

УДК536.24; 628.81.

В.В. Бондаренко, Д.В. Кожемяка, А.С. Гавриш

ПРО КЛАСИФІКАЦІЮ ТЕПЛОБМІННИКІВ-КОНДЕНСАТОРІВ ТА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ТЕПЛОБМІНУ

Анотація – Останнім часом зріс інтерес вчених до вивчення високо інтенсивних процесів теплообміну в теплообмінниках-конденсаторах. Розглянута класифікація конденсаторів. Використання комплексних нових методів обробки поверхонь дозволяє збільшити коефіцієнт тепловіддачі та теплопередачі в теплообмінних апаратах.

Ключові слова – теплообмін, теплопередача, нанотехнології, ліо- та гідрофобні поверхні.

О КЛАССИФИКАЦИИ ТЕПЛОБМЕННИКОВ-КОНДЕНСАТОРОВ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОБМЕНА

Аннотация – За последнее время возрос интерес ученых к изучению высокоинтенсивных процессов теплообмена в теплообменниках-конденсаторах. Рассмотрена классификация конденсаторов. Использование комплексных новых методов обработки поверхностей позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи и теплопередачи в теплообменных аппаратах.

Ключевые слова – теплообмен, теплопередача, нанотехнологии, лио- и гидрофобные поверхности.

ABOUT CONDENSATION HEAT EXCHANGERS CLASSIFICATION AND HEAT TRANSFER INTENSIFICATION

Annotation – Last time has increased interest of scientists to study highly intensive heat exchange at condensation heat exchange apparatus. Heat exchangers classification is considered. Using of new complex methods of surfactants to surface protection is considered. This increases the heat exchange and heat transfer coefficients in heat exchange apparatus.

Key words – heat exchange, heat transfer, nanotechnology, lyo- and hydrophobic surfaces.

Вступ

Останнім часом зростає інтерес вчених різних країн до створення і використання в промислових масштабах сучасних багатофункціональних покриттів теплообмінних поверхонь. Цьому сприяє зростання можливостей нанотехнологій, які дозволяють синтезувати новітні композиції з елементами органічних сполук, до цього числа також належать поверхнево-активні речовини (ПАР). Компоненти яких дозволяють захищати теплообмінне обладнання від корозійно-ерозійних процесів [1-2].

Конденсатори отримали широке розповсюдження в різних установках промислової теплоенергетики. Конденсація водяної пари, як найпоширенішого робочого тіла в промисловості, має достатню інтенсивність та представляє особливий інтерес для дослідження. З метою інтенсифікації теплообміну в поверхневих теплообмінних апаратах (ТОА) застосовують різні способи зниження термічного опору конденсату. Руйнування конденсаційної плівки та забезпечення безпосереднього контакту пари з поверхнею теплообміну досягається застосуванням поверхнево-активних речовин, які сприяють створенню і підтримці краплинної конденсації. Сама по собі металева теплообмінна поверхня є в більшості випадків гідрофільною. В окремих випадках у краплинному або псевдо краплинному режимах може бути сконденсована лише перша невеличка порція пари, потім настає заливання теплообмінної поверхні і конденсація триває в плівковому режимі. Процес краплинної конденсації є високо інтенсивним процесом теплообміну при якому значення коефіцієнтів тепловіддачі в кілька разів перевищують описані Нуссельтовським рішенням

значення коефіцієнтів тепловіддачі для плівкової конденсації.

1 Існуючі конструкції конденсаторів

Конденсаторами традиційно називають технологічні теплообмінні апарати, в яких реалізуються процеси фазового перетворення різних середовищ за рахунок охолодження (відводу прихованої теплоти конденсації) іншими середовищами [3-4]. Все різноманіття конструкцій конденсаторів може бути розділене на декілька груп за наведеними нижче ознаками. За схемою руху циркулюючих середовищ конденсатори, як і інші теплообмінні апарати, можуть бути регенеративними і рекуперативними. Регенеративні апарати діють періодично. Спочатку потік охолоджувальної речовини проходить через насадку, охолоджуючи її. Далі потоки перемикаються і через насадку пропускається пара, яка віддає їй теплоту і конденсується. Після нагрівання насадки процес повторюється. Даний спосіб має кілька суттєвих недоліків: процес конденсації досить енергоємний (у більшості речовин прихована теплота конденсації значна в порівнянні з теплоємністю матеріалу насадок), тому перемикання доводиться виконувати дуже часто; конденсат не може повністю стекти з насадки, отже, стане імовірним контакт первинного і вторинного теплоносіїв. При цьому, навіть якщо обидва теплоносія взаємно нерозчинні і хімічно неактивні, відбуватиметься їх обоїльне забруднення; даний процес погано піддається автоматизації.

