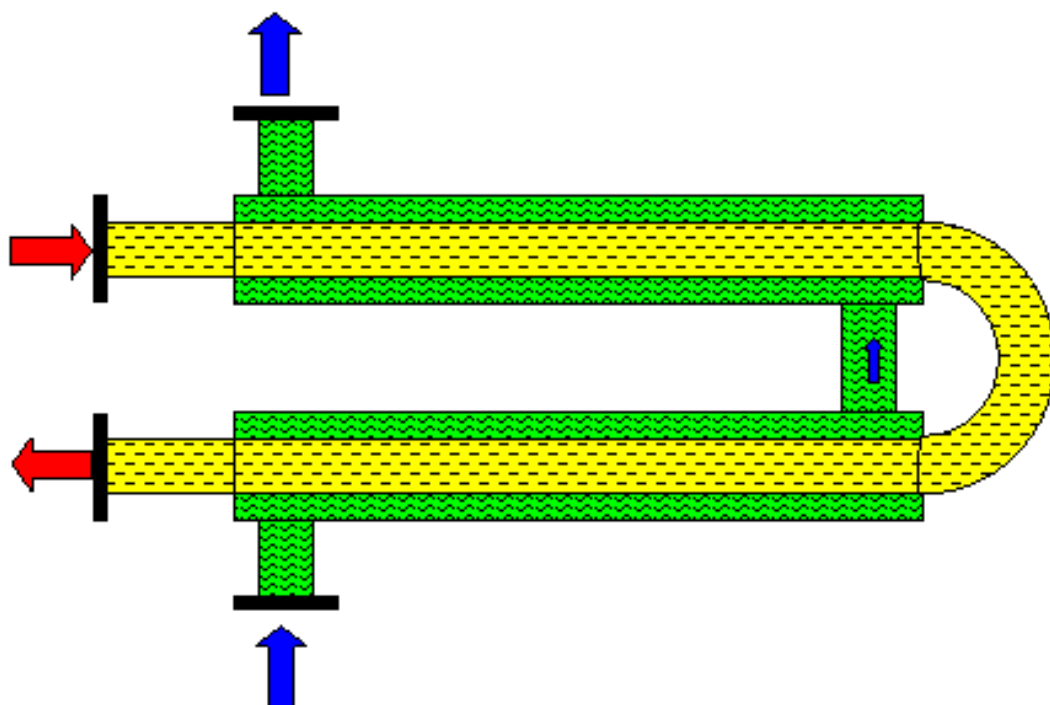


Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г.,
Ломейко О.П.

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Теплообмінні процеси

Підручник



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



**ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ
ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ
Теплообмінні процеси**

Підручник, Книга 3

Мелітополь
2020

УДК 664.002.5(075)

П 84

*Розглянуто і рекомендовано до друку
Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного
університету імені Дмитра Моторного
Міністерства освіти і науки України
Протокол № 9 від 12.05.2020р.*

Автори: Викладачі кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

Бойко В.С., кандидат технічних наук, доцент; **Самойчук К.О.**, доктор технічних наук, доцент; **Тарасенко В.Г.**, кандидат технічних наук, доцент; **Ломейко О.П.**, кандидат технічних наук, доцент

Рецензенти:

А.В. Погребняк, доктор технічних наук, професор кафедри готельно-ресторанної справи та товарознавства Університета митної справи та фінансів;

О.П. Прісс, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного.

Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, О.П. Ломейко. Мелітополь, 2020. 300 с.

ISBN

Підручник „Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси” призначений для здобувачів ступеня вищої освіти зі спеціальностей „Галузеве машинобудування“ і „Харчові технології“, магістрів, аспірантів, викладачів і працівників агропромислового комплексу.

© Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г., Ломейко О.П.

ВСТУП

Харчова промисловість включає багато різних за призначенням виробництв: борошномельне, хлібобулочне, макаронне, кондитерське, виробництво м'ясних, молочних продуктів, цукру, рослинної олії та іншої продукції.

Будь-який технологічний процес виробництва даної продукції являє собою ряд взаємопов'язаних типових технологічних операцій, що протікають в апаратах певного класу. Особливостями цих технологічних процесів, що визначають специфіку отримання харчових продуктів, від подібних процесів в інших галузях харчових виробництв є високі вимоги до якості продукції, ефективності виробництва, зниження його енерговитрат і матеріаломісткості, охорони навколишнього середовища і технічної безпеки.

Вчення про процеси і апарати засноване на фундаментальних законах фізики, хімії, математики, ряду інженерних і економічних дисциплін – механіки, теплотехніки, електротехніки, матеріалознавства, промислової економіки та інших суміжних дисциплін, які являються базою курсу. Проте, як наука про процеси і апарати має свій чітко окреслений предмет, експериментальні та розрахункові методи і теоретичні закономірності.

Сучасні харчові виробництва оснащені складними машинами і апаратами, в яких здійснюються технологічні процеси, що перетворюють сировину в кінцевий продукт. Процеси харчової технології здебільше значно складні і часто являють собою поєднання механічних, гідромеханічних, теплових і масообмінних процесів.

Під терміном «*процес*», який походить від латинського слова *processus* (просування), розуміють виробничий процес, коли початкові матеріали в результаті фізичного, хімічного, механічного та інших впливів перетворюються в харчові продукти. Ці перетворення супроводжуються зміною агрегатного стану, внутрішньої структури і хімічного складу речовини. Поділ технологічного обладнання на машини і апарати досить умовний.

Процеси протікають в технологічних апаратах (від латинського *apparatus* – прилад, обладнання) або в машинах. Найчастіше апарат являє собою ємність, в якій нерухомо розташовуються різні труби, решітки, полиці, кільця, тарілки, сепаратори для відділення крапельок рідини тощо. Іноді в апаратах монтують обертові механізми для перемішування рідких середовищ. На відміну від них машина – це механізм із зовнішнім приводом і робочими органами, які здійснюють механічні операції.

РОЗДІЛ I. ОСНОВИ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Тема 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ.

1.1. Прості та складні теплові процеси.

Теплота є найбільш універсальною формою енергії, яка виникає в результаті молекулярно-кінетичного (теплого) руху мікрочасток, молекул, атомів, електронів. Універсальність теплової енергії полягає в тому, що будь-яка форма енергії (механічна, хімічна, електрична, ядерна тощо) трансформується наприкінці всього частково або повністю в тепловий рух молекул (теплоту). Різні тіла можуть обмінюватися внутрішньою енергією у формі теплоти. Що кількісно виражається першим законом термодинаміки.

Перенесення енергії у формі теплоти відбувається між тілами з різною температурою і називається *теплообміном*.

Теплообмін – самовільний необоротний процес перенесення теплоти від найбільш нагрітих тіл (або ділянок тіл) до менш нагрітих.

Рушійною силою будь-якого процесу теплообміну є різниця температур більш нагрітого і менш нагрітого тіла.

До теплообмінних відносяться наступні технологічні процеси, швидкість яких визначається швидкістю підведення або відведення теплоти: нагрівання, випаровування (в тому числі випарювання), охолодження, конденсація.

Нагрівання – підвищення температури тіл шляхом підведення до них теплоти.

Охолодження – зниження температури тіл шляхом відведення від них теплоти.

Випаровування – процес перетворення рідини в пару шляхом підведення до неї теплоти. Окремим випадком випаровування є процес випарювання – концентрування при кипінні розчинів твердих нелетких речовин шляхом видалення рідкого розчинника у вигляді парів.

Конденсація – перехід речовини з паро- або газоподібного стану у рідкий шляхом відведення від нього теплоти.

Численні масообмінні, хімічні і біохімічні процеси супроводжуються виділенням або поглинанням теплоти. В цьому випадку швидкість основного процесу залежить від швидкості відведення або підведення теплоти.

В спеціальних технологіях з процесів нагрівання прийнято виділяти в окрему групу пастеризацію і стерилізацію.

Пастеризація – спосіб знищення мікробів в харчових продуктах однократним нагріванням до температури нижче 100 °С (звичайно 60-70°С) з витримкою при цій температурі протягом 15-30 хв.

Стерилізація – нагрівання і коротка витримка при високій температурі (понад 100°С).

Способи перенесення теплоти. Як вже було сказано – у відповідності з другим законом термодинаміки, теплота переходить від більш нагрітих тіл до менш нагрітих. Цей перехід – наслідок різниці температур. Чим більше ця різниця, ти швидше переходить теплота, тим більше теплоти отримує нагріване тіло.

Процес теплообміну можна здійснити **простим контактом** або **перемішуванням теплоносіїв**. Спосіб перемішування теплоносіїв в технологіях використовують рідко. У випадку можливості змішування теплоносіїв теплопередача здійснюється безпосереднім стиканням, тобто змішуванням обох теплоносіїв. Вочевидь, що в цьому випадку процес теплопередачі протікає інтенсивніше. Апаратурне оформлення процесу значно спрощується. Частіше теплота передається через стінку, яка розділяє теплоносії, при цьому стінку називають **поверхнею теплообміну**. Апарати, в яких здійснюються теплові процеси, називають **теплообмінниками**.

Теплопередача – це перенесення теплоти від більш нагрітого середовища до менш нагрітого через стінку, що їх розділяє.

