріскатися і не розшаровуватися при різких температурних змінах, бути зносостійким, витримувати ударні навантаження, а також мати високу теплоємність для зниження масового витрату за великого теплового навантаження і бути економічно вигідним [10].

1.4. Переваги та недоліки регенеративних теплообмінників на підприємствах.

Регенеративні теплообмінники мають ряд переваг, що робить їх ефективним рішенням для енергозбереження та оптимізації теплових процесів у різних галузях промисловості. Основні переваги:

1. Висока ефективність теплопередачі. Регенеративні теплообмінники здатні передавати значну частину тепла від гарячого до холодного теплоносія, що знижує потребу в додатковому нагріванні або охолодженні. Завдяки можливості використання тепла відпрацьованих потоків, вони дозволяють повторно використовувати енергію, зменшуючи загальні витрати.

2. Економія енергоресурсів. Використання регенеративних теплообмінників зменшує споживання первинних енергоресурсів, оскільки потреба в додатковій енергії для нагрівання або охолодження знижується. Це веде до економії палива, що особливо актуально в умовах високих цін на енергоносії.

3. Зменшення впливу на навколишнє середовище. Ефективне повторне використання тепла допомагає скоротити викиди парникових газів та інших забруднювачів, оскільки знижується загальне енергоспоживання підприємства. Це сприяє екологічній стійкості та відповідає сучасним стандартам енергоефективності.

4. Компактність та економія місця. Регенеративні теплообмінники, особливо роторні, мають компактні розміри та високу тепловіддачу на одиницю об'єму, що дозволяє зекономити місце в умовах обмеженого простору, що є перевагою в промислових установках.

5. Можливість роботи з різними типами теплоносіїв, таких як газ, пара, рідина, що робить їх універсальними для застосування у різних галузях, від хімічної до харчової промисловості.

6. Довговічність та надійність при використанні міцних матеріалів та спеціальних покриттів, що забезпечує тривалий термін служби регенеративних теплообмінників навіть у важких умовах експлуатації.

7. Гнучкість в налаштуванні робочих параметрів. Завдяки можливості контролю температури та витрати теплоносія можна легко налаштовувати режими роботи теплообмінника відповідно до виробничих вимог, підвищуючи ефективність процесів.

Попри свої переваги, регенеративні теплообмінники, мають також певні недоліки, які можуть впливати на їхнє застосування у промисловості. До основних недоліків відносять:

1. Складність конструкції та висока вартість, особливо роторних регенераторів, збільшують їхню вартість виготовлення та обслуговування. Дорожчі матеріали та технології, необхідні для забезпечення їхньої надійності та ефективності, також підвищують початкові інвестиції.

2. Великі витрати на обслуговування та ремонт. Через особливості конструкції та можливість забруднення, регенеративні теплообмінники потребують регулярного обслуговування. Зокрема, роторні теплообмінники з часом можуть потребувати заміни рухомих частин, що підвищує експлуатаційні витрати.

3. Ризик забруднення та зниження ефективності. При тривалій експлуатації на поверхнях теплообмінника можуть накопичуватися відкладення, що знижує ефективність теплопередачі. Забруднення особливо актуальне при роботі з середовищами, що містять пил, смоли чи інші домішки, що ускладнює очищення.

4. Обмежена стійкість до агресивних середовищ. Деякі типи регенеративних теплообмінників можуть бути менш стійкими до корозійних або агресивних середовищ, що обмежує їхнє застосування в хімічній промисловості або нафтопереробці. Використання спеціальних антикорозійних покриттів підвищує вартість і ускладнює виробництво.

5. Великі розміри та вага у певних випадках. У деяких застосуваннях регенеративні теплообмінники можуть бути громіздкими, особливо при потребі в значній площі теплопередачі. Це ускладнює їхнє встановлення в умовах обмеженого простору та збільшує навантаження на конструкції, на які вони монтуються.

6. Втрати тепла через витік повітря або газу (в роторних теплообмінниках). Роторні регенеративні теплообмінники можуть мати витік повітря або газу між гарячою та холодною сторонами, що знижує їхню ефективність і може викликати додаткові витрати на ущільнення.

7. Теплова інерційність. Регенеративні теплообмінники можуть мати високу теплову інерційність, тобто повільно реагувати на зміни температурного режиму. Це може ускладнити оперативну зміну робочих параметрів та бути недоліком в умовах швидкозмінних технологічних процесів.

8. Проблеми з регулюванням температури. У деяких типах регенеративних теплообмінників може бути складно точно регулювати температуру вихідного потоку, що може призвести до нестабільності теплового процесу та вимагати додаткового контролю.

1.5. Висновок до розділу 1.

Вимоги до теплообмінного обладнання залежать від умов його експлуатації та є доволі різноманітними. Серед основних вимог можна виділити: забезпечення максимального коефіцієнта теплопередачі при мінімальному гідравлічному опорі; компактність конструкції та мінімальне використання матеріалів на одиницю теплової продуктивності; надійність і герметичність у поєднанні з можливістю розбирання та доступу до поверхонь теплообміну для їх механічного очищення від забруднень; уніфікація компонентів і технологічність у механізованому виробництві різних типів теплообмінних поверхонь, адаптованих до широкого діапазону робочих температур і тисків, тощо [22].

Регенеративні теплообмінники забезпечують ефективне енергозбереження, високу економічну віддачу та відповідають сучасним екологічним вимогам, що робить їх оптимальним вибором для різних галузей промисловості. Недоліки регенеративних теплообмінників, такі як складність конструкції, вартість обслуговування, схильність до забруднень і обмеження у використанні з агресивними середовищами, слід враховувати при виборі обладнання для конкретних умов експлуатації. Незважаючи на ці недоліки, регенеративні теплообмінники залишаються ефективними рішеннями у випадках, коли їх переваги значно перевищують можливі недоліки.

РОЗДІЛ 2

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

2.1. Оптимізація конструкції теплообмінників.

Підвищення ефективності регенеративних теплообмінників є важливим завданням для зниження енерговитрат та підвищення продуктивності промислових процесів [11, 12]. Розглянемо шляхи досягнення цієї мети.

Необхідно оптимізувати конструкції теплообмінників, а саме: збільшити поверхні теплопередачі; використовувати конструкції із ребристими або пластинчастими поверхнями, що збільшує площу контакту між теплоносіями, та підвищує ефективність передачі тепла; поліпшити геометрію каналів, тобто оптимізувати форму і розмір каналів для проходження теплоносія, що може зменшити тепловий опір та покращити циркуляцію потоків; впровадити компактні конструкції, для зменшення обсягу теплообмінника при збереженні теплової потужності, що в свою чергу дозволить ефективніше використовувати простір і знижувати теплові втрати.

Так, наприклад, використання потужності теплообмінників з повітряним охолодженням на електростанціях. У центрі об'єктів виробництва електроенергії ефективне управління теплом є основою послідовної, надійної та сталої роботи. Теплообмінники з повітряним охолодженням стали універсальним і все більш популярним рішенням для управління значними тепловими навантаженнями, які генеруються обладнанням і процесами електростанцій. Оскільки попит на електроенергію продовжує зростати, оптимізація продуктивності цих критичних компонентів стає першорядною.

Оскільки, в основі теплообмінника з повітряним охолодженням лежить основний процес теплопередачі, коли тепла енергія обмінюється між двома рідинами без прямого змішування. У системах виробництва електроенергії

зазвичай сприяють передачі тепла від гарячої технологічної рідини, такої як охолоджуюча вода або термальне масло, до навколишнього повітря.

