

ЗМІСТ

Передмова	4
------------------------	----------

ЧАСТИНА ПЕРША

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ	7
---	----------

Розділ 1	
Загальні відомості про процеси теплообміну і теплопередачі	9
Розділ 2	
Передача тепла теплопровідністю	22
Розділ 3	
Конвективний теплообмін в однофазних потоках.....	32
Розділ 4	
Конвективний теплообмін при зміні агрегатного стану теплоносіїв....	49
Розділ 5	
Конвективний теплообмін у двофазних потоках	59
Розділ 6	
Передача тепла тепловим випромінюванням	71
Розділ 7	
Теплопередача та основи розрахунку теплообмінників	78

ЧАСТИНА ДРУГА

ТЕПЛООБМІННЕ ОБЛАДНАННЯ ТА УСТАНОВКИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТЕПЛО

Розділ 8	
Сучасні конструкції теплообмінного обладнання.....	99
Розділ 9	
Трубчасті печі, типи і будова. Технологічний розрахунок печі	128
Розділ 10	
Випарювання розчинів, розрахунок випарних апаратів і установок.....	148
Розділ 11	
Сучасні конструкції випарних апаратів	193
Розділ 12	
Холодильні установки для отримання низьких температур	205
Список літератури	229
Додатки	231
Предметний покажчик	256

ПЕРЕДМОВА

Процеси теплообміну і теплопередачі відіграють найважливішу роль у навколишньому середовищі, у різних галузях техніки та у побуті. Завдяки теплообміну і теплоперенесенню на нашій планеті існують життя, цивілізація, тваринний і рослинний світ. У побуті нас оточує велика кількість теплообмінних приладів, пристроїв і машин, що забезпечують комфортні умови життя сучасного суспільства. Практично немає такої галузі промислового виробництва, де б тією чи іншою мірою не використовувалися процеси та апарати для перенесення теплоти і виробництва енергоємної продукції. Будівельна, газонафтопереробна, гірничо-хімічна, енергетична, машинобудівна, металургійна, нафтохімічна, харчова, хімічна та багато інших галузей промисловості при виробництві багатьох видів промислової продукції, мінеральних добрив, товарів різного призначення широко використовують теплообмінні процеси і теплообмінне обладнання.

Теплообмінні процеси пов'язані з перенесенням теплоти від нагрітих теплоносіїв до холодних через роздільну стінку та відбуваються у середовищах (теплоносіях) різного агрегатного стану. Інтенсивність теплообміну, характер взаємодії теплоносіїв з розділюючою їх теплообмінною поверхнею, режими течії і форма каналів для руху теплоносіїв, властивості конструкційних матеріалів та стан поверхні стінки в основному визначають конструкцію і конструктивні особливості використовуваних теплообмінних пристроїв і теплообмінного обладнання, його надійність, довговічність та економічність.

У цьому навчальному посібнику, призначеному для студентів-механіків, що навчаються за фахом «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів», представлено один з основних розділів фундаментальної навчальної дисципліни «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв».

Автор книги має на меті дати студентам необхідні знання в професійній підготовці за обраним фаховим напрямом та заповнити гострий дефіцит технічної літератури, що спостерігається в Україні в останні роки.

Навчальний матеріал, викладений у книзі, умовно розбито на окремі теми, засвоєнню змісту яких сприяють запитання і вправи для самоконтролю, розміщені наприкінці кожного розділу. У методичному плані книга умовно поділена на дві частини.

У першій частині, що містить сім розділів, викладені основні положення і теоретичні основи процесів теплоперенесення, способи обміну теплом між теплоносіями, звичайно розділеними стінкою. Більш глибокі теоретичні дослідження теплових процесів викладені у фундаментальних працях [25, 26, 32, 44] та в довідниках [24, 46, 50, 55].