В процесах теплопередачі приймають участь не менш двох середовищ (речовин) з різними температурами. Середовище з більш високою температурою, яке віддає при теплообміні теплоту, називається **гарячим теплоносієм**, середовище з більш низькою температурою, яке сприймає теплоту з більш низькою температурою, яке сприймає теплоту, називається холодним теплоносієм – **холодоагентом**. Теплоносії і холодоагенти повинні бути хімічно стійкими, не викликати корозії апаратури, не утворювати відкладень на стінках апаратів.

Основні теплоносії.

Теплоносій – рухоме середовище (газ, пара, рідина), використовуване для перенесення теплоти.

Найпоширеніший промисловий теплоносій – насичена водяна пара, яка має низку визначних властивостей. Перш за все, це здатність акумулювати велику кількість теплоти і високі коефіцієнти тепловіддачі. Прихована теплота конденсації насиченої водяної пари при атмосферному тиску 2260 кДж/кг. Це

дозволяє пр. незначній витраті пари на малій поверхні нагрівання передавати велику кількість теплоти. Через те, що при незмінному тиску температура конденсації постійна, легко підтримувати постійність температури теплоносія в апараті. Головний недолік водяної пари – значне зростання тиску при збільшенні температури. На практиці застосовують насичену пару температурою до 180 ... 190 °С при тиску до $10 \cdot 10^5$ Па. Перегріту пару рідко використовують в якості теплоносія через низькі значення коефіцієнта тепловіддачі.

Чиста вода широко використовується в якості теплоносія. Переваги води – доступність і дешевизна, а також порівняно високі (але значно менші, ніж у конденсованої пари) значення коефіцієнтів тепловіддачі. До недоліків чистої води в якості теплоносія слід віднести невелику питому теплоємність і пов'язану з цим низьку акумулюючу здатність. Перевищення температурою води значення 100 °С пов'язано з різким збільшенням тиску, тому перегріту воду, за рідким виключенням, в якості теплоносія не використовують.

Паливні гази широко використовують на підприємствах, які мають власні котельні. Температура паливних газів досягає 1000 °С при атмосферному тиску, тому для відбору теплоти зручно використовувати проміжний теплоносії, який спочатку нагрівається паливними газами, а потім подається в теплообмінний апарат. В якості проміжного теплоносія використовують повітря, мінеральні олії тощо. Серед недоліків паливних газів як теплоносіїв відзначимо наявність в них включень, які викликають забруднення поверхні теплообміну і низький коефіцієнт тепловіддачі.

Мінеральні оливи – поширені проміжні теплоносії. Вони характеризуються високою температурою кипіння, що дозволяє нагрівати їх до значних температур. Мінеральні оливи в якості теплоносіїв застосовують при обжарюванні какао, кофе-бобів та інших продуктів. Крім підігріву олив паливними газами, можна використовувати електропідігрівання. Оливи порівняно дешеві теплоносії, але забезпечують відносно невеликі коефіцієнти тепловіддачі і утворюють на поверхні, яка нагрівається, шар коксу, який погіршує теплообмін.

Високотемпературні органічні теплоносії (ВОТ) за своїми властивостями вигідно відрізняються від олив. Найбільш поширений ВОТ – дифенільна суміш (Даутерма), яка складається з 26% дифенілу і 74% дифенілового ефіру. Перевага дифенільної суміші – висока термічна стійкість і можливість нагріву до 250 °С при атмосферному тиску. При більш високих

температурах використовують насичену пару дифенільної суміші, яка має порівняно невеликий тиск. Дифенільна суміш нетоксична. Крім дифенільної суміші в промисловості використовують інші ВОТ, наприклад, кремнійорганічні термостійкі рідини з низькою температурою плавлення.

Висококиплячі неорганічні теплоносії виготовляють з розплавів металів (літій, натрій, калій тощо). Можливості використання цих теплоносіїв в харчовій промисловості обмежені через їхню агресивність.

Холодоагенти застосовуються в холодильних апаратах. Найбільше поширення отримали аміак, фреони, розсіл хлориду кальцію, повітря, азот.

Теплопередача є складним процесом. Тому при вивченні цей процес поділяють на прості явища. Розрізняють три елементарних способи перенесення тепла: теплопровідність, конвекцію і теплове випромінювання.

Теплопровідність являє собою процес молекулярного перенесення теплоти в суцільному середовищі при безпосередньому стиканні тіл з різною температурою. Енергія хаотичних (випадкових) теплових коливань молекул при цьому передається від одного тіла іншому або від однієї частини тіла іншим його частинам шляхом безпосередніх співударів молекул подібно передачі руху при співударі куль. Теплопровідність в чистому вигляді, як правило, зустрічається в твердих тілах. Так, в металах перенесення теплоти теплопровідністю пов'язане з переміщенням вільних електронів і коливаннями атомів кристалічної решітки.

Конвекція відбувається тільки в газах і рідинах і полягає в тому, що перенесення теплоти здійснюється об'ємними газами і рідинами, які переміщуються в просторі. Кожний рухомий об'єм середовища в цьому процесі нікуди свою енергію не передає, потік теплоти рухається разом з ним. Штучна, або змушена конвекція ототожнюється з потоком середовища, створеним вентилятором або насосом. Природня, або тепла конвекція обумовлена архімедовими силами, які виникають внаслідок різниці густин підігрітих об'ємів середовища.

Теплове випромінювання – це процес перенесення теплоти у вигляді електромагнітних хвиль з подвійним взаємним перетворенням – теплової енергії в променисту і обернено. Тобто спочатку енергія теплового руху молекул перетворюється в енергію електромагнітного випромінювання (у відповідності з законом Стефана-Больцмана енергія електромагнітного випромінювання пропорційна четвертому ступеню температури поверхні тіла), а потім відбувається поглинання електромагнітного випромінювання іншим

тілом і перетворення її в енергію теплового руху молекул. Повітря, через яке передається теплове випромінювання, практично не нагрівається, тобто воно діатермічне.

Насправді елементарні види теплообміну не відокремлені і в чистому вигляді зустрічаються рідко. В більшості випадків теплота передається комбінованим шляхом. Наприклад, обмін теплотою між твердою поверхнею і рідиною (або газом) відбувається за допомогою теплопровідності і конвекції одночасно і називається конвективним теплообміном або тепловіддачею.

Сукупність всіх трьох видів теплоти називається **складним теплообміном**.

Розрізняють усталений і неусталений процеси теплообміну. В апаратах безперервної дії температура в різних точках не змінюється у часі і процеси теплообміну, які протікають в таких апаратах, являються усталеними (стаціонарними). В апаратах періодичної дії температура змінюється у часі, процес теплообміну в таких апаратах є неусталеним (нестационарним). Ці процеси мають місце при пуску, зупинці і зміні режимів роботи апаратів безперервної дії.

При тепловій обробці багатьох харчових продуктів, наприклад, тіста, молока, цукрових розчинів, змінюються їхні фізико-механічні властивості, що викликає у свою чергу, зміну умов теплопередачі.

Основними кінетичними характеристиками процесу теплопередачі являються середня різниця температур, коефіцієнт теплопередачі, кількість передаваної теплоти (від цієї величини залежать розміри теплообмінної апаратури).

Розрахунок теплообмінної апаратури містить наступні етапи.

Визначення теплового потоку (теплового навантаження апарату), тобто кількість теплоти Q , яку повинно бути передано протягом певного часу від одного теплоносія до іншого. Тепловий потік обчислюється на основі складання і вирішення теплових балансів.

Визначення площі поверхні теплообміну F апарата, необхідної для забезпечення передачі необхідної кількості теплоти в заданий час. Величина площі поверхні теплообміну залежить від швидкості теплопередачі, а остання – від механізму передачі тепла. Поверхня теплообміну розраховується з основного рівняння теплопередачі.

Найбільшу складність представляє розрахунок середньої різниці температур між теплоносіями, яка визначається з початкових і кінцевих

температур теплоносіїв і ускладнюється поздовжнім перемішуванням теплоносіїв, а також визначення коефіцієнту теплопередачі, який залежить від режиму руху теплоносіїв, а також від умов, в яких перебігає теплопередача.

1.2 Теплові баланси

В теплообміні, як правило, беруть участь два теплоносія. Теплота, віддана гарячим теплоносієм Q_1 витрачається на нагрів холодного теплоносія Q_2 . Незначна частина теплоти витрачається на компенсацію втрати теплоти апаратом у навколишнє середовище $Q_{\text{п}}$. в теплоізольованих апаратах величина $Q_{\text{п}}$ – 3 ... 5 % корисно використуваної теплоти. Тому в розрахунках нею нехтують. Тоді тепловий баланс за умови відсутності теплових втрат виражається рівністю

$$Q_1 = Q_2 = Q, \quad (0.1)$$

де Q – теплове навантаження апарату

Якщо витрата гарячого теплоносія складає Q , його ентальпія на вході в апарат $J_{1\text{н}}$ і на виході з апарату $J_{1\text{к}}$, а витрата холодного теплоносія Q_2 , його початкова ентальпія $J_{2\text{н}}$ і кінцева $J_{2\text{к}}$, то рівняння теплового балансу

$$Q = G_1(J_{1\text{н}} - J_{1\text{к}}) = G_2(J_{2\text{к}} - J_{2\text{н}}) \quad (0.2)$$

де G_1 – масова витрата гарячого теплоносія, кг/с;

Ентальпія J або тепловміст – це кількість теплоти, витраченої на нагрівання 1 кг тіла від 0 °С до температури тіла t , і має розмірність Дж/кг.

