

Міністерство освіти і науки України



**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет мехатроніки та інжинірингу

**Кафедра обладнання та інжинірингу
переробних і харчових виробництв**

В. М. Михайлов, А. О. Шевченко, С. В. Прасол, О.А. Маяк

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

**Частина 2.
ТЕПЛООБМІННІ ПРОЦЕСИ**

Конспект лекцій

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання
за спеціальністю 181 «Харчові технології»**

**Харків
2024**

Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет мехатроніки та інжинірингу

Кафедра обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв

В. М. Михайлов, А. О. Шевченко, С. В. Прасол, О.А. Маяк

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Частина 2.

ТЕПЛООБМІННІ ПРОЦЕСИ

Конспект лекцій

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання
за спеціальністю 181 «Харчові технології»**

Затверджено
рішенням Науково-методичної комісії
факультету мехатроніки та інжинірингу
Протокол № 5 від 30 квітня 2024 р.

Харків
2024

УДК 641.51/.54(042.4)
П-87

Схвалено
на засіданні кафедри обладнання та інжинірингу
переробних і харчових виробництв
Протокол № 7 від 20 грудня 2023 р.

Рецензенти:

В.О. Потапов, професор кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування Державного біотехнологічного університету, д-р техн. наук, професор;

А.Л. Фоцан, професор кафедри харчових технологій в ресторанній індустрії Державного біотехнологічного університету, д-р техн. наук, доцент

П-87 Процеси і апарати харчових виробництв. У 3 ч. Ч. 2. Теплообмінні процеси [Електронне видання] : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 181 «Харчові технології» / уклад.: В.М. Михайлов, А.О. Шевченко, С.В. Прасол, О.А. Маяк. . – Електрон. дані. – Харків: ДБТУ. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.

Конспект лекцій «Процеси і апарати харчових виробництв» відповідає робочій програмі навчальної дисципліни, призначений для студентів, що навчаються за спеціальністю 181 «Харчові технології» (освітній ступінь – «бакалавр»). Ч. 2 «Теплообмінні процеси» містить 4 лекції. Конспект розкриває основні поняття, класифікацію, моделювання процесів та апаратів харчової галузі, ретельно описуються теплові процеси, що мають важливе значення у виготовленні продукції харчових виробництв. Особлива увага приділяється питанням оптимізації процесів та збереженню енергетичних ресурсів. Наведено основні закономірності перебігу процесів із метою їх прогнозування, а також принципи створення та розрахунків апаратів, у яких ці процеси реалізуються.

Конспект розрахований для використання в навчальному процесі ДБТУ, а також в інших закладах вищої освіти за умов адаптації під конкретний навчальний план. Матеріал може бути корисним для дипломної роботи та широкого кола фахівців, які займаються питаннями процесів і апаратів харчових виробництв.

УДК 641.51/.54(042.4)

Відповідальний за випуск: О.В. Богомолів, завідувач кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, д-р техн. наук, професор

© Михайлов В.М., Шевченко А.О.,
Прасол С.В., Маяк О.А., 2024
© ДБТУ, 2024

ЗМІСТ

Лекція № 6. Основні закономірності теплообміну.....	4
6.1. Завдання та способи теплової обробки харчових продуктів і матеріалів.....	4
6.2. Засоби передавання теплоти та її основні закономірності.....	6
6.3. Нагрівання.....	25
6.4. Охолодження.....	34
6.5. Фізичні основи плавлення та твердіння.....	36
6.6. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів.....	37
Лекція № 7. Теплообмінні апарати.....	45
7.1. Класифікація теплообмінників.....	45
7.2. Конструкції теплообмінників.....	47
7.3. Розрахунок теплообмінників.....	51
Лекція № 8. Теплові процеси зі зміненням агрегатного стану.....	61
8.1. Випаровування.....	61
8.2. Кипіння.....	64
8.3. Випарювання.....	66
8.4. Конденсація.....	76
8.5. Охолодження, заморожування та розморожування.....	81
Лекція № 9. Специфічні теплові процеси.....	97
9.1. Процес варення.....	97
9.2. Смаження.....	112
9.3. Пастеризація.....	124
9.4. Стерилізація.....	132
9.5. Інтенсифікація теплових процесів. Регенерація теплоти.....	140
Контрольні запитання.....	149
Список використаних джерел / Рекомендована література.....	151

ЛЕКЦІЯ № 6 ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ

План

1. Завдання та способи теплової обробки харчових продуктів і матеріалів
2. Засоби передавання теплоти та її основні закономірності
3. Нагрівання
4. Охолодження
5. Фізичні основи плавлення та твердіння
6. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів

6.1. Завдання та способи теплової обробки харчових продуктів і матеріалів

Технологічні процеси, швидкість перебігу яких визначається швидкістю підведення або відведення теплоти, називаються тепловими процесами, а апаратура, що призначена для проведення цих процесів, називається тепловою.

Технологічні процеси виробництва різноманітних харчових продуктів включають низку основних теплових процесів, що є загальними для більшої частини харчових виробництв.

До основних процесів відносяться нагрівання та охолодження, випаровування (у тому числі випарювання) і конденсація, плавлення і твердіння.

Нагрівання – підвищення температури матеріалів, що переробляються шляхом підведення до них теплоти.

Охолодження – зниження температури матеріалів, що переробляються шляхом відведення від них теплоти.

Конденсація – перехід речовини з паро- або газоподібного стану в рідину шляхом відведення від неї теплоти.

Випаровування – перехід рідини в пару шляхом підведення до неї теплоти.

Випарювання – процес концентрування (загущення) розчинів шляхом вилучення з них частини води випаровуванням.

Плавлення – фазовий перехід речовини з твердого стану в рідкий за рахунок підведення до неї теплоти.

Твердіння – перехід речовини з рідкого чи пластичного стану в твердий шляхом відведення теплоти.

Поряд з цими процесами широке розповсюдження мають специфічні теплові процеси, що притаманні низці харчових виробництв, у тому числі й виробництву продукції підприємств ресторанного господарства. До них можна віднести процеси пастеризації, стерилізації, варення, жарення та ін.

У основі всіх теплових процесів лежить зміна теплового стану тіл або середовищ, що беруть участь у цих процесах. Теплова обробка продуктів є основним способом у технологічному процесі виробництва кулінарних виробів.

Нагрівання прискорює хімічні, біохімічні та масообмінні процеси, що відбуваються під час обробки продуктів. Воно викликає зміну фізико-хімічних, структурно-механічних і органолептичних властивостей, що у сукупності визначають ступінь кулінарної готовності продукту. При цьому, наприклад, зменшується механічна міцність рослинних і тваринних продуктів (картоплі, м'яса і т. ін.) за рахунок розпаду вуглеводів, зміни білків сполучної тканини. Теплова обробка продукту шляхом нагрівання має велике санітарно-гігієнічне значення. Під час нагрівання продукту до температури вище 80° С відбувається знищення мікроорганізмів, що містяться у продукті. До позитивних властивостей нагрівання слід віднести руйнування отруйних речовин, що містяться у деяких продуктах (наприклад: картоплі, квасолі).

Охолодження продуктів переслідує дві основні мети. Перша з них полягає в технологічному призначенні. Так охолодження необхідне, наприклад, під час збивання продуктів для одержання піни, кремів, при розкачуванні листового тіста. На заключній стадії технологічного процесу охолодження необхідне під час приготування драглів, желе і багатьох інших кулінарних виробів. Друга мета охолодження пов'язана з санітарно-гігієнічними показниками продукції. Охолодження уповільнює життєдіяльність мікроорганізмів і забезпечує стерильність продукту.

Теплові процеси, що використовуються на підприємствах ресторанного господарства, за прийнятою сьогодні класифікацією можуть бути розподілені на основні, допоміжні та комбіновані. До специфічних основних засобів теплової обробки харчових продуктів відносяться варення і смаження. У свою чергу варення може здійснюватися при атмосферному, надлишковому тиску, під вакуумом і на парі. Процеси смаження продуктів включають обробку в малій кількості жиру, у фритюрі, у жарильних шафах, на відкритому вогні та за допомогою інфрачервоного випромінювання. До допоміжних засобів теплової обробки відносяться процеси пасерування, ошпарювання, опалювання та ін.

Найважливішими параметрами, що зумовлюють кулінарну готовність страви, є температура і час витримки продукту при цій температурі. Співвідношення між цими параметрами повинне бути оптимальним.

Рушійною силою теплових процесів, як вказувалося раніше, є **різниця температур**. Для теплових процесів кінетичне рівняння має вигляд:

$$\frac{dQ}{Sd\tau} = k \Delta t,$$

де Q – кількість теплоти, що передається, Дж; S – поверхня теплообміну, м²; τ – тривалість теплообміну, с; k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); Δt – різниця температур між середовищами, що обмінюються теплотою, °С.

Рушійна сила є основою під час розгляду всіх теплових процесів. При цьому середовище з більш високою температурою, що віддає теплоту, називається гарячим теплоносієм, а середовище з більш низькою температурою, що сприймає теплоту, називається холодним теплоносієм.

Як теплоносії під час нагрівання застосовують насичену водяну пару, гарячу воду і конденсат, гаряче повітря, електричний струм та ін.

У процесах охолодження широко застосовуються такі холодні теплоносії, як холодна вода, лід, розчин солі (розсіл), скраплена вуглекислота, аміак, фреони та ін.

Теплообмін між різноманітними теплоносіями найбільш часто відбувається за таких комбінацій теплових процесів:

- нагрівання холодної рідини за рахунок охолодження гарячої;
- нагрівання рідини за рахунок теплоти конденсації гріючої пари;
- кипіння рідини за рахунок охолодження гарячої рідини;
- кипіння рідини за рахунок теплоти конденсації гріючої пари.

У харчових виробництвах широко застосовується раціональне тепловикористання, коли у ролі гріючого теплоносія використовуються рідкі харчові продукти, вторинні пари і конденсати.

6.2. Засоби передавання теплоти та її основні закономірності

Теплообміном називається самодовільний незворотний процес поширювання теплоти в рідких, твердих і газоподібних середовищах, або переноса теплоти від одного середовища до іншого.

Теплообмін викликається нерівномірністю розподілу температури у даній системі тіл, тобто зумовлений характером її температурного поля.

Є три способи (механізми) теплообміну: **теплопровідність, конвекція і випромінювання.**

Теплопровідність – це процес передачі теплової енергії від більш нагрітої частини тіла до менш нагрітої у результаті безпосередньої взаємодії частинок (молекул, атомів, електронів) у їхньому тепловому русі. Теплопровідність у твердих тілах, рідинах і газах відбувається, відповідно, за рахунок:

- передавання енергії теплових коливань між сусідніми молекулами і атомами; крім того, у металах – за рахунок руху вільних електронів, що має переважний характер;
- обміну енергією сусідніх молекул і дифузії молекул;
- дифузії молекул.

Конвекція – це перенос теплоти шляхом переміщення деяких об'ємів рідини або газу з більш нагрітої області простору в менш нагріту. Таким чином, конвективна теплопередача тісно пов'язана з масовим переносом і супроводжується теплопровідністю між сусідніми макрооб'ємами. Розрізняють природну (вільну) і вимушену конвекцію. Під час природної конвекції переміщення середовища зумовлене меншою густиною більш нагрітих об'ємів та їх підняттям у полі сил тяжіння за законом Архімеда. Якщо переміщення викликається штучно вентилятором, насосом, мішалкою, то така конвекція називається вимушеною. При цьому розповсюдження теплоти, тобто прогрівання

всієї маси рідини (газу), відбувається значно швидше, ніж під час вільної конвекції. Поряд зі змушеним рухом водночас може розвиватися і вільний.

Конвективний перехід теплоти від рідких і газових теплоносіїв до твердих тіл спостерігається під час варення харчових продуктів у водному або паровому середовищі, хлібовипіканні, сушінні та інших процесах.

Теплове випромінювання полягає в емітуванні енергії, що випромінюється тілом і розповсюдженні її в просторі електромагнітними хвилями. При цьому внутрішня енергія тіла перетворюється в енергію електромагнітних хвиль. Кількість енергії, що випромінюється, визначається температурою тіла, станом його поверхні, властивостями тіла. Частина цієї енергії поглинається тілами, розташованими на шляху розповсюдження хвиль, і перетворюється у внутрішню енергію тіла, що поглинається, тобто витрачається на підвищення температури тіла. Якась кількість променевої енергії частково відбивається від поверхні тіла, що її сприймає, а частково проходить крізь тіло.

Практично розповсюдження теплоти відбувається не лише якимось одним із розглянутих способів, а водночас двома, а ще частіше – всіма трьома: **теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням**. Такий процес називається *складним теплообміном*.

Розглянемо кожний із цих трьох способів, а також і об'єднуючий їх складний процес переносу теплоти.

Умовимось у подальшому розрізняти два випадки теплообміну, які найбільш часто зустрічаються в теплотехнічній практиці: тепловіддачу і теплопередачу. Тепловіддачею називається процес теплообміну між твердим тілом (наприклад, стінкою апарата) і рідиною (або газом), що його омиває. Теплообмін між рідинами, газами, між рідиною і газом, розділений твердою стінкою, називається теплопередачею. Кількість теплоти, яка передається через стінку в одиницю часу, називається тепловим потоком (має розмірність потужності, Вт). Тепловий потік, віднесений до одиниці поверхні, називається густиною теплового потоку ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Теплопровідність. *Теплопровідність розглядається як самостійний процес, що може протікати тільки у твердих тілах. У рідинах і газах теплопровідність протікає спільно з конвекцією або випромінюванням.*

Передача теплоти теплопровідністю пов'язана з наявністю різниці температур тіла. Сукупність значень температур всіх точок тіла в даний момент часу називається температурним полем. У загальному випадку рівняння температурного поля має вигляд:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (6.1)$$

де t – температура тіла; x, y, z – координати точки; τ – час.

Таке температурне поле називається нестационарним і відповідає неусталеному режиму теплопровідності. Якщо температура тіла не змінюється протягом часу, то температурне поле називається стаціонарним. Тоді

$$t = f(x, y, z); \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (6.2)$$

Температура може бути функцією однієї, двох і трьох координат, відповідно температурне поле буде одно-, дво-, та тривимірним. Найбільш простий вигляд має рівняння одновимірного стаціонарного температурного поля:

$$t = f(x); \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0.$$

Якщо з'єднати всі точки тіла з однаковою температурою, то отримаємо поверхню рівних температур, яка називається ізотермічною. Перетин ізотермічних поверхонь площиною дасть на ній родину ліній постійної температури, які називаються ізотермами (рис. 6.1). Температура у просторі змінюється від однієї ізотермічної поверхні до іншої. При цьому зміна температури іде найбільш інтенсивно у напрямку нормалі.

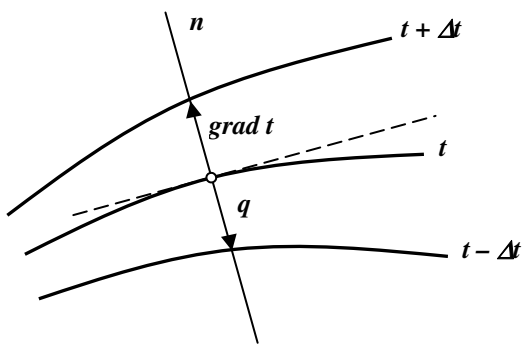


Рисунок 6.1 – Родина ізотерм

Похідна зміни температури по нормалі називається температурним градієнтом, він направлений за нормаллю до ізотермічної поверхні у бік зростання температури.

$$\lim \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t. \quad (6.3)$$

Розмірність градієнта температури – (К/м).

Розглянемо процес передавання теплоти теплопровідністю в твердій стінці. Обов'язковою умовою здійснення такого процесу є різниця температур поверхонь стінки. У цьому випадку в ній утвориться потік теплоти, направлений від поверхні стінки з більшою температурою до поверхні стінки з меншою температурою.

Якщо тепловий потік не змінюється в часі та якщо при цьому залишаються постійними температури поверхонь стінки, то такий процес називається усталеним. За основним законом теплопровідності – законом Фур'є – кількість теплоти, що проходить через елемент ізотермічної поверхні в одиницю часу, пропорційна градієнту температури, тобто

$$dQ = - \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) dS d\tau, \quad (6.4)$$

де Q – кількість теплоти, що передається, Дж; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)$ – градієнт температури; S – поверхня теплообміну, м²; τ – час, с.

Негативний знак у правій частині рівняння (5.4) відображує передавання теплоти в напрямку зменшення температури. Коефіцієнт теплопровідності показує, яку кількість теплоти передано за 1 с через 1 м² поверхні тіла при

градієнті температури 1°C на 1 м довжини нормалі до ізотермічної поверхні. Його величина характеризує спроможність тіла проводити теплоту і залежить від природи тіла, його структури, температури, тиску і деяких інших чинників. Значення коефіцієнта теплопровідності для більшої частини твердих харчових продуктів (м'яса, риби, картоплі, моркви) дуже мале ($\sim 0,6\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), для рідких харчових жирів і масел не перевищує $0,18\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Коефіцієнти теплопровідності твердих тіл (окрім чистих металів) і газів із підвищенням температури збільшуються, а у рідині (окрім води і гліцерину) – зменшуються.