У другій частині книги розглянуті конструкції, будова, принцип роботи і методи технологічного розрахунку теплообмінних апаратів, обладнання та установки, що використовують тепло: пічні агрегати, випарні і холодильні установки, градирні. Така послідовність викладення навчального матеріалу обумовлена особливою специфікою підготовки фахівців-механіків хімічних і нафтопереробних виробництв. Ця специфіка полягає в тому, що майбутній фахівець повинен бути не тільки добре ознайомлений з теоретичними основами процесу, а також уміти виконувати розрахунки як окремих стадій, так і процесу в цілому, уміти розрахувати і вибрати потрібну конструкцію апарата.

Одночасно з викладенням теоретичних основ процесів теплообміну і теплоперенесення в книзі основну увагу приділено методикам технологічного розрахунку теплообмінних процесів та обладнання для їх реалізації. Досить повно в посібнику представлені тепловикористовуючі

установки, а також конструкції поширених типів сучасних теплообмінників, що дозволяє використовувати книгу при вивченні спеціальних дисциплін, таких, як “Машини і апарати хімічних виробництв” та “Технологічне обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв”.

Для кращого засвоєння матеріалу у посібнику подані приклади розрахунків задач за окремими темами з процесів теплопередачі та тепловикористовуючих установок. Наведені наприкінці книги додатки дозволяють використовувати її на практичних та лабораторних заняттях, а також при курсовому і дипломному проектуванні.

Обмежений обсяг навчального посібника не дозволяє більш детально подати теорію процесів теплообміну, представити специфічні конструкції теплообмінного обладнання, що використовується в різних галузях промисловості, та викласти методики оптимізаційних розрахунків теплообмінників. Ця та інша інформація міститься у спеціальних виданнях [18, 28, 46].

Автор щиро дякує рецензентам завідувачу кафедри, проф. В.П. Шапорєву, а також професорам Є.М. Семенишину і О.Р. Якубі за позитивну оцінку роботи в цілому, за корисні поради і критичні зауваження.

Усі критичні зауваження і побажання читачів, спрямовані на поліпшення змісту книги, будуть сприйняті з вдячністю і враховані в подальшій роботі.

*...Достаточная причина теплоты
заключается во внутреннем
движении связанной материи.*

М.В. Ломоносов

ЧАСТИНА ПЕРША

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

ЗМІСТ

Розділ 1. Загальні відомості про процеси теплообміну і теплопередачі.....	9
1.1. Основні визначення і положення.....	9
1.2. Гарячі (нагрівальні) теплоносії.....	11
1.3. Холодні (охолоджувальні) теплоносії.....	14
1.4. Деякі фізико-хімічні та теплофізичні властивості теплоносіїв.....	17
1.5. Теплове навантаження у процесах теплопередачі.....	18
1.6. Способи і механізми перенесення тепла.....	20
Розділ 2. Передача тепла теплопровідністю.....	22
2.1. Температурне поле, температурний градієнт.....	22
2.2. Закон Фур'є, коефіцієнт теплопровідності.....	22
2.3. Теплопровідність газів, рідин і різних матеріалів.....	24
2.4. Диференціальне рівняння теплопровідності.....	26
2.5. Теплопровідність одно- і багатошарової плоскої стінки.....	27
2.6. Теплова ізоляція апаратів.....	29
Розділ 3. Конвективний теплообмін в однофазних потоках.....	32
3.1. Способи конвективного перенесення теплоти.....	32
3.2. Диференціальне рівняння конвективного теплообміну.....	34
3.3. Критерії теплової подібності та їх фізична суть.....	35
3.4. Критеріальні рівняння конвективного теплообміну.....	39
3.5. Алгоритм розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі.....	40
3.6. Конвективний теплообмін при вільній конвекції.....	41
3.7. Теплообмін при вимушеній конвекції теплоносіїв.....	43
Розділ 4. Конвективний теплообмін при зміні агрегатного стану теплоносіїв.....	49
4.1. Особливості процесів зміни агрегатного стану теплоносіїв.....	49
4.2. Тепловіддача при конденсації пари.....	50
4.3. Тепловіддача при кипінні та випаровуванні рідин.....	54
4.4. Алгоритм розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при зміні агрегатного стану теплоносіїв.....	57
4.5. Орієнтовні значення коефіцієнтів тепловіддачі при зміні агрегатного стану теплоносіїв.....	57
Розділ 5. Конвективний теплообмін у двофазних потоках.....	59
5.1. Особливості конвективного теплообміну у двофазних потоках.....	59
5.2. Деякі характеристики двофазних потоків.....	59
5.3. Теплообмін у насадкових апаратах і скруберах.....	62
5.4. Теплообмін у дисперсних потоках рідина – газ.....	63
5.5. Теплообмін у дисперсних потоках газ – тверді частинки.....	63
5.6. Теплообмін у грануляційних баштах.....	70
Розділ 6. Передача тепла тепловим випромінюванням.....	71
6.1. Випромінювання нагрітих тіл, випромінювальна, відбивна і пропускна здатність тіл.....	71
6.2. Основні закони променистого теплообміну.....	72
6.3. Променистий теплообмін у теплообмінних установках.....	74
6.4. Спільна тепловіддача випромінюванням і конвекцією.....	76
Розділ 7. Теплопередача та основи розрахунків теплообмінників.....	78
7.1. Основне рівняння теплопередачі, коефіцієнт теплопередачі.....	78
7.2. Залежність коефіцієнта теплопередачі від окремих коефіцієнтів тепловіддачі і теплопровідності.....	79
7.3. Середня рушійна сила процесу теплопередачі.....	82
7.4. Алгоритм розрахунку та вибору теплообмінного обладнання.....	85
7.5. Розрахунок теплової ізоляції теплообмінних апаратів.....	94