За умови, що теплообмін протікає без зміни агрегатного стану теплоносіїв, їхні ентальпія дорівнюють добутку теплоємності c на температуру t .

$$\begin{aligned} J_{1\text{н}} &= c_{1\text{н}} \cdot t_{1\text{н}}, & J_{1\text{к}} &= c_{1\text{к}} \cdot t_{1\text{к}}, \\ J_{2\text{н}} &= c_{2\text{н}} \cdot t_{2\text{н}}, & J_{2\text{к}} &= c_{2\text{к}} \cdot t_{2\text{к}}, \end{aligned} \quad (0.3)$$

Величини $c_{1\text{н}}$ і $c_{1\text{к}}$ являють собою середні питомі теплоємності більш нагрітого теплоносія в межах зміни температур від 0 до $t_{1\text{н}}$ (на вході в апарат) і $t_{1\text{к}}$ (на виході з апарату). Величини $c_{2\text{н}}$ і $c_{2\text{к}}$ – середні питомі теплоємності більш холодного теплоносія в межах від 0 до $t_{2\text{н}}$ і 0 - $t_{2\text{к}}$.

Рівняння теплового балансу отримаємо, замінивши в рівнянні (19.2) ентальпія на їхні значення з рівнянь (19.3) і додавши витрати тепла на втрати у навколишнє середовище $Q_{\text{ном}}$.

$$G_1 \cdot c_1 (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}}) = G_2 \cdot c_2 (t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}}) + Q_{\text{ном}}, \quad (0.4)$$

Якщо теплообмін здійснюється при зміні агрегатного стану теплоносія (конденсація пари, випаровування рідини тощо) або в процесі теплообміну, перебігають хімічні реакції, які супроводжуються тепловими ефектами, то в тепловому балансі повинна бути врахована теплота, яка виділяється при фізичному або хімічному перетворенні.

Наприклад, якщо в якості гарячого теплоносія використовують насичену водяну пару, то рівняння теплового балансу видозмінюється. Кількість теплоти, яка виділяється при конденсації пари визначається з виразу

$$Q = D \cdot r, \quad (0.5)$$

де D – масова витрата пари, кг/с; r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

Цю ж кількість теплоти можна представити у вигляді різниці ентальпій насиченої пари i' і отриманого конденсату i'' .

$$Q = D(i' - i'') \quad (0.6)$$

Ентальпія насиченої пари складається з ентальпії води, з якої була отримана пара, і прихованої теплоти пароутворення і залежить від тиску і температури. В технічних розрахунках ентальпія звичайно не розраховують, а знаходять їхні значення при даній температурі з теплових діаграм або з довідкових таблиць.

Рівняння теплового балансу для апаратів, які використовують насичену пару в якості гарячого теплоносія, має вигляд:

$$D \cdot r = G_2 \cdot c_2 (t_{2к} - t_{2н}) + Q_{ном} \quad (0.7)$$

Якщо в апараті охолоджується утворений конденсат, в лівій частині рівняння необхідно врахувати теплоту, яка виділяється конденсатом.

$$D \cdot r + D \cdot c_{кон} (t_n - t_{кон}) = G_2 \cdot c_2 (t_{2к} - t_{2н}) + Q_{ном} \quad (0.8)$$

де $c_{кон}$ – питома теплоємність конденсату, Дж/(кг·К); t_n – температура граючої пари, дорівнює температурі конденсації, °С; $t_{кон}$ – температура конденсату, який залишає апарат, °С.

Рівняння (19.8) передбачає, що маса конденсату, який утворився, дорівнює масі сконденсованої пари. Це слушно, якщо нехтувати масою газів, які утворилися при конденсації пари.

Величину добутку витрати теплоносія на його середню питому теплоємність називають **водяним** або **умовним еквівалентом** W ($W = G \cdot c$). його числове значення визначає кількість води, яке по своїй тепловій ємності

еквівалентно кількості теплоти, необхідній для нагрівання даного теплоносія на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при заданій його витраті. Тому якщо теплоємності рідин, які обмінюються теплотою (c_1 і c_2), вважати незалежними від температури, то рівняння балансу (19.4) приймає вигляд

$$Q = W_1(t_{1н} - t_{1к}) = W_2(t_{2к} - t_{2н}) + Q_{ном} \quad (0.9)$$

де W_1 W_2 – водяні еквіваленти гарячого і холодного теплоносія.

1.3. Основне рівняння теплопередачі

Теплообмінні процеси здійснюються згідно кінетичним законамірностям. Загальний закон кінетики для теплообмінних процесів формуються наступним чином: **"швидкість процесу прямо пропорційна рушійній силі і зворотно пропорційна опору"**.

Згідно визначенню загальне кінетичне рівняння для теплообмінних процесів має вигляд

$$\frac{dQ}{Fdt} = \frac{1}{R} \Delta t = K \Delta t \quad (0.10)$$

де Q – кількість переданої теплоти; F – площа поверхні теплообміну; τ – тривалість процесу; R – опір середовища; Δt – різниця температур між середовищами – рушійна сила процесу; $K = \frac{1}{R}$ – коефіцієнт швидкості теплопередачі між середовищами, зворотній опору.

При розрахунку теплообмінних апаратів використовується кінетичне рівняння, яке виражає зв'язок між тепловим потоком Q і площею поверхні F теплопередачі. Це рівняння називається **основним рівнянням теплопередачі**.

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau \quad (0.11)$$

де Q – тепловий потік; K – кінетичний коефіцієнт, або коефіцієнт теплопередачі, який визначає швидкість перенесення теплоти; Δt_{cp} – середня рушійна сила або середня різниця температур між теплоносіями.

"Кількість теплоти, яка передається від гарячого теплоносія, прямо пропорційна площі теплопередавальній поверхні F , діяльній середній різниці температур Δt , тривалості процесу τ і коефіцієнту теплопередачі K ".

Для сталого безперервного процесу параметри якого з часом змінюються, рівняння (19.11) зручно поділити на τ :

$$\frac{Q}{\tau} = Q' = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \quad (0.12)$$

де Q' - кількість теплоти, переданої за одиницю часу, має розмірність Дж/с або Вт. Надалі Q відзначатиметься індексом а рівняння для сталих процесів набуде вигляду

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \quad (0.13)$$

Як правило, розрахунок теплових потоків виконується по рівнянням теплового балансу. Тому основне рівняння теплопередачі зазвичай використовується з метою визначення площі поверхні теплопередачі:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau} \quad (0.14)$$

Щоб скористатися рівнянням (19.14), необхідно знати кількість переданої теплоти, яка визначається з теплового балансу, середню різницю температур і коефіцієнт теплопередачі між середовищами.

Коефіцієнт теплопередачі. Фізичний зміст коефіцієнта теплопередачі впливає з основного рівняння

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t \cdot \tau} \quad (0.15)$$

"Коефіцієнт теплопередачі K показує, яка кількість теплоти передається від гарячого теплоносія до холодного через 1 м^2 поверхні при середній різниці температур в 1 градус за одну секунду".

Одиниця виміру коефіцієнта теплопередачі

$$K = \left[\frac{Q}{F \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°K}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°K}} \right]$$

З визначення випливає, що коефіцієнт теплопередачі не залежить від площі поверхні теплообміну, діючої різниці температур і часу.

Кінетичний коефіцієнт K , який визначає швидкість передачі теплоти, враховує термічні опори, які виникають з одного і з іншого боку стінки, а також при проходженні теплоти через саму стінку. На його величину впливають коефіцієнти тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки і від стінки до холодного теплоносія, а також теплопровідність стінки.

При описі теплопередачі часто використовуються наступні показники:

Тепловий потік Q (Вт) – кількість теплоти, яка проходить за одиницю часу через довільну поверхню.

Питомий тепловий потік q (Вт/м²), або поверхнева щільність теплового потоку – тепловий потік, віднесений до одиниці площі поверхні F (м²):

$$q = Q/F \quad (0.16)$$

Лінійна щільність теплового потоку q_L (Вт/м) – тепловий потік, віднесений до одиниці довжини поверхні L (м):

$$q_L = Q/L \quad (0.17)$$

Цей показник зазвичай використовують при описі теплопередачі через труби.

Тепловий потік (Дж/с) виражається через масову витрату теплоносія M і різницю його ентальпій Δi (Дж/кг) в розглянутому пристрої:

$$Q = M \cdot \Delta i \quad (0.18)$$

Ентальпія складається з енергії, акумульованої (збереженої) тілом, і енергії, яка може вивільнитися або поглинутися при фазовому переході, розчиненні, сорбції або іншому процесі, який реалізується паралельно з теплообмінним.