У табл. 5.1 наведено граничні значення коефіцієнтів теплопровідності газів, рідини і твердих матеріалів.

Таблиця 6.1

Коефіцієнти теплопровідності, λ , Вт/(м·К)

Матеріал	Газ	Рідина	Тверде тіло: метал	Ізоляційний матеріал
λ , Вт/(м·К)	0,006...0,18	0,1...0,7	2,4...430	0,01...0,2

Процеси теплообміну між рідиною, газами і паром у теплових апаратах харчових виробництв протікають найчастіше через плоскі, циліндричні та сферичні стінки, що їх розділяють. Товщина останніх часто дуже мала порівняно з їхньою довжиною вздовж осей Y і Z , тому температурне поле у таких стінках можна з достатньою точністю вважати одновимірним (температура змінюється лише вздовж осі X). Для однорідної плоскої одношарової стінки (рис. 6.2) на основі рівняння (6.4) можна записати:

$$dQ = \frac{-\lambda dS d\tau (t_2 - t_1)}{\delta}, \quad (6.5)$$

де t_1 – температура стінки з боку входу теплового потоку, $^{\circ}\text{C}$; t_2 – температура стінки з боку виходу теплового потоку, $^{\circ}\text{C}$; δ – товщина стінки, м.

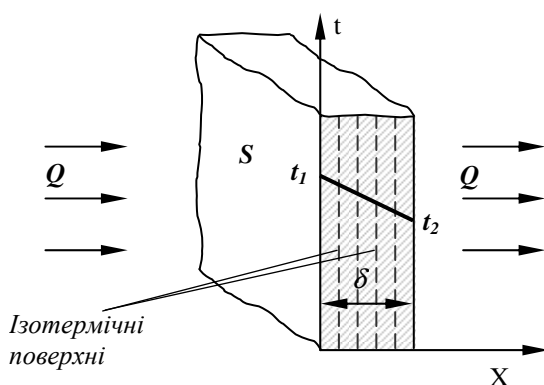


Рисунок 6.2 – Схема передачі теплоти теплопровідністю через плоску однорідну стінку

Інтегрування виразу (5.5) дозволяє отримати рівняння перенесення теплоти теплопровідністю плоскою однорідною стінкою:

$$Q = \frac{\lambda (t_1 - t_2) S \tau}{\delta}. \quad (6.6)$$

Відношення коефіцієнта теплопровідності стінки до її товщини λ/δ називають тепловою провідністю стінки, зворотну їй величину $R = \delta/\lambda$ – тепловим опором теплопровідності.

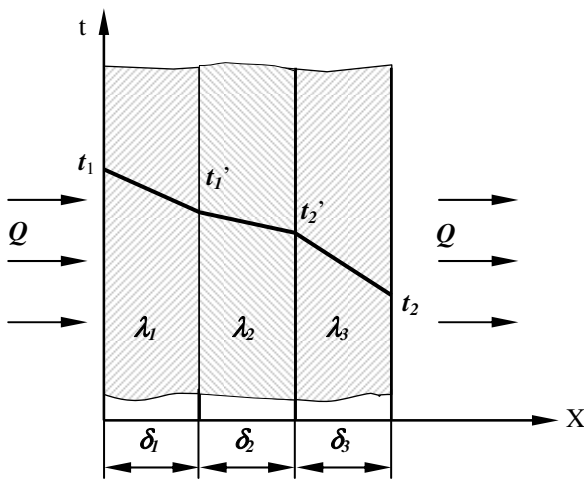
Поверхня нагріву теплообмінної апаратури харчових виробництв і підприємств ресторанного господарства часто покривається накипом, шарами

пригорілих продуктів, корозії, продуктів згоряння палива і т. ін. У зв'язку з цим під час розрахунку кількості теплоти, що передається в теплообмінних апаратах розглядають теплопровідність не одношарової, а багатошарової стінки (рис. 6.3). Не викликає труднощів отримати розрахункову формулу для визначення кількості теплоти, що передається через багатошарову стінку за рахунок її теплопровідності:

$$Q = \frac{S \tau (t_1 - t_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (6.7)$$

Для одношарової циліндричної стінки теплопровідність описується рівнянням

$$Q = \frac{\lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}} 2\pi l (t_1 - t_2) \tau, \quad (6.8)$$



де r_1 – внутрішній радіус циліндра, м;
 r_2 – зовнішній радіус циліндра, м;
 l – довжина стінки, м.

Вище було розглянуто умови розповсюдження теплоти теплопровідністю для стаціонарного температурного поля. Теплова обробка твердих харчових продуктів частіше за все пов'язана зі зміною температурного поля не лише в просторі, але й в часі:

$$Q = f(x, y, z, \tau).$$

Рисунок 6.3 – Схема передавання теплоти теплопровідністю через плоску багатошарову стінку

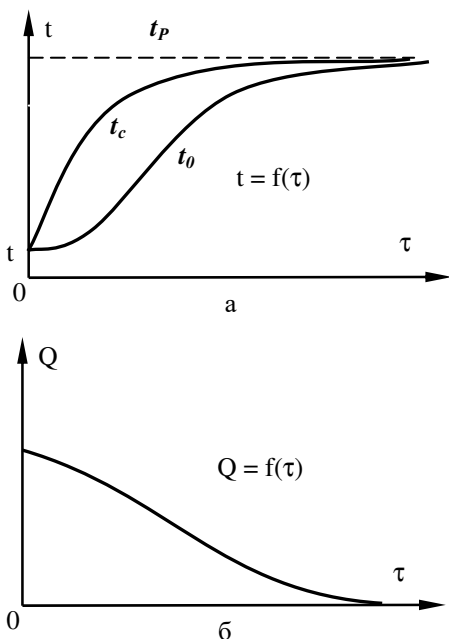


Рисунок 6.4 – Нестационарна теплопровідність

Нестационарність теплових процесів зумовлюється зміною ентальпії твердих тіл і завжди пов'язана з явищами їх нагрівання або охолодження за безпосереднього контакту з гарячими або холодними потоками рідин або газів. Приклади нестационарних теплових процесів: випічка хлібобулочних виробів у шафах та хлібопекарних печах, варіння овочів, м'ясних та інших продуктів у рідинному або паровому середовищі і т.ін. При внесенні тіла у середовище з більш високою температурою, між середовищем і тілом виникає процес теплообміну, і тіло починає прогріватися. Про характер зміни температури тіла за час прогрівання дають уявлення криві на рис. 6.4 а, де t_p – температура середовища, що нагріває, t – початкова температура, t_c – температура на

поверхні тіла і t_0 – температура у центрі тіла.

Про характер зміни інтенсивності передавання теплоти дає уявлення крива на рис. 6.4 б.

В інженерній практиці задача нестационарної теплопровідності – знаходження залежності зміни температури і кількості переданої теплоти у часі для будь-якої точки твердого тіла. Ця задача сьогодні розв’язується за допомогою електронно-обчислювальних машин при використанні критеріальних залежностей

$$\frac{t}{t_1} = f_t(Bi, Fo) \text{ і } \frac{Q}{Q_1} = f_Q(Bi, Fo), \quad (6.9)$$

де $\frac{t}{t_1}$ – безрозмірна температура; $\frac{Q}{Q_1}$ – безрозмірна теплота; Bi – критерій Біо; Fo – критерій Фур’є.

Розв’язання задач нестационарної теплопровідності викладається у спеціальних курсах теплопередачі.

Конвекція. Перенесення теплоти конвекцією відбувається, якщо стінка сприймає або віддає теплоту, контактуючи з рухомими частинками рідини.

Під час протікання потоку рідини у трубах і каналах або під час зовнішнього обтікання тіл у безпосередній близькості від твердої поверхні утворюється особлива зона – пограничний шар, що відіграє надзвичайно важливу роль у процесі конвективного теплообміну. Частинки рідини, які знаходяться в безпосередній близькості від поверхні, немов би «прилипають» до неї, і швидкість потоку в точці, що знаходиться на поверхні стінки, дорівнює нулю. Гальмуюча дія поверхні на потік розповсюджується на деяку відстань δ від поверхні внаслідок в’язкого тертя в рідині.

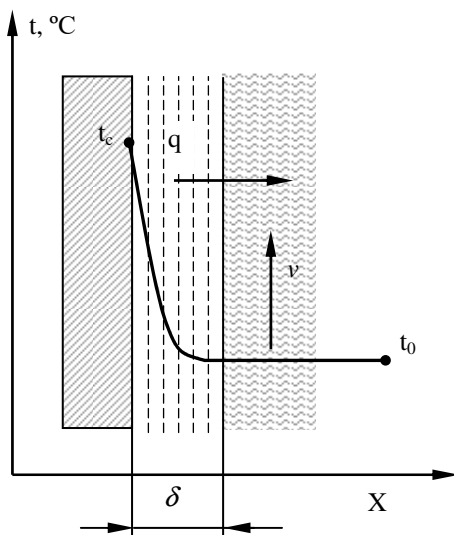


Рисунок 6.5 – Характер зміни температури у разі конвективного теплообміну

Зона гальмування потоку називається динамічним ламінарним пограничним шаром; у ньому зосереджено основну частину перепаду температур між поверхнею і ядром потоку, а теплота передається теплопровідністю. За межами пограничного шару відбувається інтенсивне вирівнювання температури рідини за рахунок турбулентного її перемішування.

На рис. 6.5 показано характер зміни температур у рухомому середовищі у разі конвективного теплообміну. Найбільші градієнти температур спостерігаються в пограничному шарі, термічний опір якого, в основному, визначає інтенсивність тепловіддачі.

Згідно із законом Ньютона-Ріхмана кількість теплоти, відданої стінкою рідині або прийнятою від рідини, прямо пропорційна

поверхні стінки, часу та різниці температур поверхні стінки і рідини (або навпаки)

$$\begin{aligned}dQ &= \alpha S (t_c - t_0) d\tau \\dQ &= \alpha S (t_0 - t_c) d\tau\end{aligned}\tag{6.10}$$

де Q – теплота, що передана конвекцією, Дж; S – поверхня стінки, м^2 ; τ – час, с; t_c – температура стінки, $^{\circ}\text{C}$; t_0 – температура рідини, $^{\circ}\text{C}$; α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від стінки до рідини або від рідини до стінки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Коефіцієнт тепловіддачі показує, яка кількість теплоти передається від теплообмінної поверхні в 1 м^2 до потоку рідини, яка її обмиває, (або від цього потоку до поверхні теплообміну) протягом одиниці часу при різниці температур поверхні теплообміну і ядра потоку в 1 К .

Якщо $\alpha = \text{const}$, то рівняння (6.10) набуває вигляду

$$\begin{aligned}Q &= \alpha S (t_c - t_0) \tau, \\Q &= \alpha S (t_0 - t_c) \tau.\end{aligned}\tag{6.11}$$

Значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією залежить від багатьох чинників: режиму руху рідини, характеру сил, що спричиняють її рух, фізичних параметрів рідини, форми і розміру поверхні теплообміну та ін. Визначення коефіцієнта тепловіддачі теоретичним шляхом надто важке, а у більшості випадків навіть неможливе з-за великої кількості цих чинників. Тому коефіцієнт тепловіддачі конвекцією визначається за критеріальними рівняннями, які отримують засобами теорії подібності з диференціального рівняння конвективного теплообміну, доповненого рівняннями, що характеризують умови на межі розділу потоку рідини і стінки апарата.

Основні критерії теплової подібності, що характеризують процес тепловіддачі, такі: Нуссельта (Nu), Фур'є (Fo), Пекле (Pe), Прандтля (Pr), Біо (Bi).

Критерій Нуссельта характеризує інтенсивність теплообміну на межі між стінкою і потоком рідини:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; l – лінійний розмір, м; λ – коефіцієнт теплопровідності рідини, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Критерій Фур'є характеризує зв'язок між швидкістю зміни температурного поля, розмірами і фізичними характеристиками середовища в нестационарних теплових процесах:

$$Fo = \frac{a \tau}{l^2},$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – час, с.

Критерій Пекле характеризує відношення кількості теплоти, що розповсюджується в потоці рідини конвекцією та теплопровідністю:

$$Pe = \frac{vl}{a},$$

де v – швидкість руху середовища, що бере участь у теплообміні, м/с.

Критерій Прандтля (1.40) характеризує фізичні властивості рідини і може бути представлений комплексами таких величин:

$$Pr = \frac{\vartheta}{a} = \frac{\eta \cdot c}{\lambda},$$

де ϑ – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с; η – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па·с; c – масова теплоємність рідини, Дж/(кг·К).

Критерій Біо (разом із критерієм Фур'є) характеризує нестационарні процеси розповсюдження теплоти. Фізичний сенс критерію Біо полягає у встановленні співвідношення між інтенсивностями тепловіддачі з поверхні тіла і підведення теплоти теплопровідністю з внутрішніх шарів тіла до поверхні:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_{cm}},$$

де λ_{cm} – теплопровідність стінки, Вт/(м·К).

За зовнішнім виглядом критерій Біо співпадає з критерієм Нуссельта, але між ними існує принципова відмінність. У критерій Біо входить теплопровідність стінки, а в критерій Нуссельта – теплопровідність середовища, яке омиває стінку.

Окрім критеріїв теплової подібності для аналізу теплообмінних процесів важливе значення мають критерії гідродинамічної подібності – Рейнольдса (Re), Галілея (Ga), Архімеда (Ar), Грасгофа (Gr).

Критерій Рейнольдса характеризує режим руху теплоносія:

$$Re = \frac{vl\rho}{\eta}.$$

Критерій Галілея характеризує вплив в'язкості теплоносія на теплообмін:

$$Ga = \frac{gl^3}{\vartheta^2},$$

де g – прискорення сили падання, м/с².

Критерій Архімеда характеризує рух рідини внаслідок різниці густини у різноманітних її шарах:

$$Ar = \frac{gl^3(\rho_0 - \rho)}{\vartheta^2 \rho},$$

де ρ_0, ρ – густина рідини в двох її різноманітних точках, кг/м³.

Критерій Грасгофа характеризує гідродинамічний режим потоку рідини в умовах природної конвекції, що відбувається під впливом різниці густини нагрітої та холодної рідини:

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2},$$

де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини, 1/К; Δt – різниця температур, відповідна різниці густини, К.

Критерій фазового перетворення (критерій Кутателадзе) характеризує відносну модифікацію кількості рідини, що протікає внаслідок зміни агрегатного стану на межі розділу фаз:

$$Ku = \frac{r}{c \cdot \Delta t},$$

де r – теплота пароутворення (конденсації), Дж/кг; c – масова теплоємність рідини, Дж/(кг·К); Δt – різниця температур насичення і поверхні стінки, К.

З наведених критеріїв подібності тільки критерій Нуссельта містить шуканий коефіцієнт тепловіддачі, тому він і є визначальним критерієм подібності. Решта критеріїв на відміну від нього називаються визначними.

Загальний вигляд критеріального рівняння тепловіддачі під час конвективного теплообміну:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo\dots). \quad (6.12)$$

Звичайно його записують у вигляді ступеневої функції

$$Nu = a Re^n Gr^m Pr^k Fo^l, \quad (6.13)$$

де a, m, n, k, l – постійні, що визначаються експериментальним шляхом.

Відповідно до конкретних умов процесу, залежність (6.13) спрощується, тому що деякі з цих критеріїв не є визначальними для процесу, що вивчається. Обчисливши значення визначних критеріїв, знаходять значення критерію Нуссельта Nu , а після цього з нього a – коефіцієнт тепловіддачі:

$$a = \frac{Nu \cdot l}{\lambda}. \quad (6.14)$$

Під час рішення критеріальних рівнянь слід звертати увагу на температуру та визначальний геометричний розмір. Визначальною температурою називається температура, за якої визначають значення фізичних параметрів середовища, що входять до критерію подібності, визначальним розміром – характерний лінійний розмір l , яким визначається розвиток процесу.

З конвективного теплообміну проведено дуже багато досліджень, на основі яких сьогодні є можливим визначити значення коефіцієнтів тепловіддачі для всіх основних випадків теплообміну. Розглянемо основні математичні залежності в процесах конвективного теплообміну.

А. Тепловіддача без змінення агрегатного стану потоку

1. Тепловіддача під час вільної конвекції рідини описується критеріальним рівнянням

$$Nu = C (Pr \cdot Gr)^n, \quad (6.15)$$

у якому числові значення C і n обираються залежно від режиму руху рідини, тобто від добутку $Gr \cdot Pr$:

Режим	$Gr \cdot Pr$	C	n
Ламінарний	$< 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Перехідний	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентний	$> 2 \cdot 10^7$	0,135	0,33

Визначальною температурою в критеріях є середня температура межового шару $t = 0,5(t_c + t_0)$, а різниця температур $\Delta t = t_c - t_0$.