1.1. Основні визначення і положення

У хімічній, харчовій, газонафтопереробній, гірничохімічній, енергетичній та багатьох інших галузях промисловості процеси передачі тепла від нагрітих теплоносіїв до холодних займають провідне місце. Теплові процеси використовуються в промисловості для охолодження нагрітих середовищ, для зрідження повітря та природних газів, для нагрівання холодних теплоносіїв, для проведення процесів випарювання, конденсації, плавлення, кристалізації та інших [20, 45, 55].

Теоретичною основою теплових процесів є розділ термодинаміки про закони перенесення енергії від одного теплоносія до іншого та про механізми такого перенесення.

Перенесення енергії від більш нагрітих середовищ до менш нагрітих відбувається під дією *рушійної сили*, яка в теплових процесах вимірюється через локальну або середню різницю температур між теплоносіями. Звичайно при досягненні однакових температур між теплоносіями встановлюється рівноважний стан, але такий стан у природі і техніці є суто теоретичним, тому що досягнути його можна лише за тривалий час.

Тіла (робочі середовища), що беруть участь у процесах теплообміну, називаються *теплоносіями*. Робоче середовище з більш високою початковою температурою називають *гарячим* теплоносієм. У процесі теплообміну гарячий теплоносій віддає теплову енергію, при цьому температура гарячого теплоносія знижується. Робоче середовище з меншою початковою температурою називають *холодним* теплоносієм, у процесі теплообміну тепла енергія передається від гарячого до холодного теплоносія, та температура останнього підвищується.

Процеси, пов'язані з передачею тепла від гарячих теплоносіїв до холодних, називаються *теплообмінними*.

У процесі теплообміну гарячий і холодний теплоносії звичайно розділені стінкою, яка здатна добре переносити тепло та виключає можливість змішування теплоносіїв з різними фізико-хімічними властивостями.

Процес перенесення тепла з ядра потоку гарячого теплоносія у ядро потоку холодного теплоносія через роздільну стінку (міжфазну границю) називається *теплопередачею*.

Окремий частковий процес перенесення тепла в межах однорідної фази з ядра потоку гарячого теплоносія до поверхні теплопередачі або від нагрітої поверхні у ядро потоку холодного теплоносія називається *тепловіддачею*.

Площу контакту (стінки), через яку теплота передається від гарячого теплоносія до холодного, називають *поверхнею теплопередачі*.

Апарати та пристрої, у яких відбуваються процеси теплообміну, називають *тепловикористовуючими або теплообмінниками*.