Основні компоненти теплообмінника з повітряним охолодженням включають:

1. **Рєбрїстї труби** – це основні поверхні теплопередачі, що складаються з металевих трубок із прикріпленими ребрами для збільшення ефективної площі поверхні для теплообміну.
2. **Вентилятори**, які забезпечують циркуляцію навколишнього повітря через пучок ребристих труб, покращуючи конвективну теплопередачу та розсіюючи теплову енергію.
3. **Корпус**, що забезпечує структурну опору та містить внутрішні компоненти, захищаючи їх від негоди та полегшуючи встановлення.
4. **Колектори**, такі як, вхідний і вихідний, рівномірно розподіляють гарячу технологічну рідину по пучку ребристих труб, забезпечуючи ефективну теплопередачу.

Принцип роботи теплообмінника з повітряним охолодженням простий: гаряча технологічна рідина тече через труби, передаючи свою теплову енергію ребрам. Коли навколишнє повітря втягується через ребристу поверхню вентиляторів, тепло розсіюється, ефективно охолоджуючи технологічну рідину. Цей процес передачі тепла, що обумовлюється різницею температур між двома рідинами, є основою охолоджувальних можливостей теплообмінників з повітряним охолодженням.

Проектування та проектування теплообмінника з повітряним охолодженням для генерації електроенергії вимагає глибокого розуміння унікальних проблем і вимог цих середовищ. Електростанції часто працюють в екстремальних умовах, з високими температурами, тиском і корозійними або забрудненими рідинами. Урахування цих факторів шляхом ретельного проектування та розробки може значно підвищити продуктивність,

надійність і довговічність теплообмінників з повітряним охолодженням в установках виробництва електроенергії.

Забезпечення оптимального потоку повітря та ефективності теплопередачі має вирішальне значення для максимізації продуктивності теплообмінників з повітряним охолодженням у системах виробництва електроенергії. Цього можна досягти за допомогою стратегічного проектування та інженерних міркувань, таких як:

1. **Дизайн ребер:** Геометрія, щільність і матеріал ребер відіграють значну роль у покращенні теплопередачі. Оптимізована конструкція ребер може покращити коефіцієнти теплопередачі на стороні повітря та зменшити перепад тиску в теплообміннику.
2. **Розташування труб:** Розташування та відстань між ребристими трубами в теплообміннику впливають на структуру повітряного потоку та швидкість теплопередачі. Для досягнення бажаної теплової та гідравлічної продуктивності можна використовувати конфігурації труб у шаховому порядку або на лінії.
3. **Вибір і розміщення вентиляторів:** вибір правильних вентиляторів з точки зору розміру, швидкості та розташування може оптимізувати розподіл повітряного потоку та максимізувати розсіювання тепла. Стратегічне розташування вентиляторів може звести до мінімуму рециркуляцію та забезпечити рівномірну швидкість повітря через пучок ребристих труб.
4. **Конструкція корпусу:** форма, розмір і конфігурації повітрязабірника/виходу в корпусі теплообмінника можуть впливати на структуру повітряного потоку та ефективність теплопередачі. Продумана конструкція корпусу може мінімізувати падіння тиску на стороні повітря та покращити загальне розсіювання тепла.

Ретельно враховуючи ці конструктивні та інженерні фактори, оператори електростанцій можуть адаптувати свої теплообмінники з

повітряним охолодженням до унікальних вимог своїх установок, забезпечуючи оптимальне управління теплом та енергоефективність.

Підтримка та оптимізація продуктивності теплообмінників з повітряним охолодженням у системах виробництва електроенергії має важливе значення для забезпечення надійної роботи, мінімізації часу простою та максимізації енергоефективності.

2.2. Теплопровідність матеріалів та їх стійкість до корозії.

Використовувати ефективних матеріалів з високою теплопровідністю. Так, наприклад, використання міді та мідних сплавів, які мають одну з найвищих теплопровідностей серед доступних матеріалів, що робить їх ідеальним варіантом для теплообмінників. Крім того, мідь добре піддається обробці та має високу стійкість до корозії, що забезпечує довговічність.

Також, алюміній та його сплави мають високу теплопровідність і легкість, що знижує загальну масу теплообмінника. Це зручно для застосування у випадку, де потрібна знижена вага або де велике значення має компактність пристрою. Ще один матеріал це графіт, який має високу теплопровідність, добру стійкість до високих температур і корозійної дії, що робить його придатним для застосування в агресивних умовах, особливо в хімічній промисловості.

Особливе значення мають композитні матеріали, такі як металокераміка та полімерні композити з наповнювачами. Комбінування металевих і керамічних матеріалів створює міцні композити з високою теплопровідністю і корозійною стійкістю. Металокерамічні композити також стійкі до механічного зносу та агресивних середовищ. Деякі полімерні матеріали, посилені провідними теплопровідниками (наприклад, вуглецевими волокнами), можуть використовуватися для зниження ваги теплообмінника, зберігаючи високу теплопровідність. Вони підходять для менш агресивних середовищ і помірних температур.

Авторами Мукміновим І., Бошковою І., Волгушевою Н., Альтманом Е., Потаповим М. в своїй статті [14] було досліджено ефективність використання сонячних акумуляторів для обігріву приміщень в умовах значних добових перепадів температури. У ролі накопичувального матеріалу використовували щільний шар гранульованих матеріалів. Оцінено можливість використання теплообмінника регенеративного типу з гранульованою насадкою у вигляді щільного шару. Нагрівання такої насадки впливали за допомогою повітряного потоку з внутрішнього простору. Розроблений регенератор створено для підтримання необхідного температурного режиму.

Ідея створення обґрунтованого регенератора базувалася на даних про інтенсивність нагріву повітря в теплиці сонячним випромінюванням у денний час та ефективність контактного теплообміну між повітрям і частинками гранул. Запропоновано схему, що забезпечує захист повітря з верхньої частини теплиці, піддаючи його до каналу з максимально можливою температурою. В якості теплообмінної насадки застосовувався щільний шар щебню.

Корозійностійкі матеріали такі як, нержавіюча сталь, титан і його сплави використовується в умовах агресивних середовищ завдяки високій корозійній стійкості. Вони стійкі до кислот і лугів, зберігають механічну міцність при високих температурах, що робить їх одним із найпопулярніших матеріалів для теплообмінників. Титан має унікальне поєднання високої корозійної стійкості та міцності, тому його часто використовують у хімічній та нафтовій промисловості, де теплообмінники контактують з агресивними середовищами. Титан також добре переносити вплив морської води, що робить його придатним для використання в морській техніці.

Вибір матеріалів і поверхневих покриттів для теплообмінника з повітряним охолодженням має вирішальне значення, оскільки вони безпосередньо впливають на стійкість обмінника до корозії, ерозії та

забруднення. На електростанціях вплив високотемпературної пари, агресивних хімікатів для очищення води та інших суворих умов вимагає використання міцних матеріалів.

Загальні матеріали, що використовуються в теплообмінниках повітряного охолодження на електростанціях, включають: нержавіючу сталь, яка забезпечує чудову стійкість до корозії та структурну цілісність, що робить її популярним вибором для матеріалів труб і ребер, мідно-нікелеві сплави, які забезпечують підвищену стійкість до солоної води та інших корозійних середовищ, часто використовуються на морських або прибережних електростанціях.

На додаток до вибору матеріалу, використання спеціальних покриттів може додатково підвищити довговічність і продуктивність теплообмінника. Такі покриття, як епоксидне, поліуретанове або фторполімерне, можуть захистити від корозії, ерозії та забруднення, подовжуючи термін експлуатації теплообмінника.

Наноматеріали, такі як нанопорошки з оксидів металів (наприклад, оксид алюмінію або оксид титану), можуть бути використані як покриття для підвищення теплопровідності та захисту від корозії. Вони також сприяють зниженню відкладень на поверхні теплообмінника.

Важливе значення має антиадгезійні та самовідновлювані покриття. Нанесення покриттів, які запобігають прилипанню часток і відкладень, сприяє збереженню високої ефективності теплопередачі. Наприклад, фторполімерні покриття добре працюють у кислому середовищі. Новітні матеріали із самовідновлюваними властивостями можуть автоматично відновлювати пошкодження або підрипини на поверхні, що продовжує термін служби теплообмінника та знижує витрати на обслуговування.