З цих причин регенеративні конденсатори в промисловості майже не використовуються. У порівнянні з ними в рекуперативних апаратах відбувається постійний спільний рух робочого та охолоджуючого середовищ, розділених поверхнею теплообміну. Даний процес позбавлений описаних вище недоліків і тому отримав найбільш широке розповсюдження. За напрямком руху середовищ рекуперативні апарати діляться на супутні (прямоточні), проти точні, перехресні та комбіновані.

Згідно з іншою схемою класифікації, за схемою руху циркулюючих середовищ конденсатори поділяються на апарати змішування і поверхневі. У конденсаторі змішування пара безпосередньо контактує з охолоджуючим агентом (найчастіше водою або повітрям). Залежно від способу відведення конденсату та газів, які не конденсуються, теплообмінники змішування діляться на вологі та сухі. Поверхневі конденсатори в даному випадку будуть відповідати описаним вище рекуперативним теплообмінникам.

Таблиця 1. Класифікація конденсаторів з відводом тепла в зовнішнє середовище

Тип	Підтип 1	Підтип 2	
Повітряні	Вільним рухом повітря		
	З примусовим рухом повітря		
Повітряно-водяні	Зрошувальні		
	Випарникові		
Водяні	Кожухотрубні	вертикальні(КТВ)	
		горизонтальні(КТГ)	
	Елементні		
	Двохтрубні (труба в трубі)		
	Панельні	панельно-занурені	
		панельно-пакетні	
Пластинчаті			

За родом охолоджуючої речовини конденсатори можна розділити на апарати з відведенням теплоти в зовнішнє середовище і з утилізацією тепла. При відведенні теплоти в зовнішнє середовище в якості охолоджуючого агента зазвичай виступає повітря чи вода, відповідно конденсатори конструктивно поділяються на апарати повітряного або водяного

охолодження. При утилізації теплоти в якості охолоджуючого агента може виступати практично будь-яка речовина, наприклад одна з речовин технологічної схеми, яка вимагає нагріву. З усього різноманіття існуючих конструкцій промислових конденсаторів найбільш поширені апарати з відводом тепла в зовнішнє середовище як більш універсальні і менш вимогливі до конкретних умов технологічного процесу. Існує безліч технічних рішень таких апаратів. Їх класифікація по конструкції наведена в табл. 1.

Важливою ознакою класифікації конденсаторів є наявність і вид ребер. Оребрення використовується в основному в конденсаторах, де в якості теплообмінної поверхні виступають труби. Причому, оребрення розташовується, як правило, із зовнішнього боку труб, що обумовлено міркуваннями спрощення виготовлення апаратів. Класифікація конденсаторів за типом зовнішнього оребрення наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Класифікація конденсаторів по типу зовнішнього оребрення

Тип	Підтип 1	Підтип 2	Підтип 3	Підтип 4	
Гладкі					
Оребрені	Дротові трубні				
	Листотрубні (панельні)	Щитові	Односторонні (однолистові)		
			двосторонні (дволистові)		
	Прокатно-зварні				
	З плоскими ребрами	Литі			
		Накатні			
		Навивні			
		Насадні	Круглі		
	Прямокутні		На одну трубу		
		На всі труби			

Відзначимо, що існують спеціальні моделі апаратів [3-4] із оребренням всередині труб. Однак, по конструкції ребер вони практично однакові: оребрення являє собою 8 - або 10-канальний сердечник із міді, алюмінію або сплавів кольорових металів, запресований всередині сталевій труби. Різниця може становити тільки в наявності або відсутності внутрішнього зв'язку між каналами, що реалізується шляхом змикання або не змикання ребер в центрі сердечника.