2. Під час вимушеної конвекції тепловіддача залежить, у першу чергу, від характеру руху рідини і визначається такими рівняннями:

а) під час руху потоку в трубі для $Re < 2300$ (ламінарний рух)

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^{0,25}; \quad (6.16)$$

б) під час руху потоку в трубі для $Re > 10000$ (турбулентний рух)

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^{0,25}; \quad (6.17)$$

в) під час поперечного обтікання одинокої труби для $Re < 1000$

$$Nu = 0,56 Re^{0,5} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^{0,25}; \quad (6.18)$$

для $Re > 1000$

$$Nu = 0,28 Re^{0,6} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^{0,25}. \quad (6.19)$$

У наведених рівняннях Pr_0 – критерій Прандтля для пограничного шару. Фізичні властивості рідини враховують за її середньої температури.

3. Критеріальне рівняння конвективного теплообміну в кільцевих каналах може бути наведене таким чином:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{D_6}{D_3} \right)^{0,45}, \quad (6.20)$$

де D_6 – внутрішній діаметр зовнішньої труби, м; D_3 – зовнішній діаметр внутрішньої труби, м.

4. Для теплообмінних процесів, що протікають у апаратах підприємств ресторанного господарства, певне значення має теплообмін під час перемішування системи, що нагрівається. У цьому випадку загальне критеріальне рівняння набуває такого вигляду:

$$Nu = C Re_m^n Pr^m \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_c} \right)^a, \quad (6.21)$$

де C – коефіцієнт пропорційності; Re_m – модифікований критерій Рейнольдса для перемішування; ϑ – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини за середньої температури рідини і стінки, m^2/c ; ϑ_c – те ж за температури стінки, m^2/c . Значення C , n , m та a залежать від конструкції апарата і виду мішалки. Так, для оболонкового апарата, обладнаного лопатевою мішалкою, $C = 1,01$; $n = 0,3$; $m = 0,67$; $a = 0,14$.

5. Тепловіддача під час плівкової течії рідини по різноманітних поверхнях залежить від товщини плівки, що в свою чергу є функцією фізичних властивостей рідини і режиму течії плівки.

Під час ламінарної плівкової течії рідини ($Re < 2300$)

$$Nu = 0,67 Re^{0,11} Pr^{0,33} \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,33}, \quad (6.22)$$

де δ – товщина плівки, м; h – висота вертикальної поверхні, м.

Під час турбулентного режиму течії плівки по вертикальній стінці

$$Nu = 0,11 Re^{0,33} Pr^{0,33}. \quad (6.23)$$

Під час турбулентного режиму течії плівки для горизонтальних труб

$$Nu = 0,005 Re^{0,33} Pr^{0,33}. \quad (6.24)$$

Б. Тепловіддача під час змінювання агрегатного стану потоку

Зміна агрегатного стану відбувається під час конденсації пари, кипіння рідини, заморожування та розморожування, плавлення та затвердіння матеріалу. Особливість таких процесів теплообміну полягає у тому, що теплота підводиться до матеріалів або відводиться від них за постійної температури та розповсюджується не в одній, а у двох фазах. З різноманітних випадків тепловіддачі під час змінювання агрегатного стану найбільше значення для процесів харчової технології мають тепловіддача під час конденсації пари і під час кипіння рідини.

Оскільки теплові процеси, що пов'язані зі зміною агрегатного стану, буде розглянуто дещо пізніше, наведемо лише рівняння для обчислення коефіцієнтів тепловіддачі.

1. Плівкова конденсація пари під час ламінарного стікання плівки описується узагальненим рівнянням

$$Nu = C (Pr \cdot Ga \cdot Ku)^{0,25}, \quad (6.25)$$

де C – коефіцієнт, що залежить від виду поверхні, на якій відбувається конденсація. Для вертикальних стінок і труб $C = 0,943$, для горизонтальних труб $C = 0,728$.

Рішення рівняння (6.25) відносно коефіцієнта тепловіддачі буде мати такий вигляд:

а) під час конденсації пари на поверхні пучка вертикальних труб або стінки висотою H

$$\alpha = 1,15 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 g r}{\eta \cdot \Delta t \cdot H}}, \quad (6.26)$$

де r – теплота конденсації, Дж/кг; ρ – густина конденсату, кг/м³; λ – теплопровідність конденсату, Вт/(м·К); η – динамічний коефіцієнт в'язкості конденсату, Па·С; Δt – різниця між температурами насичення і стінки, К; H – висота вертикальної труби або стінки, м. Параметри конденсату приймаються за середньої температури плівки конденсату;

б) під час конденсації пари на зовнішній поверхні одинокої горизонтальної труби діаметром d

$$\alpha = 0,728 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 g r}{\eta \Delta t d}}. \quad (6.27)$$

2. Бульбашковий режим кипіння рідини можна описати узагальненим рівнянням

$$Nu = C Re^n Pr^m. \quad (6.28)$$

В області $10^{-2} < Re < 10^4$ рівняння (6.28) набуває вигляду

$$Nu = 0,125 Re^{0,66} Pr^{0,33}. \quad (6.29)$$

Для води під час кипіння за умов природної конвекції можна використати формулу

$$\alpha = 6,87 q^{0,7} p^{0,4}, \quad (6.30)$$

де p – тиск, МПа; $q = Q/S$ – питоме теплове навантаження, Вт/м².

Наведемо орієнтовні значення коефіцієнтів тепловіддачі для найбільш розповсюджених процесів теплообміну (табл. 6.2).

Таблиця 6.2

Орієнтовні значення коефіцієнтів тепловіддачі

ВИД ТЕПЛОВІДДАЧІ	Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м ² ·К)
Нагрівання і охолодження газів ($P_{абс} \approx 0,1$ МПа)	10...50
Нагрівання і охолодження води режим потоку – ламінарний	100...350
режим потоку – турбулентний	350...2500
Кипіння води	500...10000
Конденсація водяної пари	4000...15000
Нагрівання і охолодження мінеральних масел	60...200
Нагрівання і охолодження органічних рідин (даутерма)	1400...1700

Променевий теплообмін

Випромінювання – це процес переносу енергії шляхом електромагнітних хвиль від випромінюючого тіла, до тіл, розташованих у навколишньому просторі. Теплова енергія переноситься у найбільшому ступені інфрачервоним промінням при довжинах хвиль 0,8...800 мкм. Інтенсивність випромінювання тіла залежить від його фізичної природи, стану поверхні та температури нагрівання. Властивості інфрачервоного випромінювання: прямолінійне розповсюдження, спроможність поглинатися, відбиватися або заломлюватися під час зустрічі з будь-якими тілами. Поглинута променева енергія перетворюється у теплову, що може підвищити температуру тіла і посилити його власне випромінювання. Відбита або та, що пройшла через тіло, енергія може поглинатися іншими тілами. При цьому (рис. 6.6) загальний потік променевої енергії, що падає на поверхню тіла Q , частково відбивається Q_R , частково поглинається Q_A і частково проходить крізь тіло Q_D , тобто:

$$Q = Q_R + Q_A + Q_D. \quad (6.31)$$

Поділивши праву і ліву частини рівняння (6.31) на Q отримаємо

$$\frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = 1,$$

$$\text{відношення } \frac{Q_A}{Q} = A; \frac{Q_R}{Q} = R; \frac{Q_D}{Q} = D,$$

характеризують відповідно поглинальну, відбивну і пропускальну спроможність тіла:

$$A + R + D = 1. \quad (6.32)$$

Тіло, яке відбиває повністю всі промені, що на нього падають ($R = 1, A = 0, D = 0$) називається абсолютно білим. Якщо вся променева енергія, що падає на тіло ним поглинається і перетворюється у теплову, то таке тіло називається абсолютно чорним ($A = 1, R = 0, D = 0$). Нарешті, тіло називається прозорим або діатермічним, якщо воно пропускає всю променеву енергію, що на нього падає, не поглинаючи її та не відбиваючи ($R = 0, A = 0, D = 1$). У природі не існує абсолютно чорних, абсолютно білих і діатермічних тіл; реальні тіла в різному ступені поглинають, відбивають і пропускають крізь себе променеву енергію і в силу цього називаються сірими.

Випромінювання тіл підкоряється закону Стефана-Больцмана: густина теплового потоку випромінювання тіла дорівнює добутку коефіцієнта випромінювання C на його абсолютну температуру T у четвертому степені:

$$q_l = C \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (6.33)$$

Найбільше значення коефіцієнт випромінювання має для абсолютно чорного тіла $C = C_0 = 5,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Для сірих тіл вводять коефіцієнт ступеня чорноти тіла $\varepsilon = C/C_0$. Тоді закон Стефана-Больцмана запишеться у вигляді:

$$q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon q_0, \quad (6.34)$$

де q_0 – густина потоку теплового випромінювання абсолютно чорного тіла.

Для абсолютно чорного тіла $\varepsilon = 1$, для деяких сірих тіл ε має такі значення: чавун – 0,96; сталь – 0,82; алюміній – 0,15; скло – 0,9; фарба масляна – 0,94.

Відзначимо, що найменші значення ε характерні для чистих поверхонь кольорових металів, у чорних металів вони дещо більші. Значне підвищення ступеня чорноти відбувається під час окислення металів.

Співвідношення між випромінювальною і поглинальною спроможністю тіл встановлюється законом Кірхгофа. За цим законом відношення коефіцієнта випромінювання тіла до його коефіцієнта поглинання однакове для поверхонь усіх сірих тіл, що мають одну і ту ж температуру, і дорівнює коефіцієнту випромінювання чорного тіла за тією ж температурою.

Це означає, якщо тіло володіє малим коефіцієнтом поглинання, то воно володіє і малим коефіцієнтом випромінювання. Чорне тіло, що має максимальний коефіцієнт поглинання $A = 1$, володіє і максимальним коефіцієнтом випромінювання. Біле тіло, у якого коефіцієнт поглинання $A = 0$, не здатне випромінювати енергію. Із закону Кірхгофа випливає, що коефіцієнт чорноти сірого тіла ε за однієї й тієї ж температури дорівнює коефіцієнту поглинання A :

$$\varepsilon = A.$$

Процес обміну променевою енергією між тілами називається променевим теплообміном. Природно, що менш нагріте тіло одержує теплову енергію випромінювання від більш нагрітого тіла. Найпростіший випадок променевого теплообміну – це теплообмін між двома паралельно розташованими плоскими тілами. Співвідношення для розрахунку променевого теплообміну для цього випадку записується у такому вигляді:

$$Q_{1-2} = C_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S \tau, \quad (6.35)$$

де Q_{1-2} – кількість теплоти, що передається випромінюванням тіла 1 тілу 2; $S = S_1 = S_2$ – випромінююча поверхня тіл; T_1, T_2 – абсолютні температури тіл; C_{1-2} – наведений коефіцієнт випромінювання системи тіл, який дорівнює:

$$C_{1-2} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0} \right)^{-1}, \quad (6.36)$$

де C_1, C_2 , і C_0 – коефіцієнти випромінювання першого, другого та абсолютно чорного тіла.

Для випадку променевого теплообміну між двома тілами, одне з яких повністю охоплює інше, застосуємо розрахункове співвідношення (6.35), в якому $S_2 > S_1$, а наведений коефіцієнт випромінювання має значення:

$$C_{1-2} = \left[\frac{1}{C_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right) \right]^{-1}, \quad (6.37)$$

де S_1, S_2 – площі поверхонь охоплюваного і охоплюючого тіл.

Для деяких практичних завдань, що пов'язані з променевим теплообміном у газовому середовищі, за аналогією з конвективною тепловіддачею введено поняття про коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

Теплоту, що передана поверхнею стінки газовому середовищі у вигляді променевої енергії, можна також виразити через коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням α_r

$$Q_A = \alpha_r S (t_1 - t_2) \tau = C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S \tau. \quad (6.38)$$

Тоді коефіцієнт тепловіддачі α_r буде дорівнювати:

$$\alpha_r = \frac{C}{t_1 - t_2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (6.39)$$

Складний теплообмін

У теплових процесах променевий теплообмін часто супроводжується конвективним рухом середовища відносно тепловипромінюваної поверхні. Одночасна передача теплоти шляхом конвективного і променевого теплообміну називається конвективно-променевим теплообміном. Наприклад, конвективно-променевим теплообміном здійснюється тепловіддача від стінок теплообмінних апаратів у доквілля. Обидва ці процеси не впливають один на одного, тому результуючий коефіцієнт тепловіддачі дорівнює сумі:

$$\alpha_\Sigma = \alpha + \alpha_r. \quad (6.40)$$

Цей коефіцієнт показує, яка кількість теплоти переходить у доквілля за рахунок радіації та конвекції з 1 м^2 поверхні стінки апарату в 1 с з різницею температур між стінкою і доквіллям (повітрям), що дорівнює 1 К .

Відзначимо, що коефіцієнт тепловіддачі конвекцією відносно мало залежить від температури теплоносія, в той час як коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, а отже, і сумарний коефіцієнт тепловіддачі істотно залежать від температури, що необхідно мати на увазі під час розрахунків конвективно-променевого теплообміну.

Під час розв'язування поодиноких задач для випадку тепловіддачі в закритих приміщеннях за температури стінки до 150° С сумарний коефіцієнт тепловіддачі може бути визначений за формулою:

$$\alpha_\Sigma = 9,74 + 0,07 (t_1 - t_2). \quad (6.41)$$

Теплообмін через розділову стінку (теплопередача)

У теплообмінних апаратах теплота передається від однієї рідини до іншої здебільшого через стінку, що їх розділяє. Такий теплообмін називається теплопередачею. Теплопередача може здійснюватися за усталених процесів (безперервних) і таких, що не встановилися (періодичних). Усталений тепловий процес характеризується тим, що температура і кількість теплоти в кожній точці теплоносіїв з часом не змінюються, а під час неусталеного процесу ці параметри безперервно змінюються в кожній точці обох теплоносіїв.

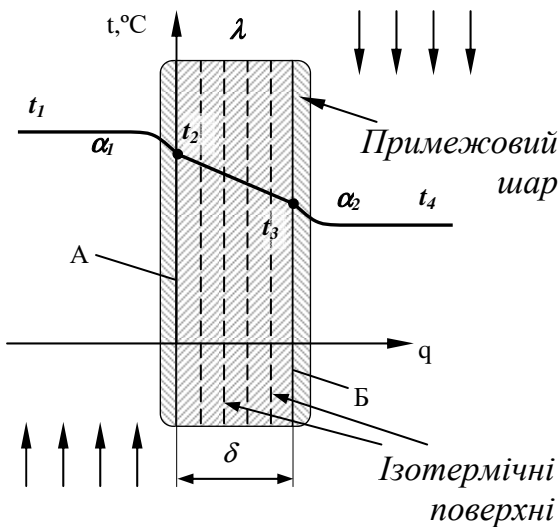


Рисунок 6.7 – Схема теплопередачі через плоску стінку

Розглянемо теплопередачу через плоску одношарову стінку, по один бік якої знаходиться гаряча вода, а по інший – повітря (рис. 6.7). Нехай температура рідини, що нагріває, t_1 , а температура повітря, що нагрівається, t_4 ($t_1 > t_4$). Процес передавання теплоти складається з процесу тепловіддачі від рідини, що нагріває до поверхні А стінки, передавання теплоти теплопровідністю крізь стінку і процесу тепловіддачі від поверхні Б стінки до повітря, що нагрівається. Слід врахувати, що від поверхні Б стінки теплота до повітря передається за рахунок випромінювання і конвекції. В усталеному процесі

теплопередачі тепловий потік в усіх зазначених етапах один і той же. Напишемо рівняння теплообміну для випадку теплопередачі, який розглядається.

1. Рівняння тепловіддачі від рідини, що нагріває до поверхні стінки:

$$Q = \alpha_1 S (t_1 - t_2) \tau, \quad (6.42)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від рідини, що нагрівається до стінки, Вт/(м²·К); t_1 – температура рідини, що нагріває, °С; t_2 – температура поверхні стінки з боку рідини, що нагріває, °С.

2. Рівняння теплопровідності через стінку:

$$Q = \frac{\lambda S (t_2 - t_3) \tau}{\delta}, \quad (6.43)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·К); δ – товщина стінки, м; t_3 – температура поверхні стінки з боку середовища, що нагрівається (повітря), °С.

3. Рівняння тепловіддачі від поверхні стінки до середовища, що нагрівається (повітря):

$$Q = \alpha_2 S (t_3 - t_4) \tau, \quad (6.44)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні стінки до середовища, що нагрівається (повітря), Вт/(м²·К); t_4 – температура середовища, що нагрівається, °С.