Різниця ентальпій теплоносія Δi (Дж/кг) за відсутності фазового переходу може бути виражена через добуток питомої теплоємності c [Дж/(кг·°К)] на різницю температур Δt (К).

$$\Delta i = c \cdot \Delta t \quad (0.19)$$

В разі фазового переходу Δi (різниця ентальпій на початку і в кінці цього процесу) можна прирівняти до теплоти фазового переходу, (Дж/кг).

$$\Delta i = r \quad (0.20)$$

В практичних додатках часто один вид теплопередачі супроводжується іншим. Наприклад, обмін теплотою між твердою поверхнею і рідиною відбувається одночасно теплопровідністю і тепловіддачею при конвективному перенесенні теплоти. В цілому цей складний процес називають *конвективним теплообміном* між даними тілами або *тепловіддачею*. В парових котлах в перенесенні теплоти від топкових газів до кип'ятільних труб одночасно беруть участь всі три види теплообміну, а безпосередньо через стінки цих труб – тільки процес теплопровідності.

Феноменологічний метод розрахунку теплових процесів.

Ці методи широко застосовуються для розрахунків теплопередачі в технологічній апаратурі. В них і використовують рівняння балансів теплових і

масових потоків речовини і емпіричні зв'язки між ними; загальні закономірності теплопередачі перетворюють до виду, зручного для даного методу розрахунку.

Визначивши з рівнянь теплового балансу тепловий потік Q , який передається в теплообмінному апараті, і обмеження на його поверхневу щільність q (19.16), які, як правило, накладаються технологічними міркуваннями відповідного виробництва, знаходять необхідну площу теплообмінних поверхонь

$$F = Q/q \quad (0.21)$$

Можливе накладення технологічних обмежень не безпосередньо на q , а на однозначно пов'язані з нею параметри, наприклад, на температуру поверхні, яка віддає тепло. Обмеження визначаються умовами термічної стійкості продукту.

Рівняння теплового балансу для передаваного теплового потоку в більшості теплопередавальних апаратів, в яких теплота від одного теплоносія передається іншому, має вигляд

$$Q = M_1 \cdot \Delta i_1 = M_2 \cdot \Delta i_2; \Delta i_1 = t_n - t_{\text{конд}} + j \cdot r \quad (0.22)$$

де M_1, M_2 – масові витрати гріючого і нагріваного теплоносіїв, кг/с; r – теплота конденсації (кипіння), Дж/кг; j – частка теплоносія, який зазнає фазовий перехід (випаровування або конденсацію); c – середня питома теплоємність теплоносія в діапазоні температур від початкової t_n до $t_{\text{конд}}$ в даному апараті, Дж/(кг·°К); Δi_1 – зменшення ентальпії гріючого теплоносія, Дж/кг; Δi_2 – збільшення ентальпій нагріваного теплоносія, Дж/кг; $t_{\text{конд}}$ – температура конденсації гріючого теплоносія.

Феноменологічні методи широко використовуються для визначення теплових потоків, які передаються у відповідних умовах як в простих, так і в складних теплових процесах. Ці співвідношення формулюються ідентично для всіх умов. Вони констатують пропорційність відповідних теплових потоків і сил, які їх спонукають.

1.4. Рушійна сила теплообмінних процесів

Рушійна сила теплообмінних процесів – це різниця температур, під дією якої температура теплоносія передається від гарячого теплоносія до холодного.

Під час вивчення законів теплопередачі ми вважали ці температури по обидва боки стінки, що їх розділяє, постійними. В більшості випадків в процесі теплообміну температура теплоносіїв (або хоча б одного з них) змінюється уздовж поверхні теплообміну, тому в теплових розрахунках, в яких застосовується рівняння теплопередачі (19.11) використовується середня різниця температур.

На практиці застосовуються дві основні схеми руху теплоносіїв:

а) прямотечія – обидва теплоносії рухаються паралельно один одному в одному напрямку;

б) протитечія – теплоносії рухаються паралельно один назустріч одному.

Крім цього, має місце **перехресний рух** у взаємно перпендикулярному напрямку і **змішаний рух** – один або два теплоносії роблять кілька ходів в апараті, омиваючи одну частину його поверхні за схемою протитечії, іншу – за схемою прямотечії або перехресної течії.

На рисунку 19.1 показаний характер зміни температур теплоносіїв при прямотечії і протитечії. Один з теплоносіїв G_1 охолоджується від температури t'_1 до t''_1 , а інший G_2 нагрівається від t'_2 до t''_2 . Як видно з рисунка, рушійна сила при теплопередачі між двома теплоносіями не зберігає свого постійного значення, а змінюється уздовж теплообмінної поверхні апарату. Наприклад, при прямотечії (рис. 1.1 а) при вході теплоносія в теплообмінник локальна рушійна сила максимальна:

$$\Delta t_{max} = t'_1 - t'_2$$

і на виході з апарату мінімальна:

$$\Delta t_{min} = t''_1 - t''_2$$

Така сама картина спостерігається і при протитечії. Тому при розрахунках процесів теплопередачі користуються середньою рушійною силою процесу.

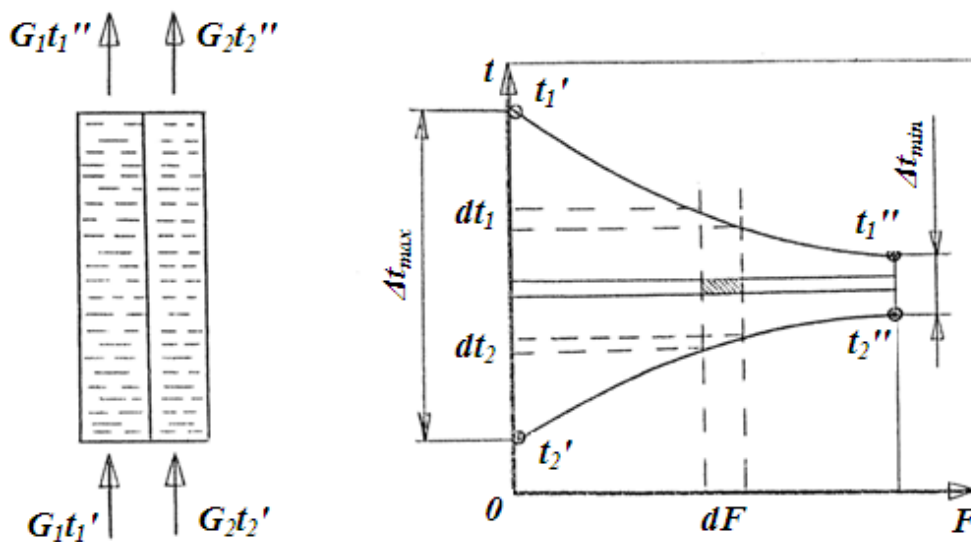


Рис. 1.1 – Схема зміни температур теплоносіїв при проточній

Кількість теплоти, яка передається за одиницю часу від гарячого теплоносія до холодного на нескінченно малому елементі теплообмінної поверхні dF (рис. 19.1) визначається за основним рівнянням теплопередачі

$$dQ = K (t_1 - t_2) dF \quad (0.23)$$

В результаті теплообміну на цьому елементі поверхні температура гарячого теплоносія знизиться на dt_1 :

$$dt_1 = -dQ / G_1 \cdot c_1$$

а температура холодного теплоносія підвищиться на dt_2 :

$$dt_2 = dQ / G_2 \cdot c_2$$

де G_1 і G_2 – масові витрати відповідно гарячого і холодного теплоносіїв; c_1 і c_2 – питомі теплоємності відповідно гарячого і холодного теплоносіїв.

Зміну температури теплоносіїв знайдемо, віднімаючи з першого рівняння друге

$$dt_1 - dt_2 = -\frac{dQ}{G_1 \cdot c_1} - \frac{dQ}{G_2 \cdot c_2}$$

або

$$d(t_1 - t_2) = -dQ \left(\frac{1}{G_1 \cdot c_1} + \frac{1}{G_2 \cdot c_2} \right) \quad (0.24)$$

Підставляючи значення dQ з основного рівняння теплопередачі (19.23) у рівність (19.24), отримаємо:

$$d t_1 - t_2 = -K t_1 - t_2 \cdot dF \cdot \left(\frac{1}{G_1 \cdot c_1} + \frac{1}{G_2 \cdot c_2} \right)$$

або після перетворення

$$\frac{d t_1 - t_2}{t_1 - t_2} = -K \left(\frac{1}{G_1 \cdot c_1} + \frac{1}{G_2 \cdot c_2} \right) \cdot dF \quad (0.25)$$

Кількість теплоти Q , передане за одиницю часу від гарячого теплоносія до холодного на всій теплообмінній поверхні F теплообмінника, визначають з рівняння теплового балансу

$$Q = G_1 \cdot c_1 (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_2 (t_2' - t_2'') \quad (0.26)$$

Підставляючи значення $G_1 \cdot c_1 = Q / (t_1' - t_1'')$ і $G_2 \cdot c_2 = Q / (t_2' - t_2'')$ з рівняння (19.26) в рівняння (19.25) отримаємо:

$$\frac{d t_1 - t_2}{t_1 - t_2} = -\frac{K}{Q} [t_1' - t_1'' + t_2' - t_2''] \cdot dF \quad (0.27)$$

В результаті інтегрування рівняння (19.27) при постійному K отримаємо

$$Q = K \cdot F \frac{t_1' - t_2' - t_1'' - t_2''}{\ln t_1' - t_2' / t_1'' - t_2''} \quad (0.28)$$

або

$$Q = K \cdot F \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \Delta t_{max} / \Delta t_{min}} \quad (0.29)$$

Замінімо Q на його значення з основного рівняння теплопередачі $Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$ (19.13) і після незначних перетворень отримаємо співвідношення для розрахунку середньої рушійної сили процесу теплопередачі

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \Delta t_{max} / \Delta t_{min}} \quad (0.30)$$

Це відношення справедливо і для випадку протитечійного руху теплоносіїв уздовж поверхні теплообміну.