2 Інтенсивність теплообміну в конденсаторах

Порівняльний опис існуючих типів апаратів показує можливість їх застосування для ведення процесів повної або часткової конденсації [5-6]. Для оцінки ефективності конденсації необхідно розглянути і порівняти вплив на неї режимних параметрів роботи апарату. При цьому необхідно враховувати, що деякі параметри являються визначальними, а решта - залежними від них. Фактично при управлінні робочим процесом промислового апарату можливо міняти певні величини. До них відносять геометричні параметри та конструктивні особливості; робоче середовище, в т.ч. можливі добавки; початковий тиск і витрату середовища. Від цих величин залежать щільність теплового потоку q , швидкість руху робочого середовища W та ін. Швидкість руху теплоносіїв, в свою чергу, визначає і температуру робочої речовини t_p . Ця температура визначає основні теплофізичні параметри: теплоємність c_p , коефіцієнт динамічної в'язкості μ і коефіцієнт теплопровідності λ ; вхідну температуру охолоджуючої речовини (холодоносія) $t_{в1}$, витрату і режим подачі вторинного теплоносія. Разом з t_p ці величини визначають температурне поле, що виникає в апараті, в т.ч. температуру стінки $t_{ст}$, температуру границі розподілу фаз $t_{гр}$. Вищенаведені величини

визначають фізичні характеристики конденсатних утворень. Весь комплекс розглянутих величин впливатиме на значення середнього коефіцієнта теплопередачі в різних апаратах-теплообмінниках.

Розглянемо вплив вищенаведених параметрів на ефективність процесу конденсації в конденсаторах із активними гідро газодинамічними режимами руху теплоносіїв і "традиційної" конструкції. Для цього попередньо визначимо найбільш ефективний тип "традиційного" апарата для подальшого використання в якості зразка для порівняння. Для оцінки впливу конструктивних параметрів існуючих теплообмінних апаратів на ефективність процесів теплопередачі, які відбуваються у них, роздивимося табл. 3, де представлені зведені дані по середньому значенню коефіцієнта теплопередачі в різних теплотехнічних апаратах і теплообмінниках [3-4].

Таблиця 3. Значення середнього коефіцієнта теплопередачі в різних теплообмінниках

Процес теплопередачі	k, Вт/(м ² ·°С)
Від газу до газу (пластинчасті ТОА із вільним рухом середовищ)	10-25
Від газу до газу (будь-які ТОА з примусовим рухом середовищ)	20-50
Від газу до води (панельний повітряний теплообмінник)	60
Від газу до води (любі ТОА із примусовим рухом газу)	50-100
Від води до води (теплообмінники із рухом води по трубкам)	500 - 700
Від води до води (пластинчастий теплообмінник)	1000-1200
Від водяної пари, яка конденсується, до масел (горизонтальний кожухотрубний конденсатор)	~ 350
Від водяної пари, яка конденсується, до води (горизонтальний кожухотрубний конденсатор)	2900 - 3000
Від аміаку, який конденсується, до води (горизонтальний кожухотрубний конденсатор)	700-1000
Від фреону, який конденсується, до води (горизонтальний кожухотрубний зрошувальний конденсатор)	700-930
Від аміаку чи фреону, який конденсується, до повітря (повітряний конденсатор)	-30
Від аміаку, що випаровується, до холодоносія (кожухотрубний випарник типу ВКТ)	-3500
Від аміаку, що випаровується, до холодоносія (панельний випарник)	2300-3500
Від фреону, що випаровується, до холодоносія (кожухотрубний випарник із гладкими сталевими трубами)	2300-4650
Від фреону, що випаровується, до холодоносія (кожухотрубний випарник із мідними трубами накатаного оребрення)	4650-6400
Від фреону, що випаровується, до холодоносія (внутрішньо трубний випарник типу ВТВР)	2300-11000

Таким чином, із конструктивних критеріїв, що впливають на ефективність теплопередачі, можна виділити: організацію примусового руху середовищ, що особливо ефективно проявляється у випадку теплообміну з газом (повітрям); оребрення поверхні; застосування пластинчастих апаратів в порівнянні з іншими типами у разі теплообміну без

фазового переходу; застосування кожухотрубних і вертикальних апаратів в порівнянні з іншими типами в разі реалізації процесу фазового переходу.