Розв'язуючи рівняння (6.42), (6.43) і (6.44) відносно температурного напору (різниці температур між рідиною і повітрям), отримаємо (опускаючи деякі прості перетворення) рівняння теплообміну потоку, що називається основним рівнянням теплопередачі:

$$Q = K S (t_1 - t_4) \tau = K S \Delta t_{сер. \tau}, \quad (6.45)$$

де Q – кількість теплоти, яку передано від більш нагрітого теплоносія (гарячої води) до менш нагрітого (повітря), Дж; $\Delta t_{сер.}$ – середня різниця температур між теплоносіями, °С; K – коефіцієнт теплопередачі, що дорівнює:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)}. \quad (6.46)$$

Величина $1/K$ називається термічним опором теплопередачі:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (6.47)$$

Величини $\frac{1}{\alpha_1}$ і $\frac{1}{\alpha_2}$ називаються термічними опорами тепловіддачі.

Величина $\frac{\delta}{\lambda}$ як було вже раніше відзначено – термічний опір теплопровідності стінки.

З рівняння теплопередачі виходить, що чим більше величина K , тим інтенсивніший теплообмін, тобто більша кількість теплоти перейде від одного теплоносія до іншого через стінку, що їх розділяє в одиницю часу. У свою чергу, коефіцієнт теплопередачі K залежить від величини коефіцієнтів тепловіддачі α_1 і α_2 . Чим вище α_1 і α_2 , тим вище K . Отже, для інтенсифікації процесу теплообміну потрібно збільшувати коефіцієнти тепловіддачі α_1 і α_2 .

Термічний опір чистої металевої стінки надто незначний і не виявляє помітного впливу на значення коефіцієнта теплопередачі K . Тому, за умови чистої та тонкої металевої стінки обчислення коефіцієнта теплопередачі можна здійснити за формулою:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (6.48)$$

У випадку багат шарової стінки замість δ/λ підставляється сума термічних опорів кожного шару стінки. Тоді:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}\right)}, \quad (6.49)$$

де n – кількість шарів стінки; i – порядковий номер шару.

У більшості теплообмінних апаратів потік теплоти проходить через стінки круглих трубок. Величина K , що називається, в даному випадку, лінійним коефіцієнтом теплопередачі визначається за формулою:

$$K_l = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)}, \quad (6.50)$$

де d_1 – внутрішній діаметр труби, м; d_2 – зовнішній діаметр труби, м.

За відношенням товщини стінки до внутрішнього діаметра труби який не перевищує $\delta/d_1 = 0,3 \dots 0,4$ кривизною стінки можна знехтувати, зводячи задачу близькою до розрахунку плоскої стінки. При цьому розрахункову площу поверхні слід обирати за площу поверхні з того боку, для якого термічний опір ($1/\alpha_1$ або $1/\alpha_2$) більший.

Рушійна сила теплових процесів

Рушійною силою теплових процесів є різниця температур середовищ, за наявності якої теплота розповсюджується від середовища з більшою температурою до середовища з меншою температурою.

Під час вивчення законів теплопередачі ми вважали ці температури по обидва боки стінки, що їх розділяє, постійними, що справедливо лише в одному випадку, коли водяна пара, що конденсується у паровій оболонці випарного апарата або автоклава, віддає теплоту киплячій рідині. У більшості випадків у процесі теплообміну температури теплоносіїв (або, принаймні, одного з них) змінюються вздовж поверхні теплообміну, тому в теплових розрахунках, де застосовується основне рівняння теплопередавання, використовується середня різниця температур.

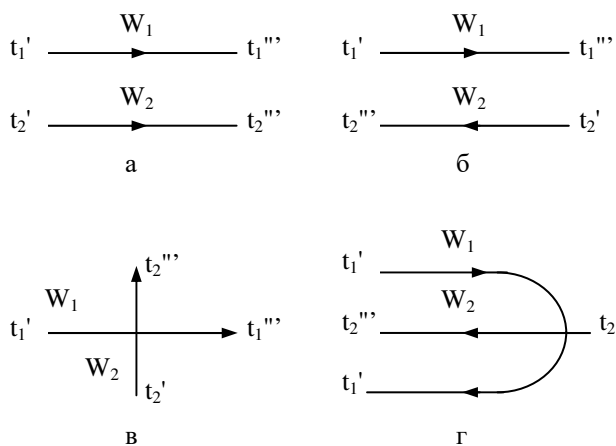


Рисунок 6.8 – Схема напрямку руху теплоносіїв у разі теплообміну

На практиці зустрічаються такі схеми руху теплоносіїв (рис. 6.8): а) протічя – обидва теплоносії рухаються паралельно один до одного в одному напрямку; б) протитечія – паралельний зустрічний рух; в) перехресна течія – рух у взаємно перпендикулярному напрямку; г) змішана течія – один або два теплоносії роблять декілька ходів у апараті, омиваючи одну частину його поверхні за схемою протічя, іншу – за схемою протитечія або перехресної течія.

На рис. 6.9 у координатній системі: температура (за оссю ординат) – площа поверхні нагрівання апарата (за оссю абсцис), графічно наведено характер зміни температур нагрівачого теплоносія, і теплоносія, що нагрівається, вздовж

поверхні теплообміну за постійної температури нагріваючого агента (а), постійної температури агента, що охолоджує (б), прямотечії (в) і протитечії (г).

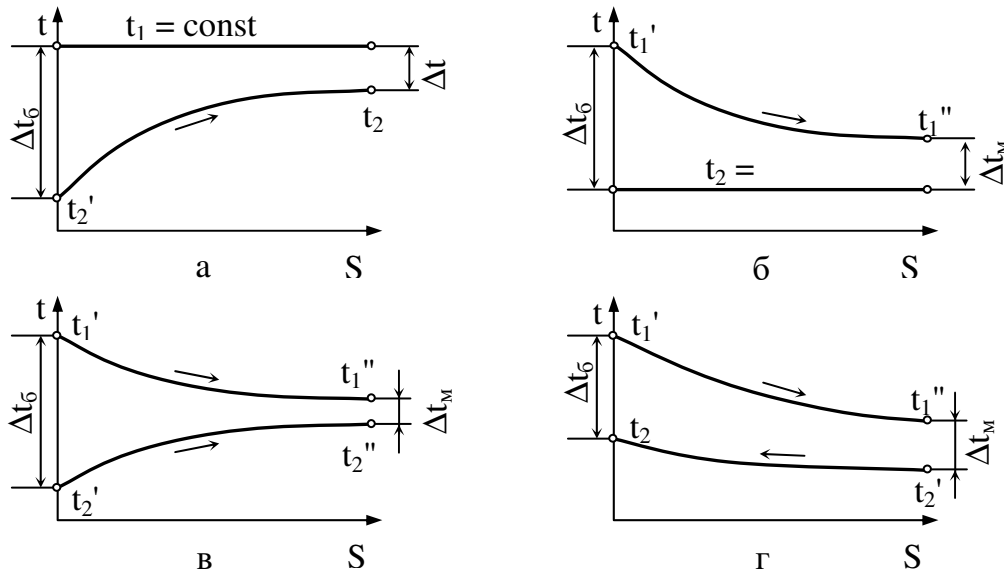


Рисунок 6.9 – Схема зміни температур теплоносіїв вздовж поверхні теплообміну

Для розрахунку середньої різниці температур необхідно встановити за графіками у кожному конкретному випадку більшу і меншу різницю температур. Після цього встановлюють величину відношення між більшою і меншою різницею температур.

Якщо відношення $\Delta t_{\delta} / \Delta t_{m} < 2$, то середня різниця температур визначається як середньоарифметична величина:

$$\Delta t_{сep.} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{m}}{2}. \quad (6.51)$$

Коли $\Delta t_{\delta} / \Delta t_{m} \geq 2$ то середня різниця температур теплоносіїв визначається як середньологарифмічна величина за формулою:

$$\Delta t_{сep.} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{2,3 \lg \left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}} \right)}. \quad (6.52)$$

Для апаратів зі змішаною та перехресною течією теплоносіїв середню різницю температур можна обчислити за формулою (6.52) з поправним коефіцієнтом $\epsilon_{\Delta t}$:

$$\Delta t_{сep.} = \epsilon_{\Delta t} \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{2,3 \lg \left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}} \right)}. \quad (6.53)$$

Поправний коефіцієнт знаходиться за графіками і таблицями, наведеними в теплотехнічній літературі, залежно від співвідношення температур теплоносіїв.

Таким чином, середня різниця температур теплоносіїв – середній температурний напір є рушійною силою теплових процесів. Тільки за його наявності теплота передається від одного середовища до іншого. Дійсно, якщо $\Delta t_{сер} = 0$, то згідно з рівнянням теплопередачі (6.45) $Q = 0$, і теплообмін між теплоносіями відбуватися не буде.

Порівняння середніх температурних напорів показує, що за однакових температур теплоносіїв на вході та виході з апарата найбільший температурний напір одержується в теплообміннику з протитечею, найменший – із прямої течією. Завдяки більшій величині середнього температурного напору робоча поверхня теплообмінника з протитечею виявляється меншою, ніж із прямої течією.

6.3. Нагрівання

Способи нагрівання. Нагрівання в харчовій технології та ресторанному господарстві широко застосовують для прискорення багатьох гідромеханічних, теплових, масообмінних, хімічних та біохімічних процесів, а також для проведення пастеризації та стерилізації низки харчових продуктів.

Залежно від температурного режиму та інших умов проведення процесу для кожного з них обирають такий спосіб нагрівання, що є найбільш доцільним у технологічному та економічному відношеннях.

Найбільше розповсюдження в харчовій технології одержали такі способи: нагрівання прямими джерелами теплоти – димовими газами і електричним струмом; проміжними теплоносіями – водяною парою, гарячою водою, гарячим повітрям, мінеральними маслами.

Крім того, для нагрівання використовують теплоту раніше нагрітого харчового продукту, що під час обробки повинен бути охолоджений.

У разі вибору теплоносія враховують його термічну та хімічну стійкість, токсичність, вартість і доступність. Однією з найважливіших характеристик теплоносія є величина коефіцієнта тепловіддачі.

Нагрівання водяною парою. Водяна пара є найбільш розповсюдженим теплоносієм. Економічним є використання відпрацьованої пари паросилових установок і вторинної пари випарних установок. Частіше використовують насичену водяну пару тиском до 1,2 МПа. Використання пари більшого тиску вимагає складної та дорогої апаратури, що, як правило, економічно не виправдовується. Відповідно до тиску 1,2 МПа нагрівання насиченою водяною парою обмежене температурою $\approx 180^\circ \text{C}$.

Нагрівання водяною парою має такі переваги: 1) велика кількість теплоти, що виділяється під час її конденсації (2264...2024 кДж/кг з тиском відповідно 0,1...1,0 МПа); 2) високий коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується, до стінки – 5...18 кВт/(м²·К); 3) створюється рівномірний нагрів теплопередаючої поверхні, оскільки пара конденсується за постійної температури; 4) водяна пара дешева, не токсична і пожежобезпечна.

Розрізняють нагрівання гострою, глухою та м'ятою парою.

Під час нагрівання гострою парою водяна пара вводиться безпосередньо в середовище, що нагрівається, і змішується з ним. Цей спосіб застосовується, коли допустиме змішування середовища, що нагрівається, з паровим конденсатом. Уведення гострої пари здійснюється по трубі 3, через барботери – труби 2, що розташовані біля дна апарата 1 і обладнані безліччю дрібних отворів (рис. 6.10).

Під час барботерування пара потрапляє в шар рідини і конденсується, віддаючи їй теплоту конденсації. Таке нагрівання визначає найбільш повне використання теплоти, яку містить водяна пара. Наведемо деякі приклади використання гострої пари в харчовій технології:

- парова очистка картоплі та інших коренеплодів;
- обробка водяною парою тістових заготовок під час випікання хліба;
- пароконтактна обробка м'ясопродуктів у виробництві консервів для дитячого харчування;
- варіння продуктів у пароварильних апаратах підприємств ресторанного господарства (рис. 6.11);
- дезодорація жирів і масел у виробництві харчових жирів.

Пароварильна шафа, схему якої наведено на рис. 6.11, має власний парогенератор 3 та робочу камеру 2. Корпус 6 камери виконаний із нержавіючої сталі та покритий шаром ізоляції 1. Продукт 7 встановлюється в камері на полиці-решітці 5. Нагрівання води в парогенераторі відбувається за допомогою тенів 4.

Витрати гострої пари D (кг/с) визначають з теплового балансу:

$$Gc t_n + D i = Gc t_k + Dc_k t_k + Q_v, \quad (6.54)$$

де G – кількість рідини, що нагрівається, кг/с; t_n, t_k – початкова та кінцева температури середовища, що нагрівається, °С; c – середня теплоємність середовища, що нагрівається, в інтервалі температур $t_n - t_k$, Дж/(кг·К); i – ентальпія грюючої пари, Дж/кг; c_k – теплоємність конденсату, Дж/(кг·К); Q_v – втрати теплоти в довкілля, Дж.

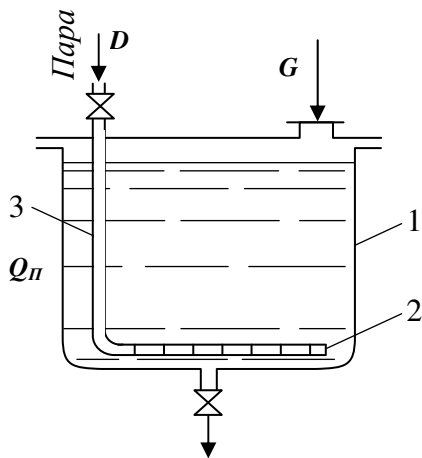


Рисунок 6.10 – Схема нагрівання рідини «гострою» парою

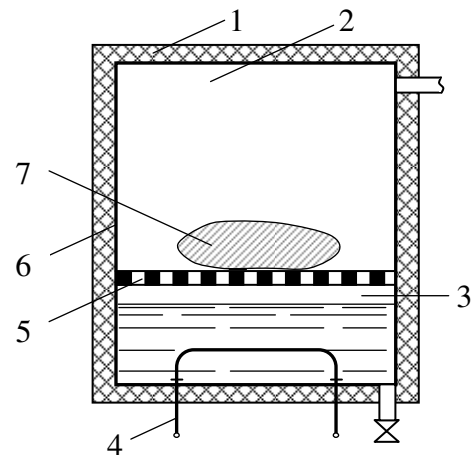


Рисунок 6.11 – Схема пароварильної шафи

З рівняння (6.54) витрата пари становить:

$$D = \frac{[Gc(t_k - t_n) + Q_e]}{(i - c_k t_k)} \quad (6.55)$$

Потрібна кількість пари для здійснення інших технологічних операцій обчислюється з відповідних рівнянь теплового балансу, складених із урахуванням всіх процесів, що відбуваються при цьому.

Так, наприклад, потрібна кількість пари, яка конденсується на поверхні тістових заготовок у промислових хлібопекарних печах, визначається виразом:

$$D = D_m + D_n + D_{кл}, \quad (6.56)$$

де D_m – кількість конденсату, яка потрібна для вилучення борошністості на поверхні; D_n – кількість конденсату, що потрібна для доведення температури поверхні заготовки до температури початку клейстеризації крохмалю ($55...60^\circ \text{C}$); $D_{кл}$ – кількість пари, що потрібна для проведення повної клейстеризації крохмалю поверхневого шару заготовки ($80...90^\circ \text{C}$).

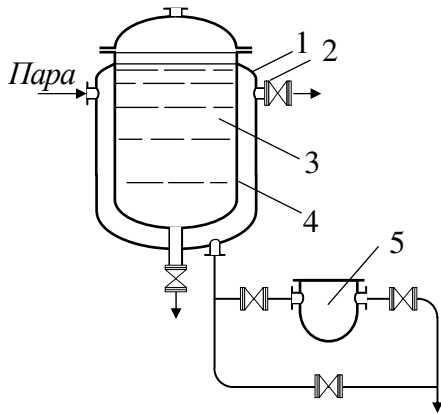


Рисунок 6.12 – Схема нагрівання глухою парою

Під час нагрівання глухою парою (рис. 6.12) остання надходить у спеціальний простір 1 (оболонку, трубку, змієвик) що відокремлений від продукту 3, який нагрівається, теплообмінною поверхнею (стілкою) 4. У грійчій камері, пара повністю конденсується, і конденсат за допомогою конденсатівідвідника 5 виводиться з теплообмінника.

Під час нагрівання глухою парою у паровій оболонці апарата накопичуються гази, головним чином повітря, що потрапляє в оболонку разом із парою. Із-за наявності газів у паровому просторі знижується

коефіцієнт тепловіддачі від пари, яка конденсується, до стінки апарата і зростає витрата пари. Нижче наведені приблизні зразки значення α в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для суміші пари з повітрям: чиста пара – 11 000; пара, що містить 3% повітря – 3 400; пара, що містить 6 % повітря – 1 100.

Тому періодично гази слід виводити з парової оболонки апарата через спеціальний штуцер 2 (рис. 6.12). Це особливо важливо враховувати під час експлуатації харчоварильних котлів, що використовують для процесів варення в підприємствах ресторанного господарства.