Постійні дослідження та розробки в матеріалознавстві створюють нові, більш міцні та стійкі до корозії сплави та покриття для компонентів теплообмінника з повітряним охолодженням. Ці інноваційні матеріали

можуть підвищити стійкість теплообмінників до суворих умов, які виникають під час виробництва електроенергії, подовжуючи термін їх експлуатації та зменшуючи вимоги до обслуговування.

2.3. Інтенсифікація процесів теплопередачі.

Інтенсифікація процесів теплопередачі в регенеративних теплообмінниках є важливою задачею, яка спрямована на покращення тепловіддачі та підвищення загальної ефективності теплообміну [15], [16]. Це можна досягти за допомогою різних методів, що покращують теплообмін між потоками теплоносія і дозволяють ефективніше використовувати енергію. Тож, основні методи інтенсифікації теплопередачі: використання турбулізаторів, тобто спеціальних вставок або елементів, що сприяють створенню турбулентного потоку, які можуть покращити тепловіддачу за рахунок збільшення інтенсивності руху теплоносія. Застосування ребристих і хвилястих поверхонь: Це збільшує площу поверхні та покращує тепловіддачу, особливо у газоподібних теплоносіїв, що мають низьку теплопровідність. Оптимізація швидкості потоків, а саме підбір оптимальної швидкості руху теплоносія для забезпечення найефективнішого теплопередавання, що запобігає ламінарним зонам і зменшує втрати.

Підвищення якості обслуговування та очищення**

Регулярні перевірки та профілактичне обслуговування є основою довговічності та максимальної продуктивності роботи теплообмінників. Це включає:

- **візуальний огляд:** перевірка на наявність ознак корозії, ерозії, забруднення або механічних пошкоджень на ребристих трубах, вентиляторах та інших компонентах.
- **чищення та видалення забруднень:** періодичне очищення ребристих поверхонь для видалення будь-якого накопиченого бруду, сміття або накипу, які можуть погіршити теплопередачу. Впровадження автоматичних систем очищення, які мінімізують зупинки обладнання і

забезпечують стабільність теплопередачі. Використання хімічних і фізичних методів для зняття відкладень: Наприклад, ультразвукове очищення або застосування спеціальних хімічних реагентів для видалення забруднень

- **технічне обслуговування вентиляторів:** забезпечення роботи вентиляторів на оптимальній швидкості та ефективності та усунення будь-яких механічних проблем або дисбалансу.
- **перевірка колекторів і трубопроводів:** Перевірка цілісності вхідних і вихідних колекторів, а також пов'язаних з ними трубопроводів для виявлення та вирішення будь-яких потенційних проблем.

Постійний моніторинг і аналіз показників продуктивності теплообмінників можуть допомогти виявити можливості для оптимізації та забезпечити роботу обмінника на максимальній ефективності. Основні показники ефективності, які слід відстежувати, включають:

- **теплова ефективність:** моніторинг фактичної швидкості теплопередачі порівняно з проектними параметрами для виявлення будь-якого погіршення продуктивності.
- **падіння тиску:** Вимірювання падіння тиску на стороні повітря та рідини в теплообміннику для виявлення будь-яких завалів або забруднень.
- **рівні вібрації та шуму:** відстеження змін у моделях вібрації та шуму може вказувати на можливі механічні проблеми з вентиляторами чи іншими компонентами.

Регулярно аналізуючи ці показники ефективності та впроваджуючи коригувальні заходи, оператори електростанцій можуть продовжити термін служби своїх теплообмінників з повітряним охолодженням і підтримувати оптимальне управління теплом на своїх об'єктах.

Окрім звичайних перевірок і моніторингу, електростанції можуть застосовувати проактивне технічне обслуговування та стратегії продовження

терміну служби, щоб забезпечити довгострокову надійність і ефективність своїх теплообмінників з повітряним охолодженням. Ці стратегії можуть включати:

- **прогнозне технічне обслуговування:** використання передових технологій, таких як аналіз вібрації, термографія або ультразвукове випробування, щоб виявити потенційні проблеми до їх загострення.
- **оновлення компонентів:** заміна застарілих або непрацездатних компонентів, таких як вентилятори, двигуни або системи керування, для підвищення загальної ефективності та надійності.
- **обробка поверхні та покриття:** нанесення спеціальних покриттів або обробки поверхні на оребрені труби та інші компоненти для пом'якшення корозії, ерозії та забруднення.

Застосовуючи проактивний, комплексний підхід до технічного обслуговування та оптимізації регенеративних теплообмінників, оператори різноманітних підприємств, електростанцій тощо можуть максимізувати термін служби та продуктивність цих критично важливих систем керування температурою, зрештою покращуючи загальну ефективність і надійність установки .

2.4. Застосування сучасних технологій моделювання та аналізу.

Сфера технологій регенеративних теплообмінників з повітряним охолодженням постійно розвивається, зумовлена потребою в більш ефективних, стійких і рентабельних рішеннях для управління процесами в енергетиці. Ось деякі інноваційні програми та нові тенденції, які формують майбутнє для теплообмінників:

- комп'ютерне моделювання (CFD-аналіз): використання методів чисельного моделювання для аналізу потоків і теплових процесів у теплообміннику. Це дозволяє оптимізувати конструкцію і робочі параметри без необхідності виготовлення фізичних прототипів.

- програмне забезпечення для моніторингу продуктивності: Спеціальні програми, які відстежують роботу теплообмінника в режимі реального часу і дають рекомендації щодо оптимізації.
- машинне навчання для прогнозування зносу: використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування можливих поломок та обслуговування, що знижує ризик зниження ефективності.

Так, наприклад, інноваційні застосування та нові тенденції в теплообмінниках з повітряним охолодженням для виробництва електроенергії це гібридні системи охолодження.

Інтеграція теплообмінників з повітряним охолодженням з іншими технологіями охолодження, такими як вологі градирні або гібридні волого-сухі системи охолодження, стає все більш поширеною на електростанціях. Ці гібридні системи використовують сильні сторони різних методів охолодження для оптимізації управління температурою, зменшення споживання води та підвищення загальної енергоефективності.

Також, розробка модульних і масштабованих конструкцій теплообмінників з повітряним охолодженням дозволяє електростанціям легко адаптувати свою холодопродуктивність до мінливих експлуатаційних потреб. Ця гнучкість дозволяє операторам установок узгоджувати продуктивність таких теплообмінників з різними тепловими навантаженнями протягом життєвого циклу установки, підвищуючи ефективність і зменшуючи потребу у дорогому капітальному ремонті системи.

Оскільки енергетична галузь стикається зі зростаючим тиском щодо зменшення впливу на навколишнє середовище, конструкції теплообмінників з повітряним охолодженням розвиваються, щоб включати більш стійкі та екологічні функції. Це може включати використання відновлюваних матеріалів, зменшення споживання енергії та мінімізацію споживання води, що узгоджується з прагненням галузі до більш екологічної та екологічної діяльності.

Перебуваючи в курсі цих інноваційних застосувань і нових тенденцій, оператори електростанцій можуть скористатися перевагами останніх досягнень у технології теплообмінників з повітряним охолодженням, оптимізуючи свої можливості управління температурою та забезпечуючи більш стійке майбутнє для своєї діяльності.

2.5. Висновок до розділу 2.

Підвищення ефективності регенеративних теплообмінників можливе через конструктивні вдосконалення, використання нових матеріалів, інтенсифікацію теплопередачі, оптимізацію режимів роботи та застосування сучасних технологій для контролю і моніторингу процесів. Інвестиції в ці заходи забезпечать зменшення енерговитрат, підвищення продуктивності та довговічність теплообмінників у промислових умовах

Використання ефективних матеріалів у регенеративних теплообмінниках дозволяє підвищити їх теплопровідність, знизити витрати на обслуговування та продовжити термін експлуатації. Матеріали з високою теплопровідністю, антикорозійні покриття, наноматеріали і композити відкривають нові можливості для підвищення ефективності та надійності теплообмінників, особливо у вимогливих промислових умовах..