Відзначимо, що теплопередача в конденсаторах із активними гідро газодинамічними режимами руху теплоносіїв істотно перевершує відповідні величини для традиційних типів апаратів. Для сучасного підприємства головним завданням є проведення технологічного процесу з максимальною продуктивністю, мінімальними трудовими та енергетичними затратами. Особливо актуальними є питання енергозбереження в основних технологічних процесах, де великий відсоток технологічного часу припадає на процеси теплообміну. Ці процеси проходять у теплообмінній апаратурі на межі “середовище - стінка теплообмінника”, де концентрується до 98 % термічного опору [3]. Для ефективної роботи теплообмінної апаратури необхідно, щоб коефіцієнт теплопередачі k був максимальний, а рух рідини у ній здійснювався в турбулентному режимі, при якому передача тепла проходить інтенсивніше, ніж при ламінарному і перехідному режимах.

3 Особливі умови процесу конденсації

Конденсація являє собою процес із значними питомими тепловими потоками. Його достатньо складно суттєво інтенсифікувати. Тому, на режимах роботи із максимальними тепловими навантаженнями в промислових теплотехнічних апаратах однією із ключових умов є саме стабільність. Наявність активних гідро газодинамічними режимів руху теплоносіїв надає можливість отримати максимальні гранично допустимі величини коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації.

До особливих умов руху теплоносіїв із фазовим перетворенням, які не враховуються теоретичними моделями, відносяться випадки об'ємної та поверхневої краплинної конденсації. Конденсація, як і кипіння, відноситься до процесів із високою інтенсивністю. Її достатньо складно досліджувати із метою інтенсифікації роботи апаратів, які працюють на граничних режимах. Такі режими роботи обладнання із максимальним навантаженням, також складно підтримувати стабільними. Застосування апаратів із активними гідро газодинамічними режимами руху теплоносіїв ставить велике коло задач при гранично можливих максимальних коефіцієнтах тепловіддачі при конденсації. До них відносять задачі як традиційної в більшості випадків плівкової, так і краплинної, об'ємної та комбінованої конденсації. Визначним чинником буде саме теплопередача ТОВА.

На ефективність теплопередачі може значним чином впливати об'ємна та поверхнева краплинна конденсація. В об'ємі апарату рухається насичена або перегріта пара. При русі пара або паро газова суміш розширюється. В наслідок цього відбувається падіння її тиску і температури, і тим самим створюється деяке пересичення. В пересиченій парі навіть за умови відсутності сторонніх ядер конденсації починається утворення зародків рідкої фази за рахунок флуктуацій густини. Такі зародки будуть молекулярними комплексами. Вони можуть зростати лише коли перевищать деякий критичний розмір, який визначається зовнішніми умовами. Рівновага зародок-середовище буде нестійка. В подальшому можливим є розвиток зародків конденсації, або їх розпад.

Геометричні та енергетичні характеристики конденсаційних утворень залежно від конкретики процесу можуть відрізнятися одне від одного на декілька порядків [7]. Такий підхід ґрунтується на емпіричних співвідношеннях і залежить від характеристик конкретного процесу. Різноманіття параметрів конденсації, як на макро так і на мікро рівні, вимагає застосування інших підходів для опису цього процесу. Наприклад, розгляд теорії коагуляційного зростання краплин. Співіснування різних конденсатних утворень, і як

наслідок різних режимів конденсації: краплинної, плівкової і змішаної, дозволяє широко варіювати техніко-економічні показники теплотехнічного обладнання.