Витрата глухої пари (в кг/с) визначається з теплового балансу процесу нагрівання:

$$Gct_n + Di_n = Gct_k + Di_k + Q_e, \quad (6.57)$$

$$D = \frac{[Gc(t_k - t_n) + Q_g]}{i_n - i_k}, \quad (6.58)$$

де i_n та i_k – ентальпії відповідно гріючої пари та конденсату, Дж/кг.

Нагрівання топковими газами та повітрям

Обігрів топковими газами застосовується там, де вимагається одержання високих температур, для досягнення яких застосування водяної пари або інших теплоносіїв неможливе. Топкові газы дозволяють здійснювати нагрівання до 1100° С. Вони утворюються під час згоряння твердого, рідкого або газоподібного палива в спеціальних топках. Для зниження температури топкових газів до 500...800° С їх змішують із повітрям.

Топкові газы використовують як сушильний агент у барабанних сушарках, призначених для сушіння сипких відходів харчових виробництв: бурякового жому на цукрових заводах, зерно-картопляної барди на спиртових та пивоварних заводах, мезги на крохмале-патокових заводах.

На рис. 6.13 наведено схему обігріву барабанної сушарки топковими газами.

Газ, що утворюється у топці 2, надходить у барабан сушарки 1 через проміжну камеру 3, в яку подається повітря для змішування з газами і зниження їхньої температури.

Іншим прикладом використання топкових газів є водонагрівальне обладнання підприємств ресторанного господарства, наприклад – кип'ятильник безперервної дії газовий КНГ-200У та водонагрівачі типу АГВ. Знаходять застосування й виносні водонагрівачі, які утилізують теплоту продуктів згоряння від газових і твердопаливних плит. У зв'язку з цим відзначимо, що застосування відпрацьованих газів не вимагає додаткової витрати палива, тому використання їх для нагрівання надзвичайно доцільне. Найбільш істотними недоліками топкових газів є нерівномірність нагріву та значні температурні перепади, труднощі точного регулювання температури, низькі коефіцієнти тепловіддачі (35...60 Вт/(м²·К), забруднюваність.

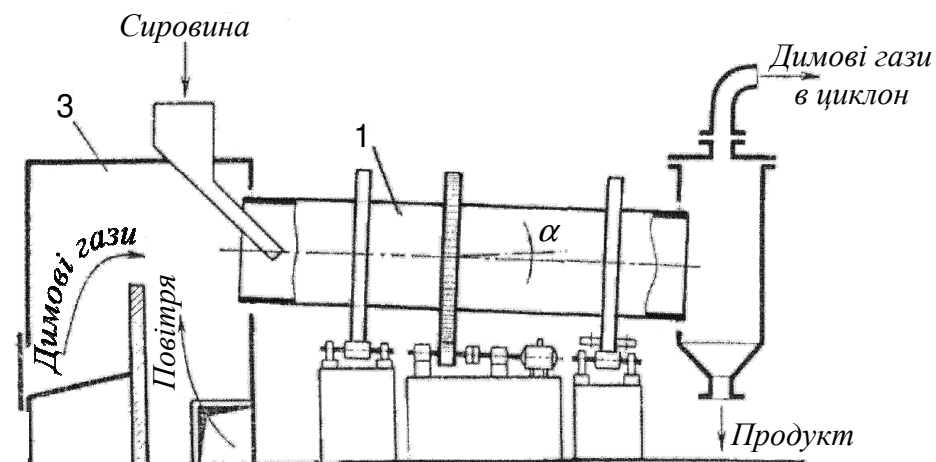


Рисунок 6.13 – Схема барабанної сушарки

Витрати B газоподібного палива можна обчислити з рівняння теплового балансу

$$B \cdot I_1 + Gct_n = B \cdot I_2 + Gct_k + Q_e, \quad (6.59)$$

де I_1 та I_2 – ентальпії топкових газів на вході та виході з теплообмінника.

$$B = \frac{[Gc(t_k - t_n) + Q_e]}{I_1 - I_2}. \quad (6.60)$$

Нагрівання електричним струмом

За допомогою електричного струму можна проводити нагрівання в дуже широкому діапазоні температур, легко регулювати і точно підтримувати заданий температурний режим. Усі електричні нагрівачі прості за конструкцією, компактні та зручні у монтажі й обслуговуванні. Проте їх застосування стримується порівняно високою вартістю електроенергії.

Залежно від способу перетворення електричної енергії в теплову розрізняють нагрівання електричними опорами (омічний нагрів), індукційний, високочастотний та нагрівання електричною дугою.

Нагрівання електричним опором – найбільш розповсюджений спосіб. Електричні нагрівачі за конструктивним оформленням бувають відкриті, закриті (з доступом повітря) та герметично закриті (без доступу повітря). Найбільш досконалі та розповсюджені герметично закриті нагрівачі, які складаються з металевої (сталеві, латунної, мідної або алюмінієвої) трубки 4, всередині якої запресована в наповнювачі 2 спіраль 1 із ніхромового дроту (сплав, що містить 20% хрому, 30...80% нікелю і 0,5...50% заліза). Тому їх називають трубчатими електронагрівачами або тенами (рис. 6.14).

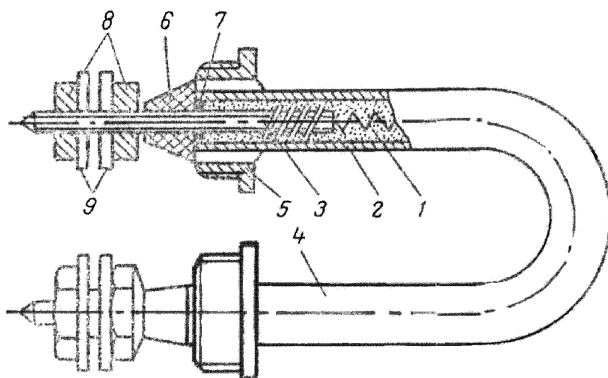


Рисунок 6.14 – Трубчатий електронагрівач

Як наповнювач між корпусом і спіраллю тена застосовують, в основному, периклаз або кварцовий пісок; він являється, з одного боку, електро-ізоляцією спіралі від металевої трубки, а з іншого – провідником теплоти.

За допомогою тенів можна нагрівати воду, лужні та кислотні розчини, повітря, харчові жири та мінеральні масла. Тени виготовляються різної довжини,

діаметра і конфігурації, а також різної номінальної потужності.

Кількість теплоти, що необхідно підвести у процесі нагрівання електричним струмом, визначається з теплового балансу:

$$Q_e + Gct_n = Gct_k + Q_e, \quad (6.61)$$

де Q_e – теплота, що підводиться до апарата з електронагрівачем, Дж; Q_e – втрати теплоти в довкілля, Дж. Інші позначки ті ж, що і в рівнянні (6.54).

З рівняння (6.61) одержуємо:

$$Q_e = Gc(t_k - t_n) + Q_v. \quad (6.62)$$

Необхідна потужність електронагрівача (у Вт) дорівнює:

$$P = \frac{Q_e}{\tau\eta}, \quad (6.63)$$

де τ – час нагрівання, с; η – ККД електронагрівача.

Електроконтактний спосіб нагрівання полягає у перетворенні електричної енергії у теплову під час проходження змінного електричного струму промислової частоти 50 Гц через продукт, як через провідник, що має опір. Проведені експериментальні дослідження з вивчення закономірностей кінетики електроконтактного нагріву низки харчових продуктів, наприклад, хліба, м'ясного фаршу та бісквітного тіста, вивчений вплив різноманітних чинників

на особливості процесу. На рис. 6.15 зображено типові криві закономірності зміни основних параметрів процесу випікання бісквітного тіста (величини струму в електричному колі 1, температури матеріалу в центрі виробу 2 і вологості 3) залежно від тривалості процесу.

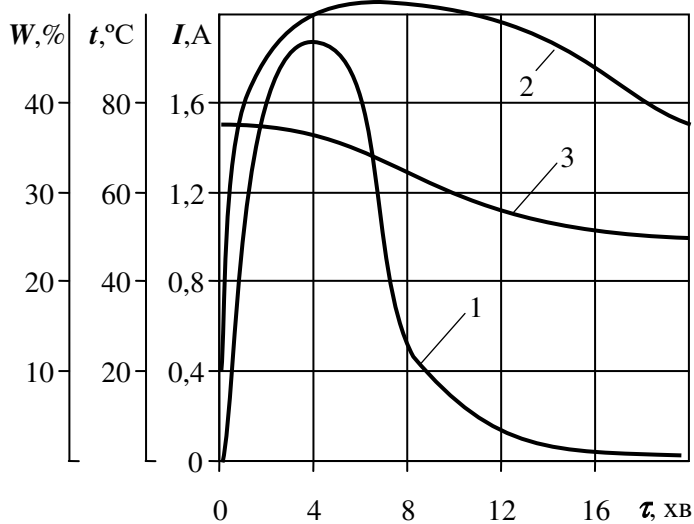


Рисунок 6.15 – Кінетика електроконтактного нагрівання бісквітного тіста

Тісто знаходилось поміж двома електродами, до яких підводили змінний струм частотою 50 Гц за різних напруг. Аналіз наведених

залежностей дозволяє уявити процес електроконтактного випікання бісквітного тіста таким чином. На початку процесу, після замикання електричного кола, величина струму швидко зростає. При цьому також швидко зростає і температура матеріалу. Цей період прогресивного зростання струму в ланцюзі та підвищення температури матеріалу до їх максимальних значень є фазою розігріву. Друга фаза – припинення зростання струму в колі та сталість температури. При цьому теплота, яка виділяється, витрачається на інтенсивне випаровування вологи і зниження вологовмісту матеріалу, що тягне за собою збільшення електричного опору матеріалу і зменшення величини струму, що протікає. Третя фаза процесу (фаза охолодження) характеризується зниженням вологомісткості матеріалу, а отже, його провідності, що призводить майже до повного припинення струму в колі. Втрата вологи при цьому триває за рахунок теплоти, що акумулювалася матеріалом. Готовність продукту настає при падінні струму, що протікає через нього до 0,05...0,1 А. Тривалість випікання складає

13...18 хв, тобто скорочується приблизно в 3 рази порівняно з нагріванням у печах. Перепад температур окремих ділянок продукту, що обробляється, в процесі випікання складає не більш 2...3° С. Вологість готового продукту відповідає вимогам нормативної документації. Коефіцієнт корисного використання електричної енергії під час електроконтактної обробки досягає 97...98%.

Індукційне нагрівання засноване на використанні теплового ефекту, що викликається струмами Фуко, які виникають безпосередньо в стінках сталевого апарата, що нагрівається. Апарат з індукційним нагрівом подібний трансформатору, первинною обмоткою якого є індукційні котушки, а магнітопроводом і вторинною котушкою – стінки апарата. Цей вид нагріву в апаратурі харчових виробництв поки не знайшов належного розповсюдження.

Нагрівання електричною дугою проводять до температури 3000° С у дугових печах за рахунок полум'я дуги, що виникає між електродами. Теплота від стовпа дуги передається матеріалу, що нагрівається.

Високочастотне нагрівання засноване на тому, що під час впливу на діелектрик змінного електричного струму молекули діелектрика приходять у коливальний рух з частотою поля, при цьому частина енергії витрачається на подолання тертя між молекулами діелектрика і перетворюється в теплоту, нагріваючи тіло. Кількість теплоти, що виділяється, пропорційна квадрату напруги та частоті струму.

Нагрівання проміжними теплоносіями

Проміжними називаються теплоносії, що сприймають теплоту від прямих джерел тепла та передають її матеріалам, що нагріваються. У якості проміжних теплоносіїв застосовуються гаряча та перегріта вода, мінеральне масло, високотемпературні органічні теплоносії. Гаряча вода застосовується звичайно для нагрівання до температури не більше 100° С. Обігрів водою застосовують у тих випадках, коли необхідно забезпечити м'які умови обігріву і коли це диктується вимогою технології виробництва. Часто для цієї мети використовують конденсат водяної пари. Гарячу воду одержують у водогрійних котлах, що обігриваються топковими газами, і парових водонагрівачах (бойлерах). Для нагрівання водою застосовують, головним чином, циркуляційні системи обігріву, що можуть бути з природною або примусовою циркуляцією.

Принципова схема установки з природною циркуляцією рідини показана на рис. 6.16 а. Вода нагрівається у змійовику 3, печі 2. У результаті зменшення густини води, під час нагрівання вона переміщується по трубопроводу вгору до апарата 1, що обігривається. Охолоджена вода стікає з апарата в змійовик самопливом. Таким чином здійснюється замкнена природна циркуляція теплоносія, швидкість води не перевищує при цьому 0,1...0,2 м/с.

Кількість теплоти, що передається рідким теплоносієм у системі з природною циркуляцією, визначається виразом:

$$Q = Gc (t_2 - t_x), \quad (6.64)$$

де G – кількість теплоносія, кг/с; c – теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К); t_2 – температура теплоносія в гарячому напрямку системи (до апарата, що

обігривається), °С; t_x – температура теплоносія в холодному напрямку системи (після апарата, що обігривається), °С.

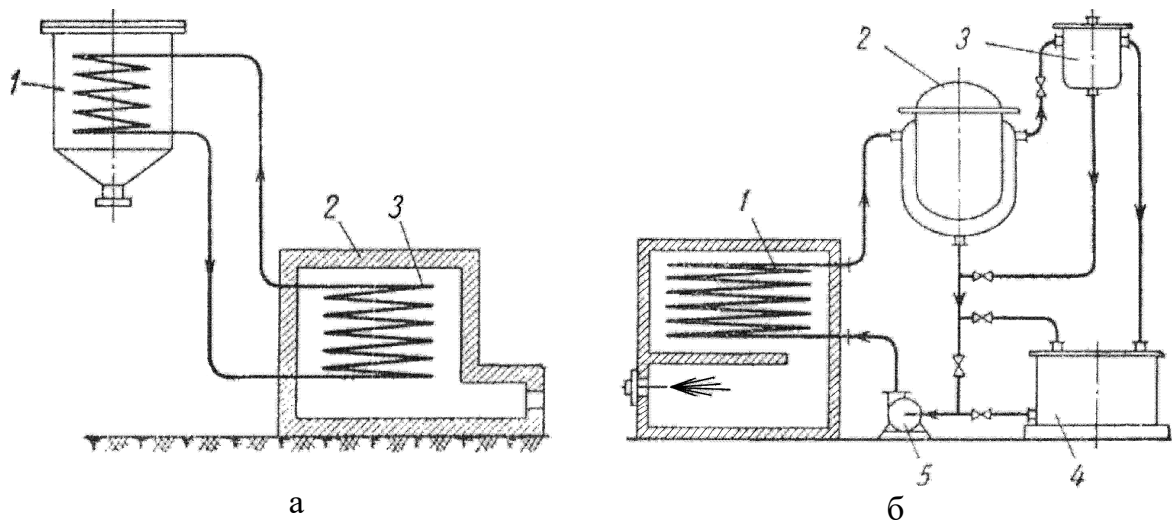


Рисунок 6.16 – Принципова схема нагрівання рідким теплоносієм

Кількість теплоносія, що циркулює у системі, визначається рівнянням витрати:

$$G = f v \rho, \quad (6.65)$$

де f – площа перетину трубопроводу, м²; v – середня лінійна швидкість теплоносія у трубопроводі, м/с; ρ – густина теплоносія, кг/м³.

Лінійна швидкість теплоносія в системі може бути визначена виходячи з законів гідродинаміки. Напір (y м), що визначає рух теплоносія в системі, складає:

$$P = gH\rho_x - gH\rho_2 = gH(\rho_x - \rho_2), \quad (6.66)$$

де H – висота, що визначає положення апарата, що обігривається над піччю, м; ρ_x і ρ_2 – густина теплоносія відповідно в холодному і гарячому напрямках системи, кг/м³.

Опір гарячого Δp_2 і холодного Δp_x напрямків циркуляційної системи може бути визначений, як:

$$\Delta p_2 + \Delta p_x = \frac{\rho_x v_x^2}{2} (1 + \sum \xi_x) + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} (1 + \sum \xi_2), \quad (6.67)$$

де v_x та v_2 – лінійна швидкість теплоносія відповідно в холодній і гарячій гілці, м/с; $\sum \xi_x$ та $\sum \xi_2$ – сума опорів відповідно холодного і гарячого напрямків.

При одному і тому ж перетині трубопроводу в холодному і гарячому напрямках, згідно з законом нерозривності потоку:

$$v_x \rho_x = v_2 \rho_2, \quad v_2 = \frac{v_x \rho_x}{\rho_2}. \quad (6.68)$$

Підставляючи знайдене значення v_2 в (6.67) та враховуючи, що під час процесу, який встановився:

$$\Delta p_x + \Delta p_2 = P = gH(\rho_x - \rho_2),$$

можна отримати вираз для визначення швидкості теплоносія:

$$v_x = \frac{1}{\rho_x} \sqrt{\frac{2gH(\rho_x - \rho_2)}{(1 + \sum \xi_x) / \rho_x + (1 + \sum \xi_2) / \rho_2}} \quad (6.69)$$

З (6.69) слідує, що швидкість, а отже і продуктивність установки, зростає із збільшенням різниці висот розташування апарата, що обігривається, і печі, збільшенням різниці густин теплоносіїв у холодному та гарячому напрямках та із зменшенням гідравлічних опорів системи.