Кількість тепла, що передана (або прийнята) теплоносієм у процесі теплопередачі за одиницю часу, називається *тепловим потоком (тепловим навантаженням)* та вимірюється в $\text{Дж/с} = \text{Вт}$.

Використовувані в промисловості теплообмінні апарати працюють в умовах глибокого вакууму, під помірним або під високим тиском (до 100 МПа), у діапазоні температур від сам -250°C до $+1000^\circ\text{C}$. Досить часто в теплообмінниках рухаються корозійно активні середовища, що слід враховувати при виборі необхідних конструкційних матеріалів.

Відповідно до законів термодинаміки перенесення тепла від нагрітих середовищ до холодних відбувається мимовільно доти, поки існує позитивна різниця температур між гарячим і холодним теплоносієм.

Локальною рушійною силою процесу теплообміну є різниця температур між нагрітим і холодним тілом або середовищем у даний момент часу (для періодичного процесу) або різниця температур між гарячим і холодним теплоносієм у локальному перерізі апарата (для безперервних процесів). *Середньою рушійною силою процесу* є різниця температур між теплоносіями, визначена за певний проміжок часу (для нестационарного процесу) або на вхідній та вихідній ділянках апарата (для стаціонарного процесу).

Отже, процес теплопередачі є складним і багатостадійним, та охоплює як стадії перенесення тепла (тепловіддачу) у межах кожного з теплоносіїв, так і стадії перенесення тепла через роздільну стінку – поверхню теплопередачі. Вивчення фізико-хімічних основ процесів теплопередачі та вміння використовувати отримані знання в розрахунках обладнання є головним показником кваліфікації інженерів-механіків хімічних і нафтопереробних виробництв.

В основу процесів теплоперенесення покладений основний кінетичний закон [19, 36], відповідно до якого швидкість теплопередачі прямо пропорційна рушійній силі та обернено пропорційна термічному опору:

$$u_m = \frac{Q_m}{F\tau} = \frac{\Delta t_c}{R_m}, \quad (1.1)$$

де Q_m – кількість переданого тепла, Дж; F – поверхня теплопередачі, м^2 ; τ – тривалість процесу, с; Δt_c – середня різниця температур між теплоносіями, К; R_m – термічний опір процесу теплопередачі.

Для сталого процесу на основі рівняння (1.1) кількість переданого тепла за одиницю часу визначають за формулою

$$Q = k_m \cdot \Delta t_c \cdot F, \quad (1.2)$$

де Q – тепловий потік, Вт; k_m – коефіцієнт теплопередачі, що характеризує середню швидкість процесу перенесення тепла, $k_m = 1/R_m$.

Залежність (1.2) називають *основним кінетичним рівнянням процесу теплопередачі*.

Величина теплового потоку, агрегатний (фазовий) стан, напрямок, режим і характер руху теплоносіїв уздовж поверхні теплопередачі, величина середньої рушійної сили процесу визначають як швидкість (інтенсивність) і ефективність теплообмінних процесів, так і загальну поверхню теплопередачі, тип використовуваного теплообмінного обладнання, його конструктивні особливості та геометричні розміри.

1.2. Гарячі (нагрівальні) теплоносії

Теплоносії, що мають більш високу початкову температуру та віддають тепло в процесі теплообміну, при цьому самі охолоджуються, називаються гарячими (нагрівальними). У хімічних і нафтопереробних виробництвах використовують багато різних нагрівальних теплоносіїв.

Теплоносії бувають прямі та непрямі. *Прямими* є такі теплоносії, що утворюються або безпосередньо використовуються в процесі теплообміну, до них належать димові гази та електричний струм.

Непрямами є теплоносії, які спочатку отримують тепло внаслідок нагрівання від прямих теплоносіїв, а потім вони використовуються в технологічному процесі як нагрівальні теплоносії. До них належать гарячі гази, рідини, водяна пара, пара інших речовин, розчини солей, розплави солей і металів та багато інших.

Вибір та використання того чи іншого теплоносія визначається його теплофізичними властивостями, температурним діапазоном, у якому його можна застосовувати, умовами безпеки та економічними міркуваннями та розрахунками, що враховують ціну енергоносія, капітальні витрати на обладнання та теплообмінну установку в цілому.