Коли теплоносії рухаються назустріч один одному в протитечії (рис. 1.2), діюча різниця температур в кожному перерізі апарату набагато ближче до середньої різниці Δt_{cp} , яка розраховується за тим же рівнянням (19.30).

При невеликій зміні температур теплоносія, коли різниця температур на вході в апарат перевищує різницю на виході не більше ніж в 2 рази, тобто $\Delta t_{max} / \Delta t_{min} < 2$, середню різницю визначають як середню арифметичну:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max} + \Delta t_{min}}{2} \quad (0.31)$$

при цьому помилки не перевищують 5%.

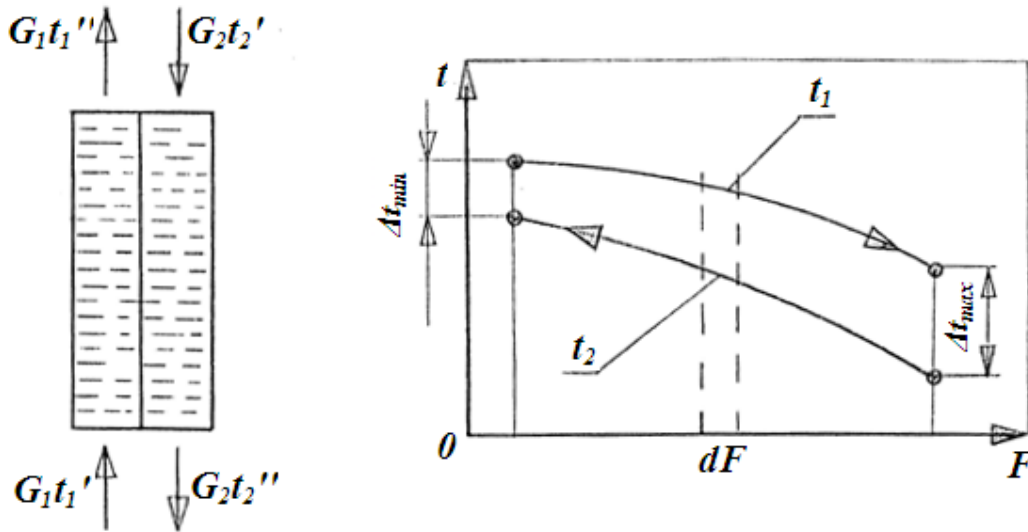


Рис. 1.2. – Схема зміни температур теплоносіїв при протитечії

Від правильного вибору відносного руху теплоносіїв значній мірі залежить величина рушійної сили процесу і його економічність. Порівняльна оцінка прямотечії і протитечії показує, що при протитечії менш нагрітий теплоносій з тією ж температурою, що і при прямотечії, можна нагріти до більш високої температури, близької до початкової температури більш нагрітого теплоносія. Отже, застосування протитечії при теплообміні економічне, ніж прямотечії. Розрахунки показують, що середня різниця температур при протитечії буде більше, ніж при прямотечії (при однаковій витраті теплоносіїв). Тому швидкість теплообміну при протитечії буде більше. За рахунок цього фактору протитечійний теплообмінник виходить компактніший.

В ряді випадків перевагу віддають прямотечійному руху теплоносіїв. Наприклад, в рекуперативних теплообмінниках для отримання крижаної води ймовірність обмерзання поверхонь теплообміну при прямотечії істотно знижується. В барабанних сушарках висушувані матеріали (зернові) і теплоносій рухаються прямотечією, щоб в процесі зневоднення максимально зберегти основні властивості матеріалів.

При перехресному і змішаному потоці теплоносіїв середню рушійну силу обчислюють за формулою (19.30), уводячи коефіцієнт $\epsilon_{\Delta t}$:

$$\Delta t_{cp} = \varepsilon_{\Delta t} \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \Delta t_{max} / \Delta t_{min}} \quad (0.32)$$

який визначається за графіком в залежності від схеми і співвідношення температур теплоносіїв (рис. 1.3).

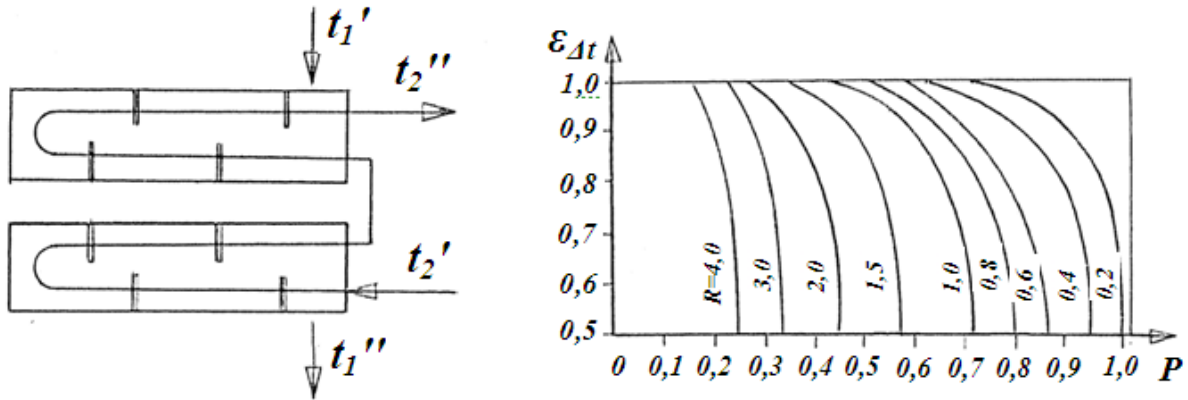


Рис. 1.3 – Схема руху теплоносіїв і коефіцієнти $\varepsilon_{\Delta t}$ при змішаній течії в кожухотрубному теплообміннику з двома течіями в міжтрубному просторі з поперечними перегородками і 4-ма течіями в трубному просторі.

Величини P і R з цих графіків визначають за формулою Больцмана:

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} \quad R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'}$$

Тепловіддача при нестационарному режимі. Нестационарне перенесення теплоти виникає в теплообмінних апаратах короткочасно при їх пуску, зупинці або зміни режиму їх роботи. В цих умовах рушійна сила та інші параметри апаратів розраховуються для основного стаціонарного теплообміну. Разом з тим в апаратах періодичної дії (наприклад, при нагріванні або охолодженні рідини в апаратах з сорочкою, змійовиком тощо) нестационарне перенесення теплоти є основним.

19.5 Інтенсифікація теплових процесів.

Інтенсифікація теплових процесів дає можливість збільшити продуктивність апаратів за рахунок зменшення їх габаритів, металоемності, вартості і відповідно зменшення експлуатаційних витрат. В цілому слід визначити що інтенсифікація теплообміну – це перш за все збільшення кількості переданої теплоти та інтенсивність роботи апарату.

Характеристикою інтенсифікації обладнання є кількісний показник інтенсивності J .

Інтенсивність J – це відношення кількості теплоти Q , переданої за одиницю часу τ до його геометричної характеристики – поверхні теплообміну F .

$$J = \frac{Q}{F \cdot \tau} = K \cdot \Delta t_{cp} \quad (0.33)$$

Залежність (19.33) являє собою кінетичне рівняння теплообміну. Його можна застосовувати для складання схеми дії конструктора або розробника з інтенсифікації конкретного теплообмінного апарату.

Розглянемо три напрямки, які дозволяють інтенсифікувати теплопередачу, і які впливають з основного рівняння теплопередачі (19.11):

1. Збільшення коефіцієнта теплопередачі або зниження загального термічного опору за рахунок зменшення його складових.

На коефіцієнт теплопередачі впливає термічний опір стінки, який можна зменшити, виготовивши її більш тонкою або замінивши матеріал на більш теплопровідний (наприклад, сталь на латунь).

В процесі експлуатації теплообмінних апаратів на поверхні нагріву утворюються відкладення жиру, накипу, нагару і сажі. Навіть незначна товщина цих відкладень, які мають низький коефіцієнт теплопровідності, створює великий термічний опір (шар накипу товщиною в 1 мм створює термічний опір, який прирівнюється до товщини сталеві стінки, яка дорівнює 400 мм). В окремих випадках (наприклад, під час електрообігрівання) відкладення накипу призводить до значного підвищення температури стінки, що може стати причиною аварії. Тому при експлуатації теплообмінних апаратів необхідно запобігати засміченню поверхонь нагрівання від будь-якого виду відкладень, передбачити їх регулярне очищення.

2. Збільшення площі поверхні теплообміну в першу чергу з боку теплоносія з меншим коефіцієнтом тепловіддачі. Для цього поверхню нагріву з боку цього теплоносія роблять ребристою (рис. 1.4), (наприклад, в радіаторах системи опалення, в конденсаторах холодильних агрегатів) за рахунок чого досягається вирівнювання температурних опорів, а в результаті і збільшення кількості переданої теплоти.