Теплообмінники з повітряним охолодженням стали незамінними компонентами в електроенергетиці, відіграючи вирішальну роль у підтримці ефективності, надійності та екологічної стійкості роботи електростанцій. Розуміючи принципи проектування, інженерні міркування та найкращі практики технічного обслуговування, оператори електростанцій можуть розкрити повний потенціал своїх систем, забезпечуючи оптимальне керування теплом та енергоефективність на своїх об'єктах.

РОЗДІЛ 3

ВИКОРИСТАННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТСК

3.1. Застосування регенеративних теплообмінників і водневих ТСК.

Робота термосорбційних компресорів (ТСК) характеризується циклічністю процесів: у період десорбції до генератора підводиться тепло, а в період сорбції відводиться. Це дозволяє провести паралель із роботою регенеративних теплообмінників, які також мають циклічний характер із періодичним нагріванням і охолодженням насадки. Обидва процеси супроводжуються зміною температури теплоносіїв і матеріалу в часі та просторі, що дає підстави для спільного використання регенеративних теплообмінників і ТСК для підвищення їх енергоефективності.

На рис. 3.1 показана схема теплових потоків ТСК із регенерацією енергії.

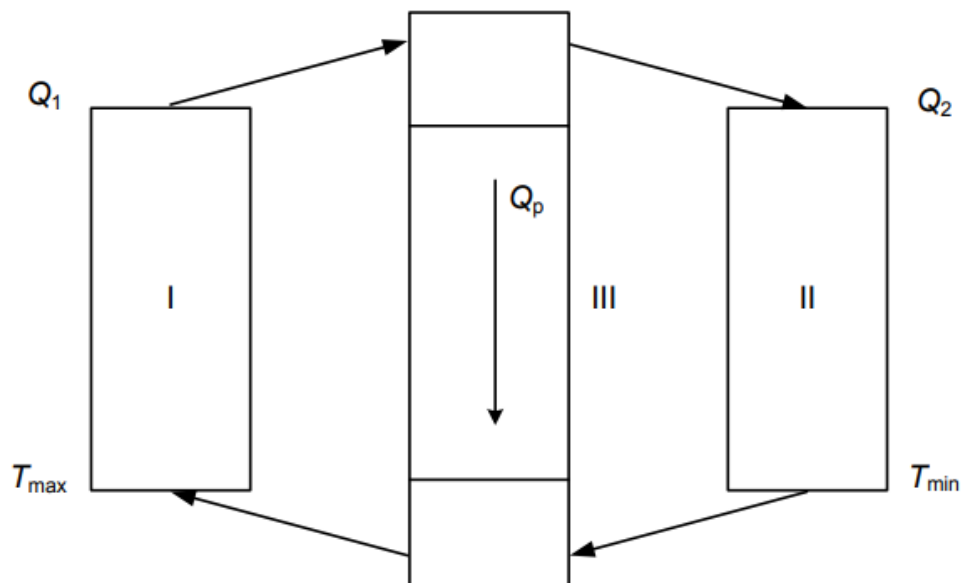


Рис. 3.1. Схема теплових потоків ТСК із регенерацією теплоти.

Виокремлено три зони: зона I — десорбція при T_{\max} ; зона II — сорбція при T_{\min} ; зона III — регенерація, де відбувається накопичення тепла і передача її між зонами I та II. Використання тепла перехідних процесів і використання низькопотенційного тепла дозволяє значно знизити втрати енергії та підвищити ефективність роботи ТСК.

У роботах [2–4] спостерігається кілька схем ТСК із регенерацією енергії. Із перспективних варіантів є використання тепла перехідних процесів у додатковому контурі, де перед і після генераторів-адсорберів встановлено регенератори з теплоакумуючим матеріалом, таким як кварц, базальт чи гофрована металева стрічка. На рисунку 3.2 представлено теплову схему високотемпературної установки (ВТУ) із ТСК, підключеною до тракту відведення газів.

Принцип роботи обладнання за цією схемою полягає в наступному. Відхідні димові гази з температурою t_{t1} після проходження через високотемпературну установку (ВТУ) 1 потрапляють у регенеративний теплообмінник 2б. У цьому пристрої гази охолоджуються до температури t_{t2} , одночасно нагріваючи насадку. Частина газів після теплообмінника прямує в бічний відвід газоходу й подається до генераторів-сорберів 3б, де використовується як джерело тепла. Після цього гази проходять через регенератор 4, у якому здійснюється акумуляція тепла, що відводиться в процесі десорбції.

Далі димові гази з температурою t_{t3} повертаються в основний газохід, де змішуються з потоком газів із температурою t_{t2} , а потім із температурою t_{t4} надходять у димар. Одночасно холодне повітря, що має температуру $t_{\text{пов1}}$, рівну температурі навколишнього середовища, подається до генератора 3а, де виконує функцію охолоджуючого теплоносія, підтримуючи необхідний температурний рівень для процесу сорбції водню.

Після проходження через генератор 3а повітря нагрівається до температури $t_{\text{пов}2}$ і змішується з основним потоком, що має температуру $t_{\text{пов}1}$. Об'єднаний потік із температурою $t_{\text{пов}3}$ надходить у регенеративний теплообмінник 2а, який працює в режимі нагрівання повітря для процесу горіння. Далі повітря підігрівається до температури $t_{\text{пов}4}$ і подається в палинкові пристрої ВТУ.

Невирішені аспекти проблеми

Для підвищення ефективності таких теплотехнологічних схем важливими залишаються два завдання:

1. Вибір оптимальних теплообмінників, які максимально використовують теплоту перехідних процесів і повертають її в зону десорбції.
2. Встановлення оптимальних режимів роботи термосорбційних компресорів (ТСК).

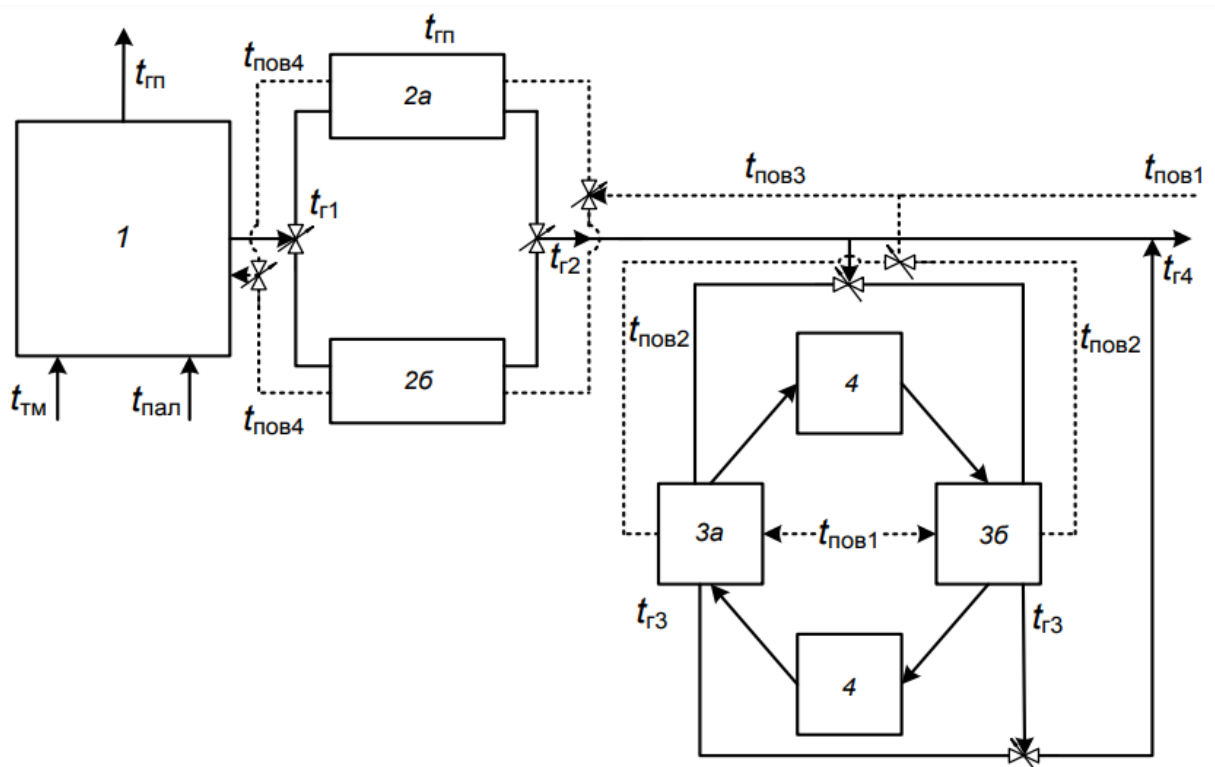


Рис. 3.2. Теплова схема високотемпературного теплотехнологічного комплексу з інтеграцією ТСК:

1 - плавильна піч;

- 2 - регенеративні теплообмінники для підігріву повітря горіння;
- 3 - генератори-адсорбери;
- 4 - регенеративні теплообмінники для використання теплоти перехідних процесів;

t_{TM} - температура технологічних матеріалів;

t_{TP} - температура готового продукту;

$t_{\text{Пал}}$ – температура палива, що подається в піч.

Одним із перспективних варіантів теплообмінних пристроїв у цьому контексті є теплообмінники з фазовим переходом, які широко використовуються на геліостанціях. Їх основними перевагами є висока теплоємність, стабільність температури в процесі роботи та низький робочий тиск. Проте наразі залишаються невирішеними питання ефективного теплообміну з акумулюючим середовищем, зниження вартості таких пристроїв та забезпечення параметрів контрольованої атмосфери.

Дослідження показують, що завдяки «залишковому» тепловому ефекту, який виникає під час фазового переходу, кількість теплоти, переданої в регенеративній насадці, значно перевищує аналогічні показники традиційних насадок.

Ключовим аспектом у розробці системи регенерації теплоти перехідних процесів є проведення точних розрахунків та вибір конструкції й матеріалів компонентів системи, які забезпечать її ефективність, надійність і тривалий термін служби. Особливу увагу слід приділити вибору оптимальної конструкції регенеративних теплообмінників, теплоакumuлюючих матеріалів із відповідними характеристиками та проміжного теплоносія.

Застосування різноманітних теплоакumuлюючих матеріалів у системах регенерації потребує комплексного підходу, спрямованого на максимальне використання їхніх переваг і усунення недоліків, властивих існуючим технологічним рішенням.

Вирішення цих завдань включає розробку методики розрахунків теплообмінних апаратів із використанням матеріалів із фазовим переходом для створення ефективних систем регенерації теплоти перехідних процесів термосорбційних компресорів. Основною метою цього дослідження є вирішення зазначених питань.

Для використання в системах регенерації перехідних процесів термосорбційних компресорів (ТСК) пропонується застосовувати регенеративні теплообмінники, у яких теплоакумулюючий матеріал (ТАМ) розміщується в окремих трубках. Кожна трубка має циліндричну форму з внутрішнім радіусом R і товщиною стінки δ , виготовлена з матеріалу, стійкого до хімічних реакцій із плавким ТАМ при робочих температурах. У середині трубки розташований матеріал, температура плавлення якого відповідає середній температурі теплоносія в теплообміннику.

При нагріванні теплообмінника тепло спочатку поглинається стінками трубки та ТАМ, а потім відбувається плавлення матеріалу ядра. У процесі фазового переходу межа розділу фаз поступово поширюється, захоплюючи все більший об'єм початкової твердої фази. Під час охолодження, коли температура теплоносія знижується нижче точки плавлення, матеріал ядра твердне, супроводжуючись зниженням середньої температури твердої фази.

У роботі представлено методику й алгоритм проектування теплового акумулятора для систем регенерації ТСК, де як регенеративну насадку використовується матеріал із фазовим переходом.

Етапи розробки:

1. Вибір матеріалів

Підбираються матеріали для ядра і стінок теплоакумулюючих елементів. Температура плавлення матеріалу ядра повинна приблизно відповідати середній температурі гарячого теплоносія. Матеріал стінок повинен бути хімічно нейтральним до плавкого стану ТАМ.

2. Компонування теплообмінника

Виконується початкове проектування теплообмінника, включаючи визначення розмірів теплообмінної поверхні та схеми розташування елементів. На цьому етапі задається швидкість потоку теплоносія. Для випадків із варіативною температурою гарячого теплоносія розраховуються максимальне і середнє значення питомого теплового потоку протягом заданого періоду.

Цей підхід забезпечує ефективне використання фазових переходів для акумуляції й віддачі теплової енергії, оптимізуючи роботу систем регенерації ТСК.

3.2. Розрахунок тривалості циклу роботи теплообмінника.

Цей розрахунковий блок призначений для визначення тривалості робочого циклу теплообмінника. Тривалість нагрівання робочого тіла циліндра до температури плавлення ядра збільшується за відповідною формулою:

$$\tau_H = \frac{M \Delta i_m}{F_H q_1} = \frac{\Delta i_m}{q_1 \cdot K_c} \delta \rho_m \quad (1)$$

де Δi_m – питоме збільшення ентальпії тіла в процесі нагрівання, кДж/кг;

M – маса тіла, кг;

F_H – величина поверхні нагрівання, м².

q_1 – тепловий потік, що підводиться дорозплавленого робочого тіла, кДж/м²,

ρ_m – густина матеріалу циліндра, кг/м³;

δ – товщина стінок, м.

У разі симетричного нагрівання геометрична й фактична поверхня збігаються. За несиметричного нагрівання ці поверхні не є ідентичними, що враховується при розрахунках.

$$K_{ц} = \frac{1}{1 - \delta/D}$$

$K_{ц}$ – коефіцієнт, що залежить від геометричних характеристик циліндра.

Для визначення часу плавлення матеріалу ядра спочатку потрібно обчислити число Коссовича Ko і безрозмірний час Fo .

$$Fo_{пл} = \frac{1}{K_{\phi} \cdot K_q \cdot K_t} + \frac{Ko}{4} \quad (2)$$

де K_t – коефіцієнт розподілу температур по товщині розплавленої зони;

K_q – коефіцієнт усереднення теплового потоку;

K_{ϕ} – коефіцієнт форми тіла.

Тривалість процесу плавлення ТАМ теплообмінника складає величину

$$\tau_{пл} = Fo_{пл} \frac{R^2 \rho_m c_m}{\lambda_m} \quad (2)$$

На наступному етапі розрахунків збільшується обсяг теплоакумуючої насадки та площа нагрівальної поверхні теплового акумулятора. Це створюється на основі рівня теплового балансу з урахуванням теплоти фазового переходу. При цій кількості теплоти, накопиченої теплообмінником під час нагрівання, прирівнюється до кількості теплоти, яку сприймають теплообмінні елементи, з урахуванням теплоти плавлення ядра.

При аналізі процесу плавлення матеріалів у конкретному агрегаті важливо застосувати загальну тривалість цього процесу. Раніше динаміка плавлення раніше не враховувалась, після тепла, витрачена на розплавлення, не використовувалася повторно. Однак у випадку елементів регенеративних теплообмінників, які акумулюють енергію за рахунок теплоти фазового

переходу, необхідно знати лише тривалість плавлення, але й кількість теплоти, що витрачається на цей процес. Ця теплота в подальшому, під час кристалізації, використовується для підвищення температури теплоносія.