Примусова циркуляція води між водогрійним котлом і теплообмінним апаратом (рис. 6.16 б) здійснюється насосом 5. Апаратура, що існує для примусової циркуляції води, включає окрім водогрійного котла 1 і теплообмінного апарата 2, безперервно працюючий відцентровий насос 5, розширювальний бачок 3 і збірник для води 4. Таким чином, установки з примусовою циркуляцією теплоносія складніші порівняно з системами природної циркуляції. Проте примусова циркуляція має свої переваги – теплоносій рухається через теплообмінний апарат із швидкістю 1...2 м/с, що збільшує коефіцієнт тепловіддачі від нього до стінки апарата і прискорює нагрівання продукту в ньому.

Гаряча вода як теплоносій поступається водяній парі. Коефіцієнт тепловіддачі під час нагрівання водою в багато разів нижчий за коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується (табл. 6.2). Нагрівання гарячою водою супроводжується зниженням її температури вздовж теплообмінної поверхні, що погіршує рівномірність обігріву і ускладнює регулювання температури. Означені недоліки обмежують застосування води як теплоносія.

Як теплоносій можна використати «перегріту» воду з температурою 300° С, яка циркулює у системі та знаходиться під тиском 20 МПа. Нагрівання за допомогою такої води застосовується дуже рідко з-за високого тиску теплоносія, що пов'язане з ускладненням обладнання. Щоб нагріти продукт до температури понад 200° С, як теплоносій використовують висококиплячі органічні теплоносії (скорочено ВОТ) і мінеральне масло.

До найбільш розповсюджених ВОТ відносять діарилметани – дітолилметан з температурою кипіння $t_k = 296^\circ \text{C}$ та з температурою замерзання $t_z = -36^\circ \text{C}$, дікумілметан (ДКМ) з температурою кипіння $t_k = 336^\circ \text{C}$ і з температурою замерзання $t_z = -24^\circ \text{C}$, а також дифенільна суміш. Вони являють собою легкорухомі рідини, не викликають корозії металів, термостійкі, дешеві. ВОТ можуть застосовуватися як в однофазному, так і у двофазному (рідина-пар) стані.

Мінеральне масло – продукт переробки нафти; температура кипіння знаходиться в межах від 250 до 300° С. Застосовується компресійне масло марок 12-М і 19-Т, циліндрове – марок 11 і 24 та циліндрове важке – марок 38 і 52-вапор. Мінеральне масло за високих температур осмолюється і забруднює теплообмінну поверхню апаратів, що значно знижує коефіцієнт тепловіддачі. Воно використовується лише в однофазному (рідкому) стані.

Схеми використання мінерального масла і ВОТ для процесів нагрівання аналогічні наведеним на рис. 6.16.

6.4. Охолодження

Способи охолодження

У харчовій технології дуже часто виникає необхідність охолоджувати газ, пару, рідину та тверді тіла. Основними параметрами при цьому є кінцева температура продуктів і швидкість їхнього охолодження. Кінцева температура залежить від вихідного стану продукту, його виду і вимоги технологічного процесу. Швидкість процесу визначається, в основному, видом продукту, що охолоджується. Особливо актуальне питання вибору швидкості під час охолодження продуктів із метою збільшення термінів їх зберігання без зниження харчової цінності. Якщо швидкість недостатньо велика, то в продукті часто відбуваються небажані зміни внаслідок руйнівної дії мікробіологічних і ферментативних процесів, що можуть випереджати процес охолодження. Практика показує, що чим швидше та глибше охолодити свіжі продукти, тим краще збережуться їхні початкові якості та зменшаться витрати їхньої маси. Це стосується всіх продуктів рослинного і тваринного походження, наприклад таких, як м'ясо, риба, морепродукти, деякі молочні та кулінарні вироби.

Охолодження може бути природним і штучним. Під час природного охолодження тіло може бути охоложене тільки до температури довкілля, наприклад до температури повітря або води. Більш низькі температури досягаються шляхом штучного охолодження. Для штучного охолодження може бути використаний будь-який фізичний процес, пов'язаний з вилученням теплоти (плавлення, сублімація, кипіння та ін.). Залежно від температури охолодження середовища розрізняють штучне охолодження помірне (до температури мінус 153°C) і глибоке або криогенне (від -153°C до температур, близьких до абсолютного нуля).

Найбільш розповсюдженими і доступними теплоносіями, що охолоджують, є вода, повітря і лід, які дозволяють здійснити охолодження до 0°C . Для охолодження до температур нижче 0°C застосовують суміші льоду з сіллю, сухий лід, холодильні розсоли (розчини NaCl , CaCl_2), зріджені аміак, фреони та ін.

Повітряне охолодження

Повітря – найбільш розповсюджений холодоагент. Він не має запаху і на більшість харчових продуктів не виявляє шкідливого впливу (за винятком окислюючої дії кисню).

До недоліків охолодження у повітрі можна віднести низький коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря (до $58\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$), порівняно низька питома теплоємність (біля $1\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$), випаровування вологи з поверхні продукту, що супроводжується втратою їхньої маси за недостатньої вологості повітря.

Для інтенсифікації теплообміну підвищують швидкість переміщення повітря (за допомогою вентилятора) і збільшують перепад температур між ним і продуктом, що охолоджується. Для цього служать повітроохолоджувачі, що охолоджують змішувачі і т. ін.

Кількість теплоти (у Вт), що втрачає рідкий продукт під час випаровування в повітряне середовище в апаратах відкритого типу, визначають за формулою:

$$Q = D(i - c t_k), \quad (6.70)$$

де D – кількість рідини, що випарувалася, кг/с; i – ентальпія пари, що утворюється з рідини, Дж/кг; c – питома теплоємність продукту, що охолоджується, Дж/(кг·К); t_k – середня температура продукту, що охолоджується, °С.

Водяне охолодження

Вода має більшу теплоємність і більш високі коефіцієнти тепловіддачі, ніж повітря. Залежно від пори року та кліматичних умов температура води з водоймища становить 12...25° С. Артезіанська вода має температуру 4...15° С. Для економії води і охорони навколишнього середовища вводиться система водообігу, що дає можливість різко скоротити споживання свіжої води і зменшити стік. При цьому воду після теплообмінного обладнання охолоджують у градирнях за рахунок часткового випаровування в повітря, що рухається протитечією, і після очищення знову спрямовують на використання як холодоагента.

Вода використовується для охолодження в поверхневих і змішувальних теплообмінниках. У останні роки широко застосовують холодну (льодяну) воду (1...4° С) для охолодження тушок птиці до 4...6° С, розміщуючи їх у спеціальні ванни або зрошуючи через форсунки. Широко використовується льодяна вода для охолодження молока в пластинчатих охолоджувачах.

Витрата води на охолодження продукту в теплообміннику визначається з теплового балансу процесу (рис. 6.17 а), що виражається рівнянням:

$$Gct_n + Wc_w t_1 = Gct_k + Wc_w t_2 + Q_{\text{в}}, \quad (6.71)$$

де G – кількість продукту, що охолоджується, кг/с; t_n, t_k – відповідно початкова та кінцева температури продукту, °С; c – теплоємність продукту, Дж/(кг·К); W – витрата води на охолодження, кг/с; t_1, t_2 – відповідно початкова і кінцева температури води, що охолоджує, °С; c_w – теплоємність води, Дж/(кг·К); $Q_{\text{в}}$ – втрата теплоти в довкілля, Дж.

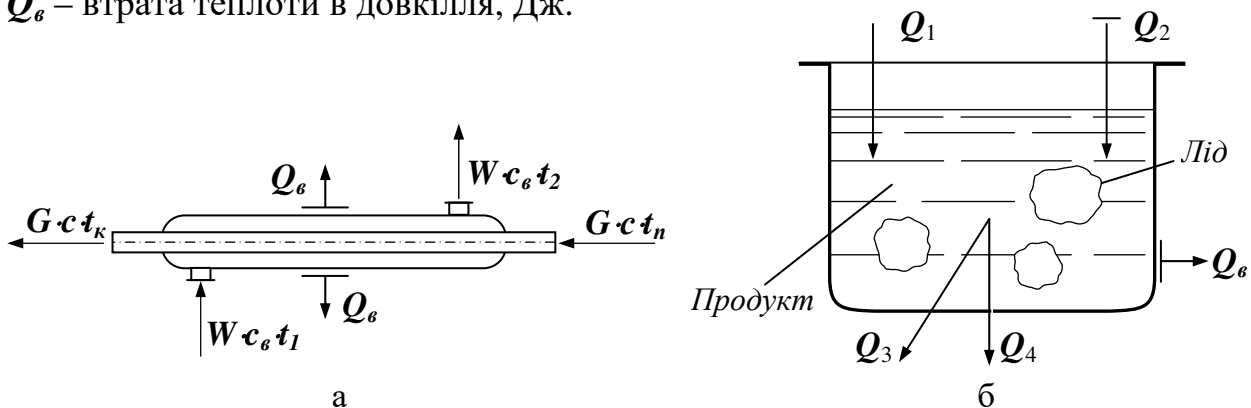


Рисунок 6.17 – Принципова схема до теплового балансу охолодження

З формули (6.71) одержуємо:

$$W = \frac{[Gc(t_n - t_k) - Q_6]}{c_6(t_2 - t_1)}. \quad (6.72)$$

З виразу (6.72) витікає, що завдяки тепловим втратам у довкілля, витрата води на охолодження дещо знижується.

Охолодження льодом

Лід застосовують для одержання температури біля 0° С, бо за цієї температури він плавиться і забирає теплоту від продукту. Якщо додати до льоду або снігу кристалічну кухонну сіль (NaCl), то температура плавлення цієї суміші буде нижче 0° С, і величина її визначається кількістю солі в суміші.

У тих випадках, коли продукт, що охолоджується, рідкий, хімічно не взаємодіє з водою і для нього допускається розведення, лід вноситься в нього безпосередньо. При цьому лід нагрівається рідиною до 0° С, а після цього плавиться, віднімаючи теплоту плавлення від рідини, що охолоджується. Під час безпосереднього охолодження льодом в апарат із рідиною, що охолоджується, (рис. 6.17 б) вноситься теплота в кількості:

$$Q_1 = Gc t_n,$$

де G – кількість рідини, що охолоджується, кг; c – теплоємність рідини, що охолоджується, Дж (кг·К); t_n – початкова температура рідини, °С.

З льодом вноситься холод (або теплота з негативним знаком) у кількості:

$$Q_2 = L \cdot (-r),$$

де L – кількість льоду, кг; r – теплота плавлення льоду, Дж/кг; вона становить $335 \cdot 10^3$ Дж/кг.

З апарата теплота виноситься з охолодженим продуктом Q_3 і водою Q_4 , що утвориться під час плавлення льоду. Позначивши кінцеву температуру суміші рідини, що охолоджується, і води, що утворюється під час плавлення льоду, через t_k і теплоємність води через c_6 , тепловий баланс процесу можна виразити рівнянням:

$$Gct_n - L \cdot r = Gct_k + Lc_6t_k + Q_6. \quad (6.73)$$

З цього рівняння визначимо витрату льоду (в кг):

$$L = \frac{[Gc(t_n - t_k) - Q_6]}{r + c_6 t_k}. \quad (6.74)$$

Тривалість охолодження льодом залежить від умов проведення процесу; вона зменшується зі зменшенням розмірів шматків льоду та зі збільшенням інтенсивності перемішування рідини.

6.5. Фізичні основи плавлення та твердіння

Усі тіла, що є предметами праці у харчовій технології, знаходяться в одному з трьох агрегатних станів: твердому, рідкому або газоподібному; воно

визначається середньою відстанню між молекулами. Розглянемо процеси переходу тіл з одних станів в інші, так звані фазові переходи. Із збільшенням температури зростає кінетична енергія молекул і середня відстань між ними. За певної температури, що називається температурою плавлення, речовина переходить із твердого стану в рідкий. Температура речовини при цьому не змінюється. Кількість теплоти, необхідна для даного фазового переходу, називається теплою плавлення і виражається в Дж/кг. Особливості процесу плавлення відіграють значну роль у виробництві жиру, особливо маргаринової продукції. Зазначимо, що в процесах смаження жир безпосередньо контактує з гриючою поверхнею і поверхнею харчового продукту, виконуючи при цьому роль теплоносія. Плавлення жирів, як теплообмінний процес, ускладнюється тим, що більшість із них не мають певної постійної температури плавлення. Це пояснюється тим, що до складу жиру входять різноманітні легкоплавкі та тугоплавкі жирні кислоти, що передають їм свої властивості.

Температура плавлення є одним із основних фізико-хімічних показників жиру та маргаринової продукції. Для більшості видів і найменувань маргарину, що використовуються при виготовленні продуктів харчування (страви) і, температура плавлення коливається від 27 до 32° С, кондитерських, хлібопекарних і кулінарних жирів – від 26 до 37° С.

Процес плавлення жиру тривалий, що викликано дуже низькою його тепло- і температуропровідністю. Кількість теплоти, необхідної для плавлення жиру в Дж, можна визначити за формулою:

$$Q = G_{ж} (q_{пл} + c_{ж} t_{ж}), \quad (6.75)$$

де $G_{ж}$ – кількість жиру, кг; $q_{пл}$ – питома теплота плавлення жиру, Дж/кг; $c_{ж}$ – питома теплоємність розплавленого жиру, Дж/(кг·К); $t_{ж}$ – температура розплавленого жиру, °С.

Перехід речовини з рідкого або пластичного стану в твердий називається твердінням, а температура, за якої це здійснюється, називається температурою застигання або кристалізації. Стосовно до жиру ця температура знаходиться в прямій залежності від жирнокислотного складу. Як правило, температура застигання значно нижча, ніж температура плавлення. Так, наприклад, температура плавлення свинячого жиру 28...48° С, а температура його застигання – 22...32° С.

6.6. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів

У останній час в харчову технологію широко впроваджуються електрофізичні способи обробки харчових продуктів – електростатичне поле, струми промислової частоти, струми ВЧ і НВЧ, інфрачервоне випромінювання, ультразвук та ін. Використання цих способів у технологічних процесах дозволяє знизити питомі витрати енергії, скоротити тривалість теплової обробки, забезпечити раціональні температурні режими, що в свою чергу підвищує якість продукції та дає значний економічний ефект.

Суттєвість обробки харчових продуктів у електромагнітному полі полягає в тому, що електромагнітні хвилі від генератора випромінювання проникають у продукт на значну глибину і частково або повністю поглинаються в ньому. При цьому електромагнітна енергія перетворюється в теплоту, що викликає нагрівання продукту.

Інфрачервоне нагрівання здійснюється за схемою «теплота–промінь–теплота», тобто спочатку за рахунок нагрівання випромінювача в ньому генерується енергія, після чого вона передається у вигляді електромагнітних коливань через середовище (повітря, газ) до об'єкта нагрівання, в якому енергія електромагнітних коливань знов перетворюється в теплоту. Джерелами випромінювання (генераторами) інфрачервоної енергії є, головним чином, температурні випромінювачі, в яких інфрачервоне проміння виникає в результаті спалювання газу, якогось іншого пального або під час нагрівання тіл. Крім того, джерелами випромінювання можуть бути електричні лампи розжарювання, ртутні та кварцові лампи, напіввипромінюючі тели, сени (селітові електронагрівачі), металеві та керамічні випромінювачі газових пальників та ін.

Однією з найбільш важливих характеристик генераторів ІЧ-енергії є довжина хвилі максимального випромінювання λ_{max} , тобто довжина хвилі, якій відповідає максимальна інтенсивність випромінювання. Вона залежить від температури і для абсолютно чорного тіла визначається за законом Віна (у мкм):

$$\lambda_{max} = 2898/T, \quad (6.76)$$

де T – температура випромінювача, К.

Залежно від довжини хвилі максимального випромінювання, а отже, і температури нагрівання випромінювачі поділяються умовно на «світлі» та «темні». «Світлі» випромінювачі мають у своєму спектрі видиме (світлове) випромінювання, їх $\lambda_{max} = 0,77...2,6$ мкм. Це кварцові випромінювачі КИ-220-1000, лампи ЗС, сени, газові мікрофакельні пальники та ін. «Темні» випромінювачі – тели, конфорки та ін. мають температуру до 1000 К, $\lambda_{max} = 2,6...4,0$ мкм, у спектрі їхнього випромінювання буде відсутнє видиме випромінювання. Як «світлі», так і «темні» випромінювачі застосовуються з відбивачами тієї або іншої форми.