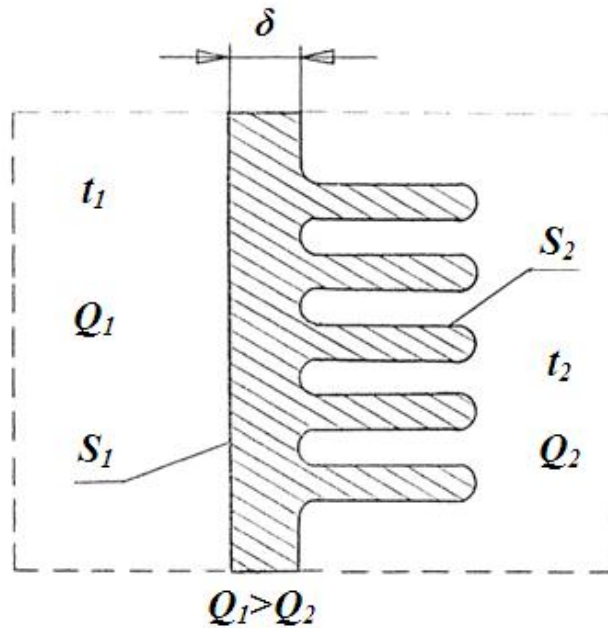


Рис. 1.4 – Плоска однобічна ребриста стінка

Кількість переданої теплоти через плоску ребристу стінку товщиною δ визначається за рівнянням

$$Q = K_p (t_1 - t_2) \tau \quad (0.34)$$

де K_p – коефіцієнт теплопередачі ребристої стінки, Вт/°К.

Коефіцієнт теплопередачі ребристої стінки визначається за формулою

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{a_1 \cdot F_1} + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{1}{F} + \frac{1}{a_2 \cdot F_2}} \quad (0.35)$$

де F_1 – площа гладкої поверхні стінки, м²; F_2 – площа ребристої поверхні стінки, м²; a_1 і a_2 – коефіцієнти тепловіддачі для теплоносіїв, Дж/(м²·с·К).

Відношення площі ребристої поверхні F_2 до площі гладкої поверхні стінки F_1 називається **коефіцієнтом оребрення**.

$$k = F_2 / F_1$$

Якщо потрібно зменшити розміри теплообмінника, ребристими роблять обидві поверхні стінки.

3. Збільшення різниці температур теплоносіїв (середнього температурного режиму). Розглянемо найбільш поширені випадки теплообміну і можливі шляхи збільшення середньої різниці температур.

а) Температура теплоносія постійна (конденсація пари), а температура підігріваної рідини збільшується. В цьому випадку збільшити середню різницю температур Δt_{cp} (рушійну силу) можна збільшенням температури гріючої пари, тобто використовувати пар при більш високому тиску.

б) Температура теплоносія змінна (це має місце в крапельному або газовому середовищі), і в процесі теплообміну зменшується; температура середовища, яке приймає теплоту, залишається постійною (випарювання рідини). Збільшити середню різницю температур між теплоносіями можна, знижуючи температуру середовища, яке приймає теплоту (наприклад, знижуючи тиск під час випарювання).

в) Температура обох теплоносіїв постійна; це теж один з поширених процесів (випарювання рідини за рахунок теплоти конденсації пари).

Збільшити середню різницю температур можна, збільшуючи тиск граючої пари, або зменшуючи тиск пари, яка створюється під час кипіння (створення вакууму під час кипіння), або тим і іншим шляхом одночасно.

г) Температура обох теплоносіїв постійна, при цьому напрямок потоків по обидва боки поверхні теплообміну може бути паралельно-прямоточний, зустрічно протитечійний і перпендикулярно перехресний. Збільшити середню різницю температур можна, замінивши існуючу прямотечію на протитечію, якщо така операція можлива за технологічними умовами; збільшити до раціонально можливих меж меншу різницю температур між теплоносіями.

19.6. Рекуперація і регенерація теплоти

Одним з основних напрямків економії теплоти в харчовій промисловості є використання вторинних енергетичних ресурсів, тобто їх регенерація. В ширшому понятті регенерація тепла це утилізація (практичне використання) тієї частини теплоти, яка була вироблена для конкретного процесу, однак не була використана в ньому, залишаючись при цьому корисною теплотою.

Вторинні ресурси – енергетичний потенціал відходів готової продукції, побічних і проміжних продуктів, який створюється в технологічних установках і не використовуються в самій установці, однак може бути частково або повністю використаний в інших апаратах або для допоміжних потреб виробництва.

Вторинні енергоресурси харчових виробництв можна розділити на наступні групи:

- паро-конденсатна суміш, яку використовує нагрівальний теплоносіє в теплообмінниках;
- вторинні сокові пари вакуум-випарних установок;

- відпрацьоване повітря сушильних установок і термічних камер для теплової обробки продукції;
- продукти згоряння палива в технологічних печах (наприклад, хлібопекарських), коптильних установках, термоагрегатах (обсмажування і варення ковбасних виробів, обсмажувальних апаратах (для зерен кави), сушильних установках;
- скинуті гарячі води температурою близько 60 °С;
- фізична теплота готової продукції (наприклад, гаряче молоко після пастеризації) або відходів.

Регенерація – процес, в якому два потоки теплоносіїв проходить через один і той же простір по черзі, а теплота, яка передана від одного з теплоносіїв поверхні нагрівання, акумулюється нею, після чого віддається іншому теплоносію, коли настане його черга руху через апарат.

Рекуперація – процес в якому обидва потоки теплоносіїв проходять через теплообмінник одночасно передаючи теплоту один одному безпосередньо через стінку, яка їх розділяє.

Розглянемо процес рекуперації на практичному прикладі (рис. 1 5).

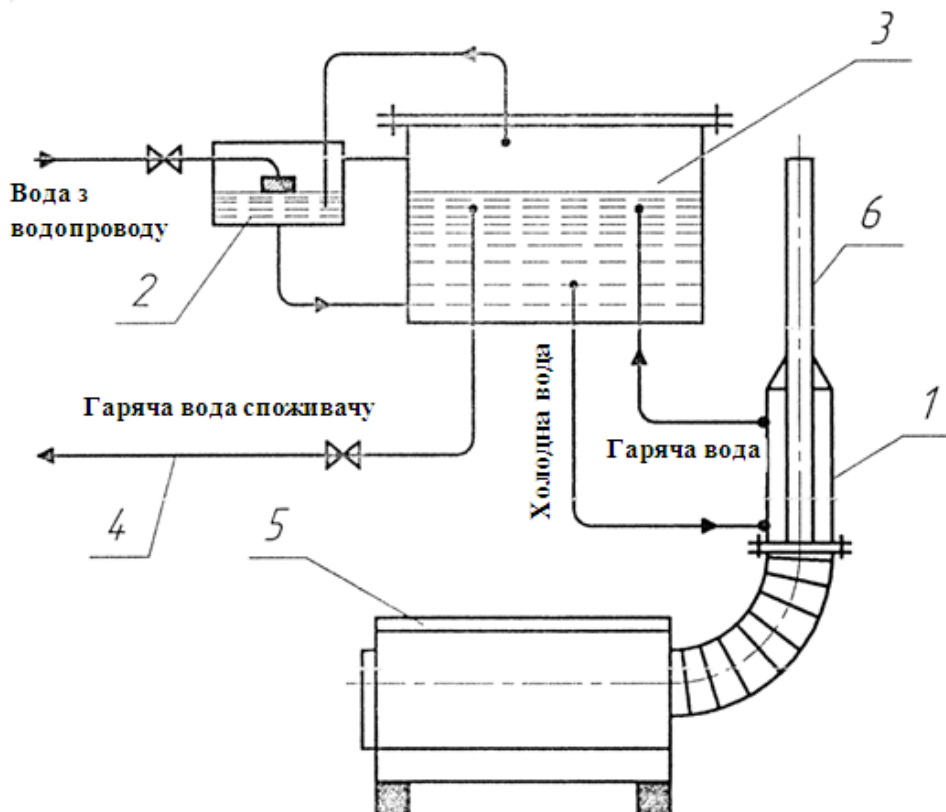


Рис. 1.5 – Схема установки нагрівача для рекуперації теплоти

1 – нагрівач води; 2 – поплавкова камера; 3 – ємність для нагрівання води; 4 – трубопроводи холодної гарячої води; 5 – газова плита; 6 – вертикальний газохід.

Серійна газова плита обладнана виносним нагрівачем 1 для утилізації теплоти продуктів згорання, які виходять. Нагрівач змонтований у вертикальному газоході і обладнаний ємністю 3 для нагріву води, поплавковою камерою 2 для підтримки певного рівня в ємності і трубопроводами 4, які з'єднують обладнання даної схеми.

Холодна вода з водопроводу надходить в поплавкову камеру 2, з якої вона рухається в ємність для нагріву води 3. Рівень води в ємності підтримується поплавковою камерою, яка балансує подачу холодної води в ємність і забір гарячої води споживачу. З ємності холодна вода надходить в нагрівач 1 змієвикового типу (можливі і інші конструкції нагрівача), в якому забирає тепло від відпрацьованих в газовій плиті 5 газів. Нагріта вода повертається в ємність 3 та з неї подається споживачу. В разі будь-яких несправностей, пов'язаних з переповненням водою ємності, передбачена водовідвідна труба, яка зливає з надлишок назад в поплавкову камеру.