Кількість теплоти, акумульованої в напівциклі роботи ТСК

$$Q_p = M_{\text{ТН}} \cdot (c'_{\text{ТН}} T'_{\text{ТН}} - \bar{c}''_{\text{ТН}} \bar{T}''_{\text{ТН}}) \cdot \tau_d \quad (3)$$

де Q_p – кількість теплоти, що акумульована в напівциклі роботи ТСК, кДж;

$T'_{\text{ТН}}$ – значення середньої за цикл температура гарячого теплоносія перед теплообмінником, К;

$\bar{T}''_{\text{ТН}}$ – середня за цикл температура гарячого теплоносія після теплообмінника, К;

$c'_{\text{ТН}}, \bar{c}''_{\text{ТН}}$ – теплоємності теплоносія при відповідній температурі, кДж/(кг·К);

$M_{\text{ТН}}$ – масова витрата теплоносія, кг/с;

τ_d – тривалість напівциклу роботи генератора-сорбера, с.

Загальна кількість теплоти, що засвоєна всіма теплообмінними елементами:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{пл}} \quad (4)$$

де $Q_{\text{тр}}$ – кількість теплоти, що засвоюється масою трубок теплообмінника;

$Q_{\text{м}}$ – кількість теплоти, що засвоюється масою матеріалу насадки;

$Q_{\text{пл}}$ – кількість теплоти, що витрачається на розплавлення ТАМ.

Ці складові розраховуються в такий спосіб:

$$Q_{\text{тр}} = m_{\text{тр}} \cdot n_{\text{ел}} \cdot c_{\text{тр}} \cdot (\bar{T}'_{\text{н}} - \bar{T}''_{\text{н}})$$

$$Q_M = m_M \cdot n_{\text{ел}} \cdot c_M \cdot (\bar{T}'_H - \bar{T}''_H)$$

$$Q_{\text{пл}} = m_M \cdot n_{\text{ел}} \cdot q_{\text{пл м}}$$

де $m_{\text{ст}}$ та m_M – маса стінок однієї трубки та речовини, що плавиться, кг;
 $c_{\text{тр}}$ – середня масова теплоємність матеріалу корпусу теплообмінного елемента, кДж/(кг·К);

$n_{\text{ел}}$ – кількість теплообмінних елементів в регенераторі, шт.;

$q_{\text{пл м}}$ – питома теплота плавлення ТАМ, кДж/кг.

Кількість теплоти, акумульованої в напівциклі роботи ТСК, залежить від витрат теплообмінних елементів, яка є початково невідомою. Тому першу чергу обчислюється кількість теплоти, яка акумулює один теплообмінний елемент $Q_{\text{ел1}}$, після чого за рівнем теплового балансу збільшилася загальна кількість елементів теплообмінника. співвідношення виражається:

$$n_{\text{ел}} = Q_p / Q_{\text{ел1}}$$

де величина Q_p – кількість теплоти, що передається насадці регенеративного теплообмінника.

На основі отриманих даних збільшується загальна поверхня теплообміну, після чого створюється компонент теплообмінних елементів. Для забезпечення тривалості режимів роботи генераторів-сорберів і теплообмінників необхідно порівняти суму часу нагрівання матеріалу стінки трубки та плавлення ядра зі значенням тривалості напівциклу роботи генератора-сорбера τ_r .

Виправлення невідповідностей.

Якщо виявляється невідповідність між періодами роботи генератора-сорбера та теплообмінників, необхідно провести коригування. Це може включати зміну типу матеріалу ядра (з урахуванням його теплофізичних властивостей) або модифікацію розмірів і компонування теплообмінних

елементів. Такий підхід забезпечує оптимальну синхронізацію системи роботи та ефективність енергозбереження.

3.3. Висновок до розділу 3.

Отже, застосування різноманітних теплоакумулюючих матеріалів для систем регенерації вимагає комплексного підходу до розробки рішень, спрямованих на максимальне використання позитивних якостей теплоакумулюючих матеріалів (ТАМ) і виключення існуючих недоліків для відомих технологічних пропозицій.

Розроблено методику та алгоритм розрахунку теплообмінних апаратів для випадків, коли в теплоакумулюючих елементах регенераторів виготовлені матеріали з фазовим переходом. Такі матеріали є перспективними для створення системи регенерації теплоти перехідних процесів термосорбційних компресорів, спрямованих на підвищення їх енергоефективності.

Теплообмінні апарати цієї конструкції відзначаються компактними габаритами та можливістю використання недорогих хімічних сполук, які вже серйозно виробляються промисловістю. Завдяки додатковій теплоті плавлення теплоакумулюючих матеріалів ці апарати мають суттєво кращі теплотехнічні та масогабаритні характеристики завдяки регенеративним теплообмінникам, оснащеним нерухомою насадкою з традиційних матеріалів (таких як кварц, базальт чи металева стрічка), які раніше пропонувалися для застосування в системах регенерації перехідних процесів ТСК.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

4.1. Використання регенеративних теплообмінників з різними видами теплоакумулюючих насадок.

Регенеративні теплообмінники зі стаціонарною вогнетривкою насадкою активно використовують для нагрівання дуття плавильних печей доменного виробництва, повітря для горіння та низькокалорійних газових сумішей у коксових печах, а також для підігріву повітря в плавильних печах скляної промисловості при високих температурах (1000–1200°C). Хоча їх принцип роботи залишається незмінним, конструктивні особливості та експлуатаційні режими цих теплообмінників суттєво відрізняються залежно від конкретних умов застосування. Ці відмінності слід виконати під час теплотехнічних розрахунків [17].

Підвищення ефективності регенеративних систем у промислових паливних печах можливо завдяки вирішенню завдань теплообміну в насадці та аналізу теплового стану теплоаккумулятивного шару. Однак такі задачі ускладнюються через різноманітність геометричних параметрів насадок, використання різних вогнетривких матеріалів, зміну властивостей теплоносіїв і матеріалів у широкому температурному режимі, а також необхідно врахування умов їх експлуатації..

Для ефективного використання тепла димових газів у печах скловарного виробництва встановлюють регенеративні теплообмінники з фіксованою вогнетривкою насадження, які забезпечують нагрівання повітря для горіння [18]. Високотемпературний підігрів повітря в таких регенераторах сприяє підвищенню температури згоряння палива, що позитивно впливає на продуктивність печі та дозволяє знизити витрати органічного палива. Робота регенераторів має чітко виражений циклічний

характер, а тривалість циклів нагрівання та охолодження є ключовим фактором, що забезпечує ефективність їх експлуатації.

На початку роботи теплообмінник нагріває насадку за рахунок проходження гарячих газів. Коли насадка досягає максимальної температури, відбувається перемикання клапанів, а до насадки каналів дається холодне повітря. У цьому процесі насадка передає накопичене тепло повітрю, нагріваючи його, а сама поступово охолоджується. Після завершення охолодження цикл повторюється.

Регенеративні теплообмінники, що інтегруються з промисловими печами, мають різноманітні конструктивні рішення, які відрізняються типом насадки, а також розмірами та формою каналів [19]. У скловарних печах одним із ключових способів підвищення енергоефективності є утилізація теплової енергії димових газів у спеціалізованих теплообмінних пристроях. Теплові втрати через відхідні гази становлять 25–40 % загального тепла, яке надходить у піч, і залежать від таких факторів, як тип палива, конструкція печі та пальникових систем, а також вид продукції.

Для печі великої потужності найбільш ефективним є застосування регенеративних теплообмінників із найкращими видами теплоакumuлюючої насадки, що дозволяє значно зменшити втрати тепла.

Для регенераторів скловарних печей застосовуються насадки із суцільними каналами, такими як Каупера, хрестоподібна, та Топфштайн (рис. 3.1а, 3.1д, 3.1е), а також із переривчастими каналами, зокрема Сименса зі зміщеними та незміщеними каналами, і Ліхте (рис. 3.1, 3.1б, 3.1в, 3.1г). Ширина каналів цих насадок становить 100–260 мм, і вони виготовляються з вогнетривкої цегли або плавленолітових формованих елементів.