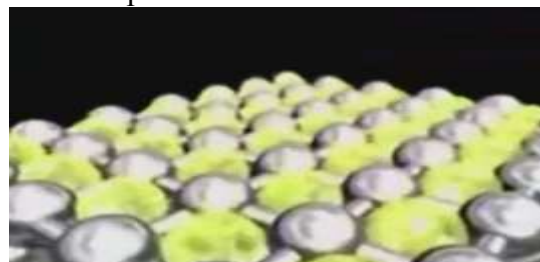
Останнім часом зростає інтерес до створення і використання в промислових масштабах ще й сучасних багатофункціональних покриттів теплообмінних поверхонь. Цьому сприяє зростання можливостей нанотехнологій, які дозволяють синтезувати новітні композиції з елементами органічних сполук, компоненти яких дозволяють захищати теплообмінне обладнання від корозійно-ерозійних процесів і мають, так звані, трибосистемні властивості [1-2]. Речовини, отримані за допомогою нанотехнологій із трибосистемними властивостями не вимиваються, не вимагають обов'язкової додаткової захисної обробки поверхні теплообміну, самі здійснюють захист, відновлення, реставрацію і консервацію оброблюваних матеріалів, зберігають газо-паропроникність, і відносяться до класу комплексних (композиційних) матеріалів.

Також для підвищення ефективності конденсації можуть застосовуватись й інші підходи. Наприклад, незначна вібрація покращує стікання і збір конденсату, вона також може спонукати виникнення краплинного режиму. Оброблення поверхонь теплообміну дає змогу виготовляти більш компактні апарати при незначному зростанні металоємності. Серед методів інтенсифікації теплообміну перевага надається тим, які призводять до технічних удосконалень і не потребують значних нових технологічних процесів. Такий підхід є перспективним напрямком розвитку і вдосконалення існуючих технологій.

4 Особливості трибосистемних покриттів

Пошук ефективних способів захисту поверхонь ведеться за певними напрямками: застосування нових ерозійно стійких матеріалів та покриттів, розробка оптимальних конструкцій, застосування зовнішніх впливів, наприклад, аерації, катодного захисту, використання електричних та електромагнітних полів, зміна властивостей рідини шляхом використання спеціальних добавок та ін. Для замкнених контурів одним з найбільш ефективних способів боротьби із ерозією є використання різноманітних поверхнево-активних речовин (ПАР). Ведення незначної кількості високомолекулярних сполук суттєво впливає на зміну в'язкості, поверхневого натягу та інших властивостей теплоносія. Захисна дія ПАР пояснюється теорією в'язко-еластичності полімерів та змінами в характері обтікання поверхонь. Однак, єдиної думки щодо механізму захисної дії ПАР дотепер не існує. Вплив ПАР є багатофакторним і залежить від природи речовини, характеру течії, властивості робочої рідини і т.д.

Для покриттів поверхонь характерними є певні фізико-хімічні властивості. Властивості та склад ліофобних зносостійких покриттів залежать від технології їх створення. При створенні новітніх поверхонь важливим є отримання так званих трибосистем (Рис. 1). Для цього необхідне дотримання балансу між притоком енергії та її віддачею в навколишнє середовище. Трибосистема є відкритою термодинамічною системою. Активні компоненти композиції забезпечують анізотропію механічних властивостей заново сформованого пласту із збереженням основного призначення теплообмінної поверхні.



а) нанесення багатофункціонального гідрофобізатора, б) утворення трибо системи
Рисунок 1 - Формування захисної поверхні під дією ПАР

Позитивний градієнт механічних властивостей поверхонь забезпечує ліо- та гідрофобність. Якщо порушується баланс, то система відреагує властивістю самоорганізації. Трибосистема або руйнує старі зв'язки, або утворює нові, шляхом структурного ускладнення. Поверхневі пласти накопичують, або віддають енергію, що призводить до зміни як механічних, так і теплофізичних характеристик. При цьому можливе утворення особливого стану речовини - трибоплазми, яка є нестійкою і може повернутись до вихідного стану речовини. Проходження зміни агрегатних станів може відбуватись із утворенням радикальних, іонних та іонно-радикальних структур. Кінцевим результатом таких перетворень є формування особливих покриттів із продуктів трибохімічних реакцій. В результаті відбувається добування кристалічної решітки металевих теплообмінних поверхонь під дією сил когезії та адгезії.