Променевий теплообмін між тілами – складний процес. Як вже було раніше відзначено під час розгляду променевого теплообміну, в цьому процесі відбуваються багатократні поглинання та відбиття променевої енергії, що поступово згасають.

Інфрачервоне проміння переборює шлях від джерела випромінювання до об'єкта опромінення в мільйонні частки секунди, не зустрічаючи опору пограничного шару, що має місце під час конвективного нагрівання. Його особливістю є здатність проникати на деяку глибину всередину матеріалу (залежно від його оптичних характеристик – поглинальної, відбивальної та пропускаючої спроможності), а також впливати на його молекулярну структуру та на циркуляцію газу в порах. Інфрачервоне проміння інтенсифікує рух атомів і молекул поверхневих шарів продукту, і він нагрівається. Температура

поверхні матеріалу і розташованих нижче шарів швидко зростає, причому максимальна температура спостерігається не на поверхні матеріалу, а на деякій його глибині (від часток до декількох мм), що пояснюється охолодженням поверхні навколишнім середовищем.

Глибина проникнення короткохвильових інфрачервоних променів у продукти має значний діапазон і залежить від властивостей, структури, характеру поверхні, вологовмісту продуктів, а також від довжини хвиль випромінювання ІЧ-генераторів. За даними деяких авторів, глибина проникнення для низки продуктів, що мають значну поглинальну спроможність, що дорівнює $A = 0,7...0,9$ (наприклад, м'ясо, тісто, хліб, картопля та ін.), може досягати 18...20 мм.

Сприятливим чинником для ІЧ-обробки харчових продуктів є наявність довжин хвиль поблизу 1 мкм у спектрі генератора випромінювання, і високого вологовмісту вихідного продукту (при $\lambda = 0,75...2,5$ мкм вода інтенсивно поглинає ІЧ-випромінювання). На поверхні випромінюваного продукту досягається значна густина променевого потоку, що призводить до утворення на ньому специфічної кірочки відповідного кольору.

Щільність опромінення (в Вт/м²) визначається як:

$$q = \frac{\Phi}{S}, \quad (6.77)$$

де Φ – променевий потік генератора випромінювання, Вт; S – розрахункова поверхня опромінення, м².

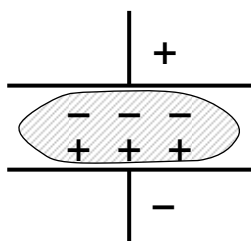
ІЧ-нагрівання може бути використане не тільки як основний енергоносіє, але і в комбінаціях з іншими засобами енергопідведення, наприклад у комбінації з конвективним і НВЧ-нагріванням. Для таких високотемпературних процесів, як випікання печива і хліба, сушіння сухарів, смаження зерен кави і бобів какао, копчення риби та ін., застосування ІЧ-випромінювання дає значний ефект.

Теплова обробка продуктів у електромагнітному полі НВЧ.
НВЧ-нагрівання стало останнім часом одним із найбільш перспективних засобів термічної обробки харчових продуктів. Використання його дозволяє значно інтенсифікувати теплові та масообмінні процеси, зменшити втрати маси продуктів під час термічної обробки, більшою мірою зберегти вітаміни, мінеральні та екстрактивні речовини.

Під час звичайних способів теплової обробки продуктів теплота передається від їхньої поверхні до центральних шарів за рахунок теплопровідності, яка для більшості харчових продуктів дуже мала (про це відзначено під час розгляду передавання теплоти теплопровідністю). Для нагрівання центральних шарів продукту до необхідної температури 70...80° С його поверхню нагрівають до 100° С (під час варки) або до 250...300° С (під час випікання, смаження). Велика тривалість передачі теплоти і неминучий перегрів поверхні продукту призводять до зниження вмісту в готових виробах низки поживних речовин та вітамінів, перевитраті енергії.

У змінному електромагнітному полі надвисокої частоти (НВЧ) нагрівання харчових продуктів може здійснюватися одразу за всім об'ємом. До основних особливостей НВЧ-нагрівання слід віднести: спроможність НВЧ-поля проникати в оброблюваний продукт на значну глибину, що дозволяє здійснити його об'ємне нагрівання незалежно від теплопровідності; високу швидкість нагрівання і відсутність контакту продукту з теплоносієм; безінерційність процесу нагрівання; високий ККД перетворення енергії НВЧ-поля в теплоту, що виділяється в продукті.

НВЧ-нагрівання відоме під різноманітними назвами, основу яких складають його узагальнені ознаки. Так, часто цей вид нагрівання називають діелектричним, оскільки використовують його для теплової обробки діелектриків, тобто матеріалів і продуктів, що не пропускають або погано пропускають електричний струм. Назва «мікрохвильове нагрівання» підкреслює коротку довжину хвилі НВЧ-поля, що дорівнює $10^{-3} \dots 10^{-1}$ м. Об'ємним це нагрівання називають тому, що під час використання НВЧ-поля



**Рисунок 6.18 –
Плоский
конденсатор**

прогрівання продукту відбувається за всім об'ємом (на відміну від поверхневого нагрівання).

Процес утворення теплоти у продукті за допомогою струмів НВЧ заснований на законах електричного поля і принципі дії конденсатора. Основні параметри та закономірності теплоутворення найпростіше можна пояснити, ґрунтуючись на принципі дії плоского конденсатора (рис. 6.18).

При підключенні плоского конденсатора до полюсів джерела постійного струму його пластини заряджаються протилежними зарядами, і між ними утворюється гомогенне силове поле. Це силове поле буде діяти на виріб (продукт) що нагрівається, розміщений між пластинами конденсатора.

Передусім відзначимо, що практично всі харчові продукти і кулінарні вироби належать до діелектриків, у яких електричні заряди під дією електричного поля не можуть переміщуватися, а лише зміщуються відносно один одного або повертаються у просторі. Зміщення зв'язаних зарядів під дією зовнішнього електричного поля називається поляризацією.

Розрізняють три основних види поляризації діелектриків: дипольний, електронний та іонний. Крім того, у харчових продуктах можуть мати місце макроструктурна і електролітична поляризації.

Основну роль у процесі поглинання енергії поля під час НВЧ-нагрівання харчових продуктів відіграє дипольна поляризація, бо в харчових продуктах у значній кількості міститься вода. У електричному полі на полярні молекули, що мають власний дипольний момент, діють сили, що орієнтують їх відповідно напрямку поля. Диполі розташовуються упорядковано, причому різнойменні заряди сусідніх диполів розміщуються поруч. Оскільки поляризаційні заряди протилежні за знаком зарядам пластин конденсатора, то електричне поле, створене поляризаційними зарядами, спрямоване назустріч полю, створеному

зарядами пластин конденсатора. Тому в діелектрику електричне поле між пластинами виявиться послабленим. Величина, що показує, у скільки разів діелектрик послаблює напруженість поля, називається електричною проникністю діелектрика ϵ . Для всіх твердих непровідних матеріалів, у тому числі й харчових продуктів, $\epsilon > 1$. Дипольна поляризація викликає значні втрати енергії поля і, отже, нагрівання продукту.

При електронній поляризації електронні оболонки атомів під впливом зовнішнього електричного поля зміщуються відносно ядра.

При іонній поляризації відбувається зміщення іонів із їхнього рівноважного положення в кристалічній решітці.

Макроструктурна поляризація припускає переміщення в межах окремих включень вільних електронів та іонів під дією зовнішнього електричного поля.

Електролітична поляризація пов'язана з явищем електролізу, зумовленим рухом дисоційованих іонів.

Таким чином, момент сил, що впливають на атоми, іони, молекули та макрочастки при розміщенні харчового продукту в зовнішньому електричному полі, дорівнює:

$$M = M_d + M_{en} + M_i + M_m + M_{el}, \quad (6.78)$$

де у правій частині рівняння наведено відповідно моменти сил, що виникають під час дипольної, електронної, іонної, макроструктурної та електролітичної поляризаціях.

Якщо конденсатор з'єднати з джерелом змінного струму, між пластинами конденсатора утвориться змінне електричне поле. Відповідно зі зміною електричного поля і полярності пластин диполі переорієнтуються (повертаються на 180°). Поляризація йде за зміною електричного поля із запізненням по фазі в результаті внутрішнього тертя матеріалу. На це витрачається робота сили електричного поля, що перетворюється в теплоту і нагріває діелектрик. Робота електричного поля, що витрачається на зміщення зарядів атомів і молекул, із-за наявності «міжмолекулярного тертя» перетворюється в теплоту. У результаті теплових ефектів температура продукту підвищується водночас за всім об'ємом.

Питому потужність, необхідну для нагрівання продукту, визначають за формулою (у Вт/м³):

$$P_n = \frac{\gamma c}{\eta_t} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \tau}, \quad (6.79)$$

де γ – питома вага продукту, кг/м³; c – питома теплоємність продукту, Дж/(кг·К); η_t – термічний ККД процесу нагрівання, що враховує втрати теплоти в довкілля; $\Delta t/\Delta \tau$ – швидкість (темп) нагрівання, °С/с.

Відзначимо, що темпи нагрівання деяких харчових продуктів із частотою НВЧ-поля $f = 2375$ МГц за експериментальними даними становлять (в °С/с): м'ясо – 0,50; котлети – 0,76; риба – 0,62; птиця – 0,38. Водночас помітимо, що у разі використання процесу варення ці величини у 20...25 разів менші.

Питому потужність, необхідну для покриття втрат на випаровування вологи, визначають за формулою (у Вт/м³):

$$P_e = \frac{r}{\eta_t} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau}, \quad (6.80)$$

де r – теплота пароутворення, Дж/кг; ΔW – зменшення вологи, віднесене до одиниці об'єму продукту (кг/м³) за проміжок часу $\Delta \tau$ (с).

Сумарна питома потужність, необхідна для теплової обробки продукту, складе:

$$P = P_n + P_e. \quad (6.81)$$

З іншого боку, тепла потужність, що виділяється в поміщеному в НВЧ-поле продукті (в одиниці об'єму, Вт/м³) дорівнює:

$$P = 0,556 \cdot 10^{-10} E^2 f \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \quad (6.82)$$

де E – напруженість електричного поля, В/м; f – частота змінного електричного поля, Гц; δ – кут діелектричних втрат; ε' – відносна діелектрична проникність середовища (продукту):

$$\varepsilon' = \varepsilon / \varepsilon_0, \quad (6.83)$$

де ε – діелектрична проникність середовища (продукту); ε_0 – електрична постійна, дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Добуток $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$ називають повним коефіцієнтом поглинання.

Як виходить із формули (6.82), під час НВЧ-нагрівання тепла потужність, що виділяється в продукті, пропорційна частоті та квадрату напруженості поля, а також повному коефіцієнту поглинання.

Теплова обробка харчових продуктів у полі НВЧ здійснюється лише в посуді з матеріалів, що характеризуються низьким коефіцієнтом поглинання і, отже, практично не схильних до нагрівання (скло, фарфор, кераміка, папір, меланіт).

Відзначимо дві важливі характеристики НВЧ-нагрівання харчових продуктів: глибина проникнення поля в продукт і частота поля.

Глибина проникнення поля НВЧ (у м) визначається за формулою

$$\Delta = \frac{9,55 \cdot 10^9}{f \operatorname{tg} \delta \sqrt{\varepsilon'}}. \quad (6.84)$$

У табл. 6.3 наведено діелектричні властивості та глибина проникнення НВЧ-поля в деякі харчові продукти. Згідно з (6.82) із збільшенням частоти електричного поля f зростає швидкість нагрівання. Проте зі збільшенням частоти зменшується глибина проникнення поля в продукт (6.84), тобто втрачається ефект об'ємного прогрівання. Тому під час вибору частоти поля прагнуть забезпечити підведення до продукту заданої величини питомої потужності, необхідну глибину проникнення поля, а також ефективну роботу генератора НВЧ. Для діелектричного нагрівання виділено низку частот: 433, 915, 2 375, 2 450, 5 800 і 22 125 МГц. В основному, використовується електромагнітне поле надвисокої частоти в 2 375 МГц. Для збереження об'ємного прогрівання на цій частоті тепловій обробці слід піддавати вироби товщиною не більше 30...50 мм.

**Діелектричні властивості, глибина проникнення НВЧ-поля
в харчові продукти і час теплової обробки ($f = 2\,375$ МГц, $t = 20^\circ\text{C}$)**

Продукт	ϵ'	ϵ''	$tg\delta$	Δ , мм	τ , хв
Яловичина	50	19	0,38	11-13	5,8
Свинина	48	18	0,36	20-24	5,1
Котлетна маса	42	25	0,6	10	-
Жир свинячий	3,2	0,23	0,08	50-60	-
Тріска	51	20	0,39	15-17	4,8
Картопля	56,7	15,2	0,27	18-24	7,2
Морква	62,7	14,3	0,30	21-23	8,3
Буряк	47,9	12,5	0,26	20-22	10

Основним джерелом енергії НВЧ є спеціальний електронний прилад, що називається магнетроном. Нині розроблені та експлуатуються водночас із магнетроном й інші електронні прилади: клістри, лампи рухомої та зворотної хвиль, твердотільні устрої. У генераторних приладах НВЧ здійснюється перетворення енергії джерела постійної напруги, що живить прилад, в енергію електромагнітних коливань. Передача електромагнітної енергії від генератора до навантаження здійснюється по НВЧ-тракту, основними елементами якого є хвилеводи – металеві труби прямокутного або круглого перетину. Оброблюваний продукт можна розміщувати як у хвилевід, так і в спеціальну камеру-резонатор.

У виробничих умовах НВЧ-нагрівання використовують для сушіння матеріалів, теплових технологічних процесів (варення, смаження), розморожування харчової сировини та готової продукції, пастеризації та стерилізації виробів. Особливо ефективно застосування діелектричного нагрівання в процесах сушіння, бо в даному випадку в матеріалі, що висушується, співпадають за спрямуванням потоки теплоти і вологи, яку видаляють.

На рис. 6.19 наведено схему вакуум-сушарки з НВЧ-нагріванням. Продукт із шлюзового бункера 3 надходить на стрічку 2 транспортера, який знаходиться в камері 1. Нагрівання продукту здійснюється завдяки магнетрону 4 і хвилеводам 5. Нагляд за температурою сушіння ведуть дистанційні прилади. Вакуум у камері сушарки підтримується вакуум-насосом 6. Готовий продукт вивантажується через шлюзовий бункер 7.

Якість матеріалів, висушених НВЧ-способом дуже висока. Наприклад, висушене таким способом м'ясо має пористу структуру; воно відновлює до 70% свого початкового об'єму під час простого обводнення. У ньому добре зберігаються вітаміни та інші цінні компоненти. НВЧ-нагрівання розповсюджене в кондитерському, м'ясному, молочному, консервному виробництвах і підприємствах ресторанного господарства.

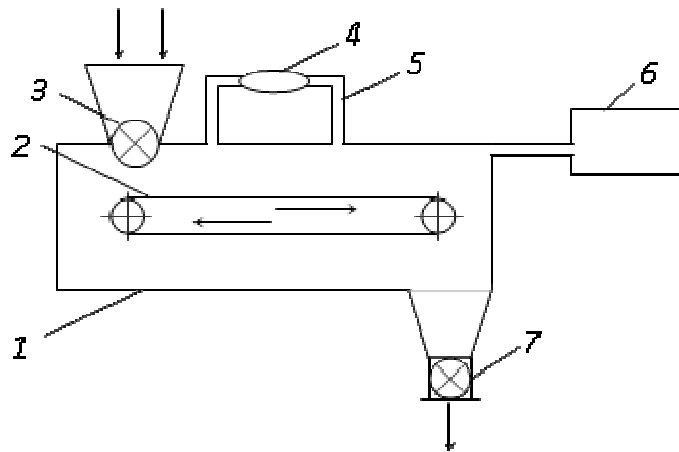


Рисунок 6.19 – Схема вакуум-сушарки з НВЧ-нагріванням

Обробка харчових продуктів у електростатичному полі застосовується для електрогазоочищення, електрокопчення та паніровки м'яса та риби, нанесення консервуючих речовин на поверхню продукту, сепарації зерна, чаю, олійного насіння та ін. Установки являють собою камеру з електродами, до яких підводиться постійний струм високої напруги (до 9000 В). Частилки пилу, туману або коптільного диму, які входять у електростатичне поле, заряджаються і під впливом поля одержують направлений рух до осаджувальних електродів. При електрокопченні компоненти коптільного диму осаджуються на поверхні продукту, а після цього дифундують у нього, в результаті чого відбувається зміна кольору, аромату, смаку продукту, а також досягається бактерицидний та антиокислювальний ефекти. Процес електрокопчення протікає 2...5 хвилин на відміну від декількох годин із використанням звичайних засобів.