У доменних повітрянагрівачах використовують насадки з фасонних вогнетривких блоків із круглими каналами діаметром 25–41 мм (рис. 3.1ж), тоді як у регенераторах коксових печей використовують фасонне цегла зі щілинними каналами розміром 100×18 мм (рис. 3.1з). Такі насадки,

виготовлені зі стандартної вогнетривкої цегли, вже добре вивчені, ефективно впроваджені й широко застосовуються в скловарних печах різних конструкцій.

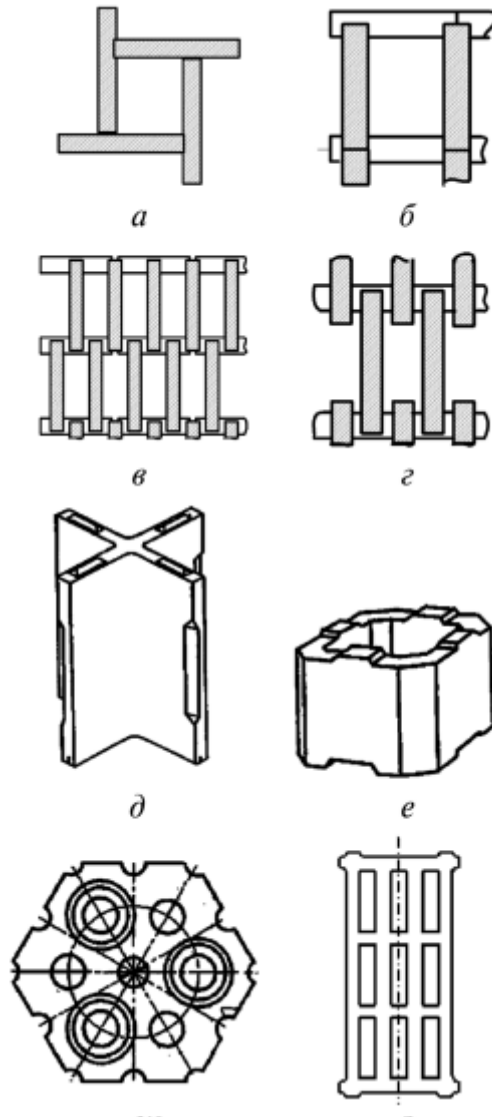


Рис. 4.1. Типи насадок регенеративних теплообмінників нагрівальних та плавильних печей

У регенераторах коксових печей використання насадок із фасонної цегли зі щільними каналами забезпечує невеликі значення коефіцієнтів складного теплообміну — 15–20 Вт/(м²·К). Проте завдяки розвиненій поверхні нагріву фасонної цегли ефективність теплообміну залишається високою, навіть з урахуванням незначних розмірів насадкових камер регенераторів відповідно до інших типів печей.

Останнім часом значного поширення набули корзинові та хрестоподібні насадки, виготовлені з плавленолітових формованих вогнетривкових матеріалів. Більше підвищення теплової ефективності регенераторів шляхом заміни насадок є обмеженим без збільшення їх габаритів, що часто неможливо під час реконструкції існуючих печей. Перспективним рішенням у цьому напрямі є застосування теплоакumuлюючих елементів із фазовим переходом, які використовують солі металів і їх суміші як плавки вставки. Завдяки використанню теплоти фазового переходу такі елементи дозволяють акумулювати додаткове тепло, що значно досягає теплову потужність теплообмінника без зміни його розмірів або режимних параметрів.

Проте для широкого впровадження таких технологій необхідно провести додаткові дослідження, зокрема моделювання складних нестационарних процесів теплообміну в регенераторах, а також підбір матеріалів, які відповідають умовам експлуатації регенераторів скловарних печей.

4.2. Використання теплоакumuлюючих елементів з фазовим переходом в насадці регенераторів.

Підвищення температури повітря для горіння в регенеративних теплообмінниках є одним із найефективніших способів зниження споживання палива та підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) скловарних печей. Втрати тепла з димовими газами в таких печах становлять близько 25–40%, що обумовлює необхідність модернізації утилізаторів димових газів. Основною метою цієї модернізації є збільшення кількості відібраного тепла від димових газів за допомогою регенеративних теплообмінників без значного збільшення їх габаритів або аеродинамічних втрат у газовому тракті.

Одним із перспективних рішень є впровадження теплоакumuлюючих елементів із фазовим переходом у насадках регенераторів [20]. Ключова

особливість таких матеріалів — здатність накопичувати «залишкову» теплоту під час фазового переходу. Одночасним завданням є вибір матеріалів, особливо плавкової вставки, яка б витримала агресивні умови використання насадок регенеративних теплообмінників. Наразі для високотемпературних установок перспективними є неорганічні сполуки, такі як BaSO_4 і Na_2SO_4 , у поєднанні з магнезитовими та периклазовими вогнетривами. Це з'єднання вже проходить випробування та впровадження в регенераторах доменних печей металургійної галузі, демонструючи високу стійкість до циклічних теплових навантажень і температурну стабільність.

Оцінка можливості використання таких матеріалів у теплоакumuлюючих елементах насадок потребує математичного моделювання складних теплообмінних процесів у квазістаціонарному режимі роботи регенеративних теплообмінників. Остаточні висновки також щодо ефективності таких систем модернізації із застосуванням насадок із фазовим переходом, а також вибір оптимальних матеріалів, можуть бути зроблені лише після проведення додаткових досліджень. Вони дозволяють врахувати комплекс факторів, що впливають на експлуатаційні характеристики таких конструкцій.

4.3 Висновок до розділу 4.

В даному розділі, проаналізувавши сучасні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей, можна зробити наступні висновки.

Найбільш ефективними типами насадок на сьогодні є насадка Ліхте з вогнетривкої цегли та насадка корзинового типу, виконана з плавленолихтих формових елементів. Для подальшого підвищення теплоакumuлюючих властивостей насадок пропонується використання цегли з плавкими вставками з «сольових» матеріалів, що додатково дозволить використовувати теплоту фазового переходу.

Отже, ефективності модернізації регенеративних теплообмінників шляхом використання насадки з фазовим переходом та вибір доцільних матеріалів можливо зробити тільки по результатах додаткових досліджень, за допомогою яких буде визначено вплив цілого комплексу різних факторів, що впливають на експлуатаційні характеристики теплоакумулюючих елементів такої конструкції.

ВИСНОВКИ

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

1. Регенеративні теплообмінники забезпечують ефективне енергозбереження, високу економічну віддачу та відповідають сучасним екологічним вимогам, що робить їх оптимальним вибором для різних галузей промисловості. Недоліки регенеративних теплообмінників, такі як складність конструкції, вартість обслуговування, схильність до забруднень і обмеження у використанні з агресивними середовищами, слід враховувати при виборі обладнання для конкретних умов експлуатації. Незважаючи на ці недоліки, регенеративні теплообмінники залишаються ефективними рішеннями у випадках, коли їх переваги значно перевищують можливі недоліки.

2. Підвищення ефективності регенеративних теплообмінників можливе через конструктивні вдосконалення, використання нових матеріалів, інтенсифікацію теплопередачі, оптимізацію режимів роботи та застосування сучасних технологій для контролю і моніторингу процесів. Інвестиції в ці заходи забезпечать зменшення енерговитрат, підвищення продуктивності та довговічність теплообмінників у промислових умовах.

3. Використання ефективних матеріалів у регенеративних теплообмінниках дозволяє підвищити їх теплопровідність, знизити витрати на обслуговування та продовжити термін експлуатації. Матеріали з високою теплопровідністю, антикорозійні покриття, наноматеріали і композити відкривають нові можливості для підвищення ефективності та надійності теплообмінників, особливо у вимогливих промислових умовах..