Водяна пара є найбільш широко застосовуваним теплоносієм переважно у діапазоні температур 100–200 °С, що відповідає тиску гріючої пари 0,1–1,6 МПа. Застосування водяної пари як гарячого теплоносія обумовлене цілим рядом переваг, основними з яких є нетоксичні властивості, висока питома теплота конденсації ($2,26 \cdot 10^3$ кДж/кг при атмосферному тиску), легкість транспортування в трубопроводах на далекі відстані. Використання пари при теплообміні забезпечує високі коефіцієнти тепловіддачі, рівномірність обігрівання поверхні теплообміну, легкість регулювання температури за допомогою зміни тиску. Як відомо, певній температурі конденсації відповідає точно визначений тиск насиченої водяної пари. Застосування водяної пари в теплообмінних апаратах хімічних виробництв при температурах, вищих за 200 °С, обмежене, оскільки вимагає підвищеного тиску (більшого ніж 1,6 МПа) та при цьому слід збільшувати товщину стінки корпуса теплообмінника.

Теплофізичні та термодинамічні властивості насиченої водяної пари наведені в таблицях [33, 34, 47, 55], крім того, побудовані та наведені термодинамічні діаграми стану системи вода – пара, що дозволяють про-

водити теплові розрахунки процесів, пов'язаних із фазовими переходами.

Технологічну водяну пару на підприємствах хімічної та нафтопереробної промисловості одержують переважно на ТЕЦ, які є майже на кожному підприємстві. На деяких технологічних установках водяну пару одержують як побічний продукт, що утворюється в результаті утилізації тепла реакції екзотермічних процесів. Використовують також вторинну (сокову) пару тиском 0,1–0,5 МПа, одержувану в результаті випаровування водяних розчинів солей. Коли необхідно підвищити тиск сокової пари, а отже і температуру конденсації її, використовують термокомпресійні установки ежекторного або компресорного типу.

Деякі властивості насиченої пари і конденсату для води та органічного теплоносія Даутерму А наведені в табл. 1.1 та в додатках.

Таблиця 1.1. Властивості насиченої пари і конденсату для води та Даутерму А в залежності від тиску й температури

Тиск (абсолютний), кг/см ²	Температура, °C	Густина, кг/м ³		Теплопровідність рідини, Вт/(м·K)	В'язкість рідини, μ·10 ³ Н·с/м ² ,	Питома ентальпія рідини, кДж/кг	Теплота конденсації, кДж/кг
		пари	рідини				
Водяна пара							
1,03	100	0,597	958	0,683	0,282	419	2260
1,46	110	0,825	951	0,685	0,256	461	2234
2,02	120	1,120	943	0,686	0,231	503	2207
2,75	130	1,494	935	0,686	0,212	545	2179
3,68	140	1,962	926	0,685	0,196	587	2150
4,85	150	2,543	917	0,684	0,185	629	2120
6,30	160	3,252	907	0,683	0,174	671	2089
8,08	170	4,113	897	0,679	0,163	713	2056
10,23	180	5,145	887	0,675	0,153	755	2021
12,8	190	6,378	876	0,672	0,146	808	1984
Даутерм А							
0,255	200	0,98	912	-	-	369,5	314,2
0,422	220	1,60	897	-	-	417,7	306,3
0,659	240	2,66	883	0,146	0,37	468,4	297,5
1,054	260	3,93	867	0,143	0,34	518,3	287,0
1,602	280	6,19	848	0,139	0,31	569,8	276,5
2,36	300	8,92	827	0,137	0,384	624,9	265,2
4,52	340	17,0	784	0,131	0,24	744,1	244,3
8,19	380	29,8	739	0,125	0,21	863,1	218,7

Нагрівання парою висококиплячих рідин. За необхідності розширити температурний діапазон нагрівання середовища до температур 250–380 °C застосовують пару висококиплячих органічних теплоносіїв (ВОТ), які в зазначеному діапазоні температур киплять і випаровуються за порівняно невисокого тиску (0,1–0,8 МПа).