Для інтенсифікації теплообміну і підвищення ефективності роботи таких водонагрівачів в газоходи монтують турбулізуючі вставки.

Одним з основних показників процесу рекуперації теплоти є *коефіцієнт рекуперації* – відносини повернутої використаної рекуператором теплоти до загальних її витрат.

$$E = Q_B / Q \quad (0.36)$$

де E – коефіцієнт рекуперації, %; Q_B – кількість повернутої теплоти, Дж; Q – загальні витрати на процес, Дж.

Величина E безрозмірна і являє собою *критерій економічного ефекту* рекуператора. За необхідності коефіцієнт рекуперації виражають у відсотках. Теоретична межа $E = 1$ не може бути досягнута, тому що це означає, що вся теплота витрачена на процес, повертається повністю.

На практиці в харчових виробництвах ефективно застосовуються рекуператори, у яких E досягає 85...90%. Так, наприклад, твердопаливна плита ПТС–2,5 для утилізації теплоти вихідних газів обладнана водонагрівальним пристроєм продуктивністю 120...200 л/год води при температурі 70 °С.

Використання вторинних енергоресурсів здійснюється найчастіше в спеціальних теплообмінних апаратах – рекуператорах і регенераторах. Вони забезпечують передачу теплоти між двома (або більшою кількістю) потоками теплоносіїв, які проходять через апарат.

Контрольні питання до теми 19

1. Дайте характеристику і визначення параметру "теплота".
2. Що таке теплообмін?
3. Які параметри представляють рушійну силу теплообміну?
4. Які технологічні процеси відносяться до теплообмінних?
5. Дайте визначення терміну "теплопередача".
6. Назвіть три елементарних способи перенесення теплоти.
7. Що являє собою теплопровідність?
8. Як відбувається процес перенесення тепла при конвекції?
9. Дайте характеристику процесу перенесення тепла способом теплового випромінювання.
10. Що називається теплоносієм?
11. Які властивості має промисловий теплоносій – насичена водяна пара?
12. Назвіть основні переваги чистої води, як теплоносія.
13. Які переваги і недоліки мають топкові гази?
14. Напишіть загальне рівняння теплового балансу.
15. Дайте визначення ентальпії (або тепловміст).
16. Як визначається кількість теплоти, що виділяється при конденсації пари?
17. Як формулюється загальний закон кінетики?
18. Запишіть загальне кінетичне рівняння для теплообмінних процесів.
19. Дайте формулювання основному рівнянню теплопередачі.
20. Що показує коефіцієнт теплопередачі K ?
21. Дайте визначення рушійній силі теплообмінних процесів.
22. Назвіть основні схеми руху теплоносіїв.
23. Як змінюється температура теплоносіїв і при прямотечії?
24. За якою формулою визначається рушійна сила при прямотечії і протитечії?
25. Які переваги має протитечія?
26. Назвіть три напрямки, які дозволяють інтенсифікувати теплопередачу.
27. На які групи діляться вторинні енергетичні ресурси?

28. Дайте формулювання процесу регенерації.
29. Дайте формулювання процесу рекуперації.
30. Що означає коефіцієнт рекуперації E ?

ТЕМА 2. СПОСОБИ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОТИ І ЇХ ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ

Технологічні процеси, основою яких є передача теплоті під впливом різниці температур називаються *тепловими процесами*, а апаратура, призначена для їх проведення - називається *тепловою*. В основі всіх теплових процесів лежать зміни теплового стану тіл або середовища, які беруть участь в цих процесах.

Наука про теплообмін розділяє три принципово різних способи розподілу теплоти : теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання. Практично теплота поширюється не одним з яких-небудь розглянутих випадків , а одночасно двома , а частіше – трьома. Такий процес називається *складним теплообміном*.

В даній темі буде розглянуто кожен з цих способів і складний процес перенесення теплоти, який їх об'єднує.

2.1.Перенесення теплоти теплопровідністю

Теплопровідність - процес перенесення теплової енергії від більш нагрітих ділянок тіла до менш нагрітих в результаті теплового руху і взаємодії мікрочастинок, молекул, атомів, електронів.

Теплопровідність в твердих тілах, рідинах і газах відбувається, відповідно внаслідок:

- передачі енергії теплових коливань між сусідніми молекулами і атомами; крім цього в металах - в основному через рух вільних електронів.
- обміну енергіями сусідніх молекул;
- дифузії молекул.

Теплопровідність розглядається як самостійний процес, який може протікати тільки в твердих тілах (в тому числі твердих харчових продуктах). У рідинах і газах теплопровідність протікає спільно з конвекцією і випромінюванням, або з обома цими процесами одночасно.

Температурне поле. Процес теплопровідності нерозривно пов'язаний з розподілом температури всередині середовища (тіла). Тому при його вивченні перш за все необхідно встановити поняття температурного поля і градієнти температур.

Температурне поле – це сукупність значень температур в даний момент часу для всіх точок розглядуваного середовища.

В загальному випадку температура t в даній точці є функцією координат x, y, z і часу τ :

$$t = f(x, y, z, \tau); \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0 \quad (1.1)$$

Рівняння (2.1) є рівнянням несталою (нестационарного) температурного поля, тобто залежить від часу. Таке поле відповідає несталому тепловому режиму теплопровідності.

В окремому випадку температура є функцією тільки системи координат і не залежить від часу.

$$t = f(x, y, z); \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \quad (1.2)$$

Таке температурне поле буде сталим (стационарним).

Поверхня тіла, всі точки якого мають однакову температуру, називається **ізотермічною поверхнею**.

Градiєнт температур. Якщо розсікти тіло площиною і з'єднати точки, які лежать в цій площині і мають однакову температуру, то отримаємо лінії постійних температур, які звані **ізотермами** (рис 2.1).

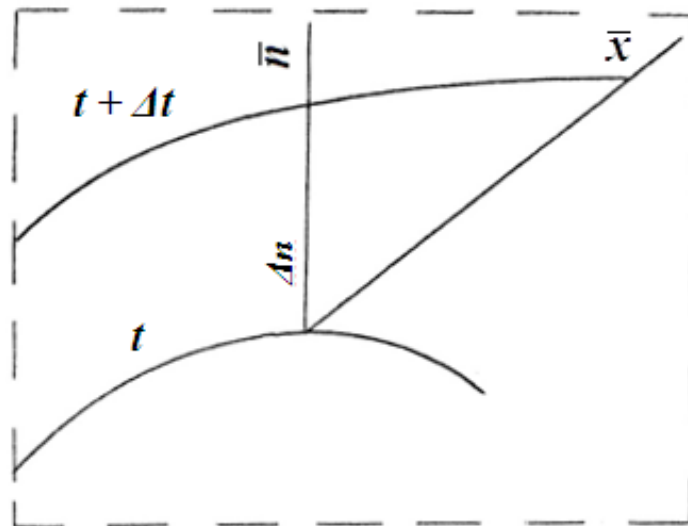


Рис. 2.1 Схема визначення температурного градієнта

В просторі геометричне місце з однаковою температурою являє собою ізотермічну поверхню. Через те, що в одній і тій же точці простору одночасно не може бути двох різних температур, то ізотермічні поверхні одна з одною ніколи не перетинаються. Всі вони або замикаються на собі або закінчуються на границях тіла. Таким чином, зміна температури в тілі має місце тільки в напрямках, які перетинають ізотермічні поверхні (на рис 2.1 цей напрям x).

Найбільш різка зміна температури виходить в напрямку нормалі n до ізотермічної поверхні.

Межа відношення зміни температури Δt до відстані між ізотермами називається **градієнтом температур** і позначається одним з наступних символів:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t \quad (1.3)$$

Градiєнт температур – це вектор, спрямований по нормалі до ізотермічної поверхні в напрямку зростання температури і чисельно рівний частковій похідній від температури за цим напрямком. За позитивний напрямок градієнта приймається напрямок зростання температур.

Основний закон теплопровiдностi, встановлений Фур'є (1768-1830pp.) і названий його ім'ям.

"Кількість теплоти dQ , переданої за допомогою теплопровiдностi через елемент поверхні dF , перпендикулярний тепловому потоку, за час $d\tau$, прямо пропорційна температурному градієнту dt/dn , площі dF , часу $d\tau$ і залежить від теплопровiдностi матеріалу."

$$dQ = -\lambda \cdot dF \cdot d\tau \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right). \quad (1.4)$$

Щільність теплового потоку за законом Фур'є виражається має наступний вираз:

$$q = \frac{Q}{F \cdot \tau} = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right). \quad (1.5)$$

де q - щільність теплового потоку або кількість теплоти, передане через одиницю поверхні за одиницю часу, λ - коефіцієнт теплопровiдностi, Вт/(м \cdot °К).

Коефіцієнт теплопровiдностi λ – показує, яка кількість теплоти проходить внаслідок теплопровiдностi через 1 м 2 поверхні тіла за одиницю часу (1 с) при різниці температур 1 градус на одиницю довжини нормалі (1 м) до ізометричної поверхні.

$$\lambda = \left[\frac{dQ \cdot dn}{dF \cdot d\tau \cdot dt} \right] = \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right] \quad (1.6)$$

Коефіцієнт теплопровiдностi є фізичною характеристикою речовини, що визначає здатність тіла проводити теплоту. В загальному випадку λ залежить від природи речовини, її агрегатного стану, щільності, вологості, тиску і температури. Коефіцієнт теплопровiдностi газів зростає з підвищенням температури і майже не залежить від тиску. Для рідин і металів коефіцієнт

теплопровідності зі збільшенням температури зазвичай знижується (винятком є вода, λ якої дещо зростає при підвищенні температури до 130 °С, а при подальшому її підвищенні знижується). Для більшості твердих тіл λ збільшується з підвищенням температури.