Комплексний підхід до створення та експлуатації трибосистемних покриттів товщиною від 1 до 100 нм дозволяє попередити, або мінімізувати корозійно-ерозійні процеси. Основою цього є синергетичні ефекти взаємного впливу активних агентів та матеріалів, які вони захищають. Взаємодія полімерних речовин із поверхнею дозволяє утворювати єдиний монолітний міцний пласт, який може бути зруйнований лише механічним шляхом (Рис.1). При цьому їх утримування на теплообмінній поверхні здійснюється за рахунок сил адгезії, шляхом утворення моно- чи полімолекулярного пласту, або при проникненні на певну глибину, можлива комбінація різних механізмів. Створення новітніх захисних поверхонь базується на так званих відкритих термодинамічних трибосистемах, для яких дотримується баланс між притоком та віддачею енергії. Активні компоненти композиції утворюють особливу модифікацію, яка забезпечує анізотропію механічних властивостей заново сформованої поверхні - прошарку третього тіла із збереженням основного покриття.

Універсальність трибосистемних покриттів полягає в їх однаковій, або сумірній ефективності для чорних і кольорових металів. Синергетичні ефекти взаємного впливу активних агентів та матеріалів, які вони захищають, належить розглядати як такі, що здатні самостійно розвиватись та еволюціонувати. Наявність активних компонентів забезпечує здатність утворювати специфічний прошарок третього тіла. Трибосистема створює умови для ліо- та гідрофобізації. Вони можуть проявлятись через так званий ефект лотоса: крапля дотикається поверхні тільки в декількох точках, стягується за рахунок поверхневого натягу до сферичної форми и при самих незначних кутах нахилу чи за рахунок динамічної дії парового потоку вільно видаляється. Таким чином, забезпечується режим якісної краплинної конденсації із високими коефіцієнтами тепловіддачі, який може підтримуватись достатньо тривалі проміжки часу: від декількох місяців до декількох років. Проведений аналіз та результати експериментальних досліджень вказують на перспективність використання таких підходів в конденсаційному та іншому теплотехнічному обладнанні.

Висновки

Розглянута можливість реалізації процесу конденсації за умови активних гідро газодинамічних режимів руху теплоносіїв. Проведене оглядове порівняння різних типів теплообмінних апаратів. Показано, що активні гідро газодинамічні режими руху теплоносіїв мають ряд переваг по комплексу характеристик порівняно із іншими режимами.

Розглянуті існуючі дослідження теплообміну при конденсації. Проаналізовані можливі шляхи підвищення інтенсивності теплообміну при конденсації пари. Встановлено, що конденсація активного гідро газодинамічного потоку теплоносія якісно відповідає, так званому, традиційному процесу, наприклад, на циліндричних, або на плоских поверхнях.

Нові можливості нанотехнологій дають можливість створення нових систем - так званих трибосистем, які утворюють моно або полі молекулярний шар полімера з поверхнею.

Застосування багатофункціонального покриття дозволяє отримати якісну краплинну конденсації водяної пари з високими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі. Нанопокриття теплообмінних поверхонь мають властивість самоорганізації, утворюють довговічний мономолекулярний прошарок, який може мати властивості кераміки. Нанотехнології ведуть до створення надзвичайно чистих поверхонь, які мають властивість самоочищення і в перспективі необмежений термін використання.

Література

1. Baudrit J.V, Ballesteros M.S and Martinez J.M, Study of the Relationship between Nanoparticles of Silica and Thermoplastic Polymer (TPU) in Nanocomposites // *Journal Nanotechnology Progress International (JONPI)*. , 2009. - Issue 1, P. 24-34.
2. *Journal of Nanofluids*, 2012, - Vol. 1, No. 2 (December 2012), Vol. 1, No. 1 (June 2012).
3. Процессы и аппараты химической промышленности / П.Г. Романов, М.И. Курочкина, Ю.Я. Мозжерин и др. – Л.: Химия, 1989. – 560 с.
4. Теплообменные аппараты холодильных установок / Под общей ред. Г.Н. Даниловой. – Л.: Машиностроение, 1986. – 303 с.
5. Кириллов А.И., Рис В.В., Смирнов Е.М. Численное моделирование турбулентного течения и теплообмен в трубе с ленточным завихрителем // Труды ИРХТ. Москва, 26-30 окт. 1998г., Т.6: Интенсификация теплообмена. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – С.132-136.
6. Ляндберг А.Р., Латкин А.С. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. – 149с.
7. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 239 с.