4. Теплообмінники з повітряним охолодженням стали незамінними компонентами в електроенергетиці, відіграючи вирішальну роль у підтримці ефективності, надійності та екологічної стійкості роботи електростанцій. Розуміючи принципи проектування, інженерні міркування та найкращі практики технічного обслуговування, оператори електростанцій можуть розкрити повний потенціал своїх систем АСНЕ, забезпечуючи оптимальне керування теплом та енергоефективність на своїх об'єктах.

5. Таким чином, проаналізувавши сучасні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей, можна зробити наступні висновки. Ефективність роботи регенераторів майже неможливо підвищити за рахунок заміни одного типа насадок на іншу без значного збільшення розмірів теплообмінника. Найбільш ефективними типами насадок на сьогодні є насадка Ліхте з вогнетривкої цегли та насадка корзинового типу, виконана з плавнелитих формових елементів. Для подальшого підвищення теплоакуючих властивостей насадок пропонується використання цегли з плавкими вставками з «сольових» матеріалів, що додатково дозволить використовувати теплоту фазового переходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергоефективність та енергозбереження: економічний, технікотехнологічний та екологічний аспекти : колективна монографія / Кол. авторів; за заг. ред. П.М. Макаренка, О.В. Калініченка, В.І. Аранчій. Полтава: ПП “Астроя”, 2019. 603 с.
2. Христян, Є. В. Х 93 Теплотехнологічні процеси та установки на залізничному транспорті [Текст]: навчальний посібник / Є. В. Христян, І. В. Титаренко; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – 269 с.
3. Мікульонок І.О. Інноваційне теплообмінне обладнання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 140 с.: іл. – Бібліогр.: с. 130–137.
4. Хітман Д. та Хейнес // Проектування теплообмінного обладнання: Основні принципи та практика, Видавництво Технічної Літератури, К., 2018. 208с.
5. Горбунов О. Д., Глущенко О. Л. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі у теплообмінниках регенеративного типу // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. - 2012. - Вип. 3. - С. 130-135
6. Назаренко І.А., Кузьменко А.А., Каюков Ю.М. Конспект лекцій з дисципліни «Теплообмінні апарати» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» іл.: Запоріжжя : НУЗП, 2023. 68 с.
7. Мукмінов, І., Бошкова, І., Волгушева, Н., Альтман, Е., Потапов, М. Теоретичне та експериментальне дослідження теплообміну в каналі з гранульованою насадкою. 2021. Refrigeration Engineering and Technology, 57(4), 264-272.
8. Краус, А. Д., Вільсон У. Р. Теплообмін: Принципи та дизайн. Видавництво МакГроу-Гілл, 2017. К. 176с.

9. Іванченко В.В., Барвін О.І, Штонда Ю.М. Конструювання та розрахунок кожухотрубчастих теплообмінних апаратів. Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006. 208 с.

10. Константинов С.М. Теплообмін: Підручник. - Київ: ВПІ ВПК "Політехніка": Інрес, 2005. - 304 с.

11. Кулінченко В.Р., Шевченко О.Ю. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу). Підручник. Київ: Фенікс, 2014.- 920 с.

12. Лабай В .Й. Тепломасообмін. Львів : Тріада Плюс, 2004. 258 с. 5. Лабай В .Й. Приклади і задачі з курсу тепломасообміну. Навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. 228 с

13. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств. Навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 200 с.

14. Бошкова, І., Волгушева, Н., Альтман, Е., Мукмінов, І., & Гречановський, А. (2021). Аналіз ефективності тепличного ґрунтового регенератора з гранульованою насадкою. *Refrigeration Engineering and Technology*, 56(3-4), 133-139.

15. Кошельник В.М., Кошельник А.В. Уточнена математична модель доменного повтрянагрівача // Вісник ХГПУ.1999. Вип. 49. С. 113 – 117.

16. Кошельнік О.В. Методика створення універсального обчислювального комплексу для моделювання регенеративних теплообмінників високотемпературних плавильних агрегатів // Східноєвропейський журнал нових технологій. 2007. №2/3 (26). С. 47 – 50.

17. Клімов Р.О. Оптимізація конструктивного виконання теплообмінних апаратів. Збірник нау-кових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). 2020. 1(36). С.88–93.

18. Кошельнік О.В., Здоров І.В. Визначення оптимальної тривалості режимів роботи регенераторів скловарних печей // Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали VII Всеукраїнської наук.- практи. інтернет-

конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (25 травня 2023 р., м. Хмельницький). – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2023. – 161 с. – С. 37-40.

19. Кошельнік О.В., Гойсан С.Б. Перспективні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей // Інтегровані технології та енергозбереження. 2021. №1. С.3-10.

20. Кошельнік О.В. Гойсан С.Б. Пугачова Т.М. Круглякова О.В. Павлова В.Г. Особливості застосування теплоакumuлюючих елементів з фазовим переходом в регенеративних теплообмінниках скловарних печей // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №1. С. 63-70.

21. Клімов Р.О. Оптимізація конструктивного виконання теплообмінних апаратів. Збірник нау-кових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). 2020. 1(36). С.88–93.

22. Клімов Р.О., Луста Є.О. Багатофакторні моделі проектування теплообмінників. Збірник нау-кових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). 2020. 2(37). С.49–54.

23. Кошельнік О.В. Застосування регенеративних теплообмінників для утилізації теплоти перехідних процесів термосорбційних металогідридних компресорів//Інтегровані технології та енергозбереження. 2011. №1. С.23-27.

24. Кошельнік О.В. Методика створення універсального обчислювального комплексу для моделювання регенеративних теплообмінників високотемпературних плавильних агрегатів // Східноєвропейський журнал передових технологій. 2007. №2/3 (26). С. 47-50.

25. Schmalenbach В. Influence of Gas Velocity and Current Characteristics on the Thermal Efficiency of Regenerative Chambers // Interceram. – 1986. – V. 35. – P. 42 – 44.

26. Вирозуб И.В., Ивницкая Н.С., Лейбович Р.Е. и др. Розрахунки коксових печей і процесів коксування з використання ЕВМ. К.: Вища школа, 1989. – 304 с.

27. Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів [Текст]: моногр. / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, І. Л. Шилович, С. В. Лелека, І. В. Пулінець – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 103 с.
28. Білонога Ю. Л. Оптимізація швидкості руху рідин в теплообмінниках // Хім. пром-сть України. 1999. № 5. - С. 33-35.
29. Каневець Г.Є. Узагальнені методи розрахунку теплообмінних апаратів. – Київ: Наук. Думка. – 1979. – 352с.
30. Іченко О. Т. Тепломасообмінні пристрої ТЕС і АЕС: Навч. надбавка. – К.: Вища школа. – 1992. – 207с.
31. Євтушенко О. Дослідження теплообмінника з спеціальною закономірністю розподілу коефіцієнтів теплопередачі вздовж поверхні теплообміну // Теплофізика і теплоенергетика. 2016. №38 (3). С. 27-34.
32. Кошельник В.М., Шульгин Ю.В., Кошельник О.В., Соловей В.В. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів: навч. посібник. – Х.: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2013. – 216 с.
33. Братута Е.Г., Павленко А.М., Кошляк А.В., Круглякова О.В. Пористі теплоізоляційні матеріали. Х.: ТОВ «ЕДЕНА», 2010. 107 с.
34. Братута Е. Г. Аналіз ефективності калориферного підігріву повітря у системах опалення, вентиляції та кондиціонування // Проблеми економії енергії: 5-а міжнар. наук.-практич. конфер., 23-24 жовтня 2008 р. : зб. наук. праць. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2008. – С. 274–278.
35. Pavel Drabek, Martin Zálešák, Michal Oplus - til's . The Impact of the Heat Accumulation on Energy Efficiency of Building // In book: Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium 2016 . – P. 1045 - 1051.
36. Демченко В., Коник А. Основні аспекти процесів теплоакмулювання // Наукові праці. – 2020. – №84(1). С. 48 – 53.