За звичайних умов найбільше значення коефіцієнта теплопровідності, Вт/(м·°К) мають метали, які застосовуються в харчовому машинобудуванні (наприклад для міді $\lambda = 384$, для нержавіючої сталі $\lambda = 14 \dots 23$), найменше – гази (наприклад для повітря $\lambda = 0,03$). Коефіцієнт теплопровідності для теплоізоляційних будівельних матеріалів лежить в межах ($\lambda = 0,02 \dots 3,0$); низькі значення λ пояснюються тим, що ці матеріали мають пористу структуру, в порах яких знаходиться повітря, яке погано проводить теплоту. Краплинні рідини мають $\lambda = 0,1 \dots 0,7$ і займають проміжне положення між металами і газами.

Орієнтовні значення λ для деяких матеріалів, Вт/(м·°К)

Срібло	485	Вода	0,6
Мідь	384	Повітря	0,03
Алюміній	210	Шлаковата	0,1
Латунь	85	Будівельні матеріали	0,02 ... 3,0
Чавун	63	М'ясо, риба, картопля	0,6
Нікель	58	Жири, олія, мастило	0,18
Свинець	35		
Нержавіюча сталь	23		

В теплових розрахунках значення коефіцієнтів теплопровідності зазвичай беруться за довідковими таблицями при середній температурі даної речовини.

Диференціальне рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є). Для складних процесів, до яких відноситься передача теплоти теплопровідністю, при встановленні залежності між величинами, зручно скористатися методом математичної фізики, яка розглядає перебіг процесу не в усьому досліджуваному просторі, а в елементарному об'ємі речовини протягом нескінченно малого проміжку часу. Зв'язок між величинами, які беруть участь в передачі теплоти теплопровідністю, встановлюється диференціальним рівнянням теплопровідності. В межах обраного елементарного обсягу і нескінченно малого проміжку часу стає можливим знехтувати зміною деяких величин, які характеризують даний процес.

При виведенні диференціального рівняння теплопровідності приймаються такі припущення: внутрішні джерела теплоти відсутні; тіло однорідне та ізотропне. Виділимо в тілі елементарний паралелепіпед обсягом dV з ребрами dx , dy , dz (рис 2.2). Фізичні властивості тіла – щільність ρ ,

теплоємність c , і теплопровідність λ – однакові у всіх точках тіла паралелепіпеда і не змінюються в часі.

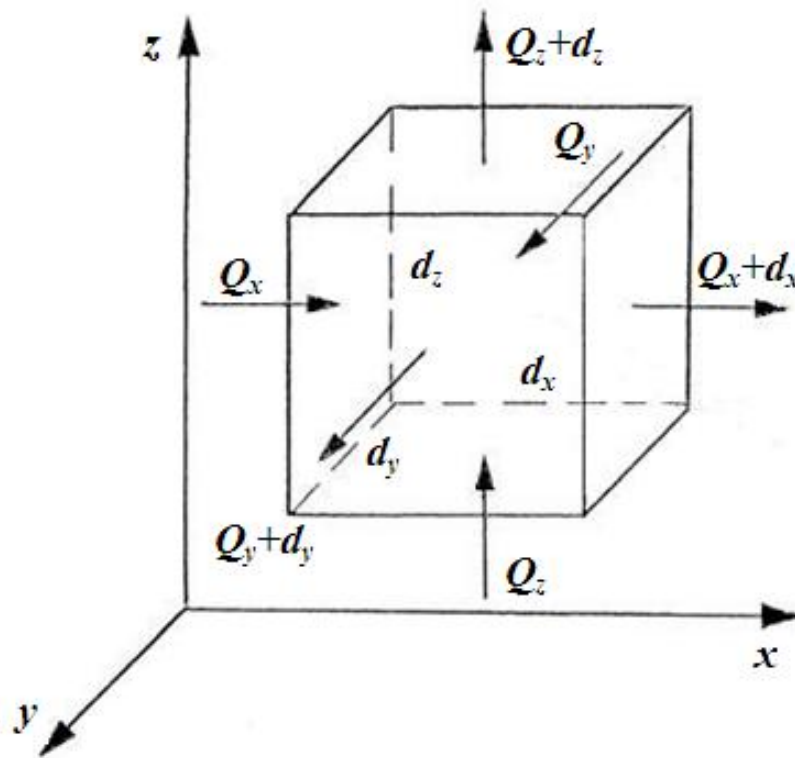


Рис. 2.2 Розрахункова схема виведення диференціального рівняння теплопровідності

Кількість теплоти, що входить до паралелепіпеду через його грані (наприклад $dy \cdot dz$) за проміжок часу dt визначається відповідно до закону Фур'є:

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник. 3-е изд., испр. и доп. М. : Пищевая промышленность, 1976. 663 с.
2. Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник. 3-е изд., испр. и доп. М. : Агропромиздат, 1985. 503 с.
3. Кавецкий Г. Д., Васильев Б. В. Процессы и аппараты пищевой технологи. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Колос, 1999. 551 с.
4. Горбатьюк В. И. Процессы и аппараты пищевых производств : ученик. М. : Колос, 1999. 335 с.
5. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм : учебное пособие. Л. : Колос, 1978. 560 с.
6. Фёдоров Н. Е. Процессы и аппараты мясной промышленности. М. Пищевая промышленность, 1969. 550 с.
7. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками : пер. с польського. Под ред. И. А. Щупляка. М. : Химия, 1975. 384 с.
8. Шалугін В. С., Шмандій В. М. Процеси та апарати промислових технологій : навч. посібник. К. : Центр учбової літератури, 2008. 392 с.
9. Процеси та апарати харчових виробництв : підручник / Поперечний А. М., Черевко О. І., Гаркуша В. Б., Кирпиченко Н. В. ; за ред. А. М. Поперечного. К. : Центр учбової літератури, 2007. 304 с.
10. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва : навч. посіб. / П. С. Берник та ін. Львів : Львівська політехніка, 2004. 336 с.
11. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / В.Г. Мирончук та ін. Вінниця : Нова книга, 2004. 288 с.
12. Остриков А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / А .Н. Остриков и др. Кн. 1. СПб. : Гиорд, 2007. 704 с.
13. Остриков А. Н., Парфенопуло М. Г., Шевцов А. А. Практикум по курсу "Технологическое оборудование" : учеб. пособие для вузов. Воронеж : Воронеж. гос. техн. акад., 1999. 424 с.
14. Малезик І. Ф. Процеси і апарати харчових виробництв : лабораторний практикум. За ред. І. Ф. Малезика. К. : НУХТ, 2006. 224 с.
15. Лабораторний практикум з дисципліни „Процеси і апарати“: Навчальний посібник. / В.Ф. Ялпачик та ін. Мелітополь : Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2017. 275 с.

16. Процеси і апарати харчових виробництв : лабораторний практикум : навч. посібник. / О. І. Черевко та ін. ; Харків : Світ Книг, 2013. 168 с.
17. Гапонов К. П. Процессы и аппараты микробиологических производств М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1981. 240 с.
18. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств / А. С. Гинзбург и др. 3-е изд. перераб. и доп. М. : Агропромиздат, 1990. 256 с.
19. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / І.С. Гулий та ін. / Під ред. І.С. Гулого. К. : 2001. 576с
20. Машины и аппараты пищевых производств. В 2-х кн. Кн. 1 : Учеб. для вузов. / Антипов С.Т. и др.; Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. М. : Высшая школа, 2001. 703 с.
21. Машины и аппараты пищевых производств. В 2-х кн. Кн. 2 : Учеб. для вузов. / Антипов С.Т. и др.; Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. М. : Высшая школа, 2001. 680 с.
22. Лонцин М., Мерсон Р. Основные процессы пищевых производств. Под ред. И.А. Рогова, С.С. Панченко. М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1983. 384 с.
23. Остриков А.Н., Абрамов О.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств. Учебник для вузов, СПб.; ГИОРД, 2003. 352с.
24. Гребенюк С.М., Михеева Н.С. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам М. : Агропромиздат, 1987. 304 с.
25. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии : Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. Часть 2 Массообменные процессы и аппараты. М. : Химия, 1995. 368 с.
26. Даурский А.Н., Мачихин Ю.А., Хамитов Р.И. Обработка пищевых продуктов резанием. Под ред. Ю.А. Мачихина. М. : Пищевая промышленность, 1994. 216 с.
27. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2007. 760 с.

Навчальне видання

Бойко Валентин Семенович
Самойчук Кирило Олегович
Тарасенко Віра Григорівна
Ломейко Олександр Петрович

**ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ
ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ
Теплообмінні процеси**

Підручник для здобувачів вищої освіти
закладів вищої освіти

Підписано до друку 15.06.2020.
Формат 60x84 / 16. Гарн. Таймс. Папір офсетний.
Умов. друк. арк. 15,68. Зам. № 124
Наклад 100 прим.