Сутність електроконтактного методу обробки полягає у тому, що електричний струм промислової частоти (220 В, 50 Гц), проходячи через продукт, що має опір, викликає його нагрівання, за рахунок якого досягається значна інтенсифікація процесу. Електроконтактне нагрівання використовується для розморожування (дефростації) риби, випікання бісквітного тіста, сушіння тютюну, варення сосисок. До процесів електроконтактної обробки харчових продуктів належить і електроплазмоліз, під час якого відбувається пошкодження протоплазматичних оболонок клітин рослинної сировини, що дає збільшення виходу соку на 8...10% порівняно зі звичайними методами. Сутність процесу електрофлотації, розробленого Б.М. Матовим, полягає у розкладанні постійним електричним струмом води на кисень і водень, який після цього у вигляді бульбашок осаджується на поверхні твердої фази і тягне її вгору для наступного виділення.

Комбіновані методи теплової обробки продуктів – це послідовне та паралельне нагрівання виробів декількома з викладених вище способів із метою скорочення часу обробки, підвищення якості кінцевого продукту та ефективності технологічного процесу.

У разі вибору комбінованих способів теплової обробки треба:

– провести аналіз традиційного (базового) способу з метою виявлення його переваг та недоліків;

– сформулювати основні технологічні вимоги до даного процесу з урахуванням фізико-хімічних змін, що відбуваються у продукті, температури обробки, рівномірності обігрівання тощо;

– здійснити підбір способів теплової обробки, що усунуть ті або інші недоліки традиційного способу;

– здійснити синтез різноманітних комбінованих способів теплової обробки з метою виявлення найбільш оптимального варіанту.

На базі поверхневого, НВЧ- та ІЧ-нагрівання можливі такі комбіновані способи теплової обробки харчових продуктів: радіаційно-конвективне нагрівання (РК-нагрівання); НВЧ-парове нагрівання; НВЧ-нагрівання–гаряче повітря; паро-ІЧ-нагрівання; НВЧ-нагрівання–ІЧ-нагрівання; ІЧ-нагрівання–НВЧ-нагрівання. Наведемо низку прикладів створення комбінованого теплового процесу, що дозволяє реалізувати переваги різноманітних способів теплової обробки з одержанням готової продукції високої якості. У харчових продуктів, які пройшли теплову обробку в НВЧ-шафах, відсутні специфічна кірочка і колір, характерні для смаження традиційним способом.

Подальша обробка цих продуктів у полі ІЧ-випромінювання (1...2 хвилини) дозволяє отримати виріб із специфічною кірочкою та кольором. Такий спосіб нагрівання може бути здійснений в одній і тій же шафі НВЧ, оснащень ІЧ-випромінювачами, або послідовно в двох апаратах – шафі НВЧ і шафі з ІЧ-випромінюванням (електрогрилі). У даному прикладі використання комбінованого нагрівання диктується, з одного боку, технологією (наявність кірочки і кольору), з іншого – економічними міркуваннями (енергія НВЧ-поля приблизно в два рази дорожча енергії ІЧ-поля).

Теоретично та практично доведена також техніко-економічна доцільність застосування комбінованих способів сушіння: НВЧ-нагрівання доповнюють вакуумуванням сушильної камери (рис. 6.19), повітряним обдувом об'єкта, що висушується.

ЛЕКЦІЯ № 7 **ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ**

План

1. Класифікація теплообмінників.
2. Розрахунок теплообмінників.

7.1. Класифікація теплообмінників

Теплообмінники – це пристрої, в яких здійснюється теплообмін між середовищами, які гріють, і середовищами, які нагріваються. Для того, щоб розібратися в різноманітті теплообмінників, їх класифікують за низкою ознак.

У теплообмінних апаратах здійснюються майже всі види теплових процесів, тому залежно від функцій, що виконуються, їх можна поділити на

такі основні групи: нагрівачі, випарники та кип'ятильники, холодильники та конденсатори, випарні апарати, пастеризатори, регенератори, деаератори та ін.

Залежно від агрегатного стану робочих середовищ розрізняються теплообмінники:

– рідинно-рідинні – теплообмін між двома рідкими середовищами;

– парорідинні та парогазові – теплообмін між паром та рідиною або газом;

– газорідинні та газогазові – теплообмін між газом та рідиною або газом.

За способом передачі теплоти розрізняються теплообмінники поверхневі та змішувальні. У поверхневих теплообмінниках відбувається передавання теплоти через поверхню нагрівання. У змішувальних теплообмінниках здійснюється обмін теплотою під час безпосереднього змішування теплоносіїв.

Поверхневі теплообмінники бувають рекуперативні та регенеративні. У рекуператорах теплоносіїв і продукт, між якими відбувається теплообмін, знаходяться по різні боки стінки, що їх розділяє. У регенераторах одна і та сама поверхня апарата омивається по чергово то теплоносієм, то продуктом. Ці теплообмінники в харчовій промисловості широкого розповсюдження не отримали. Тому далі під назвою «поверхневі теплообмінники» або просто «теплообмінники» будемо мати на увазі рекуперативні теплообмінники.

За тепловим режимом розрізняються теплообмінники періодичної дії, в яких спостерігається нестационарний тепловий процес, і безперервної дії з процесом, що встановився у часі.

За конфігурацією поверхні теплообміну розрізняють теплообмінники: трубчаті, пластинчаті, спіральні, оболонкові та з оребреною поверхнею. Трубчаті теплообмінники, в свою чергу, поділяються на кожухотрубні, змішувальні, типу «труба в трубі», елементні секційні, зрошувальні та комбіновані.

Окрім наведених основних класифікаційних ознак теплообмінних апаратів останні можна класифікувати за низкою додаткових ознак.

Так, наприклад, за напрямом руху робочих середовищ розрізняють теплообмінники проточні, протитечійні, з перехресною течією і зі змішаною течією; за числом ходів теплоносія розрізняють теплообмінники однокходові та багатокходові; за жорсткістю конструкції – теплообмінники жорсткого, напівжорсткого та нежорсткого типів.

Відповідно з класифікаційною схемою і стандартами, прийнято індексацію теплообмінних апаратів, що дає відомості про їх призначення, тип, виконання, основні параметри та розміри. Наведемо індексацію найбільш розповсюдженого у харчовій технології теплообмінника – кожухотрубного.

За технологічним призначенням передбачають чотири види кожухотрубних апаратів: випарники **В**, конденсатори **К**, холодильники **Х** і теплообмінники **Т**. Друга літера умовної позначки показує наявність конструкційних пристроїв для компенсації температурних деформацій: **Н** – з нерухомими трубними решітками; **К** – з температурним компенсатором на кожусі; **П** – з плаваючою головкою; **У** – з U-подібними трубами; **ПК** – з плаваючою головкою і компенсатором на ній. Теплообмінники повинні

вироблятися в такому виконанні: *Г* – горизонтальні; *В* – вертикальні; для вибухо- і пожежобезпечних середовищ та середовищ, що не мають токсичності – група *А*, для вибухо- і пожежонебезпечних середовищ та середовищ із токсичністю – група *Б*. Виготовлення теплообмінника за видом матеріалів вказане в ДГСТ 15122-79, ДГСТ 14245-69. Теплообмінники можуть бути виготовлені одно-, дво-, чотири-, шестиходовими у трубному просторі, з перегородками або без них у міжтрубному просторі.

Наприклад, умовна позначка теплообмінника *Т* типу *Н* горизонтального *Г*, з кожухом діаметром 800 мм на умовний тиск 16 МПа, виконання за видом матеріалу *МІ*, з теплообмінними трубами діаметром 20 мм і довжиною 6 м, чотириходового, для вибухо- і пожежонебезпечних середовищ: теплообмінник 800 ТНГ-16-МІ-0/20-6-4 гр. Б (ДГСТ 15122-79).

7.2 Конструкції теплообмінників

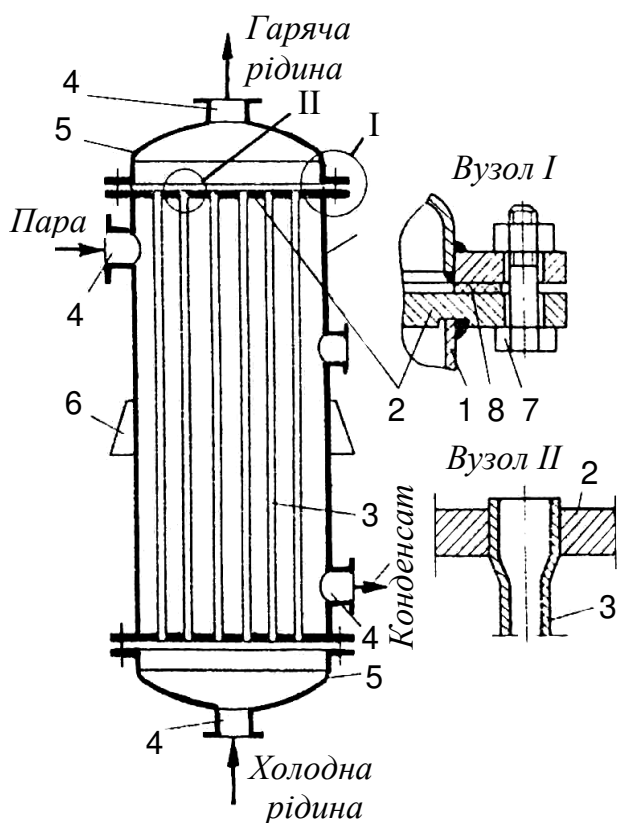


Рисунок 7.1 – Кожухотрубний теплообмінник

Кожухотрубні теплообмінники. Ці теплообмінники отримали у промисловості найбільше застосування завдяки своїй компактності, простоті у виготовленні та надійності у роботі. Вони використовують для теплообміну між потоками у різноманітних агрегатних станах: пара-рідина, рідина-рідина, газ-газ, газ-рідина.

На рис. 7.1 показано вертикальний одноходовий теплообмінник жорсткої конструкції, що складається з циліндричного корпусу (або кожуха) 1 та

Теплообмінники із оболонками.

Дані апарати із оболонками дуже часто застосовуються для періодичного нагрівання або охолодження (наприклад, для підігрівання та уварювання кондитерських мас). Технологічний процес у них може здійснюватися під тиском (автоклави), під розрідженням (вакуум-апарати) і при атмосферному тиску (варильні котли).

Апарати мають циліндричні, сферичні або плоскі подвійні стінки, що утворюють герметично замкнений простір – водяну або парову оболонку. Для інтенсифікації теплообміну з боку продукту, що обробляється, апарати можуть обладнуватися механічними мішалками, а для вивантаження продукту – пристроєм для перевертання. Звичайно апарати з паровою оболонкою працюють під тиском, що не перевищує 0,5 МПа.

приварених до нього трубних решіток 2 з пучком труб 3. Пучок труб поділяє весь об'єм корпусу теплообмінника на трубний простір, укладений всередині гріючих труб, та міжтрубний простір.

До корпусу приєднані герметично за допомогою прокладок 8 і болтового сполучення 7 два днища 5. Для введення та виведення теплоносіїв корпус і днища мають патрубки 4. Один потік теплоносія, наприклад, рідина, спрямовується в трубний простір, проходить по трубках і виходить із теплообмінника через патрубок у верхньому днищі. Інший потік теплоносія, наприклад пара, рухається у міжтрубному просторі теплообмінника, омиваючи ззовні пучок гріючих труб. При цьому середовище, що гріється, спрямовують знизу вгору, а середовище, що віддає теплоту, – в протилежному напрямку.

Гріючі труби з'єднуються з трубними решітками зварюванням, пайкою або розвальцьовані в них. Гріючі труби виготовляють із сталі, міді або латуні. Труби в решітках, звичайно, розміщують рівномірно по периметрах правильних шестикутників, що забезпечує компактність розташування. Інколи труби розміщують по концентричних колах. За необхідності забезпечення очищення зовнішніх поверхонь труб застосовується коридорне розташування – по боках квадратів.

Теплообмінник, зображений на рис. 7.1, є вертикальним, одноходовим. Унаслідок великого сумарного прохідного перерізу труб і міжтрубного простору швидкості протікання теплоносіїв невеликі, і коефіцієнти тепловіддачі в цьому теплообміннику порівняно низькі. Для збільшення швидкості протікання (інтенсифікації теплообміну) у трубному і міжтрубному просторах встановлюють перегородки, які зменшують переріз потоку теплоносіїв. На рис. 7.2 подано такий багатоходовий теплообмінник, що має два ходи у трубному просторі та п'ять ходів у міжтрубному.

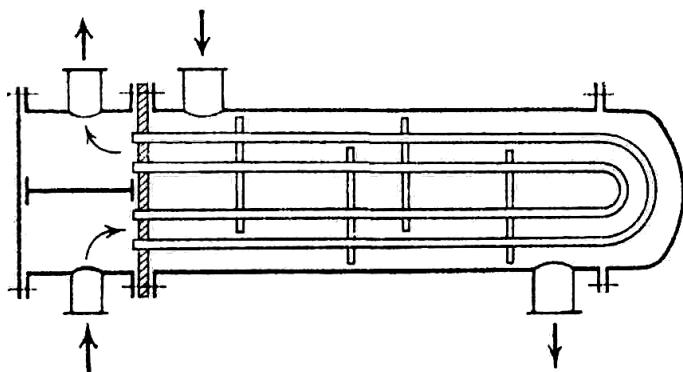


Рисунок 7.2 – Багатоходовий кожухотрубний теплообмінник з U-подібними трубками

Кожухотрубні теплообмінники розташовуються вертикально або горизонтально за допомогою опорних лап 6 (рис. 7.2).

За різниці температур між теплоносіями понад 50°C за рахунок неоднакових температурних подовжень у зварювальних швах приєднання кожухів до трубних решіток, а також у місцях приєднань труб у решітках виникають значні

напруження, що можуть перевищити межу міцності матеріалу. У результаті з'являються нещільності, порушується герметичність. Для компенсації неоднакового подовження труб і корпусу апарата застосовують конструкції теплообмінників із лінзовими компенсаторами, з плаваючою головкою, з U-подібними трубами (рис. 7.2), а також із сальниковими пристроями. Поверхня

нагрівання кожухотрубних теплообмінників може складати 1200 м^2 з довжиною труб від 1 до 9 м; умовний тиск досягає 6,4 МПа.

Елементні теплообмінники. Найпростіший двотрубний тепло-обмінник типу «труба в трубі» (рис. 7.3) складається з двох труб: внутрішньої труби 1 меншого діаметра і зовнішньої труби 4 більшого діаметра. Звичайно складають послідовно один із іншим у батарею декілька таких простих теплообмінних елементів за допомогою фланцевих з'єднань 3 і колін (калачів) 2.

У двотрубних теплообмінниках можна створити високі швидкості теплоносія та продукту. У зв'язку з цим апарати характеризуються порівняно високим коефіцієнтом теплопередачі. Проте ці теплообмінники громіздкі та металомісткі.

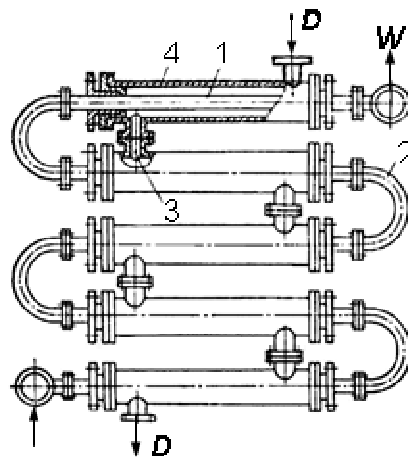


Рисунок 7.3.- Теплообмінник типу «Труба в трубі»

Змійовикові теплообмінники. Теплообмінний елемент – змійовик – це труба 1, зігнута будь-яким чином і поміщена в посудину 2 (рис. 7.4). При цьому змійовик занурено в рідину, яка нагрівається або охолоджується теплоносієм, що рухається по змійовику. У змійовиковому вакуум-апараті для уварювання кондитерських мас по змійовику проходить продукт. Змійовикові теплообмінники виготовляються з плоским змійовиком або зі змійовиком, зігнутим у вигляді гвинтової лінії.

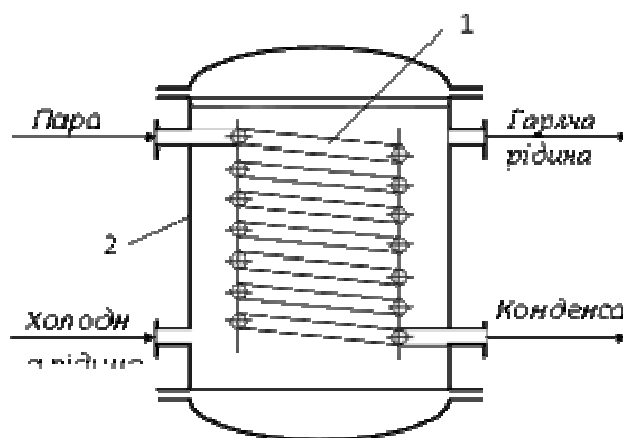


Рисунок 7.4.- Змійовиковий теплообмінник

Теплообмінники відрізняються простотою конструкції. У той же час у них ускладнено очищення внутрішньої поверхні зігнутої труби, змійовик має великий гідравлічний опір.

Зрошувальні теплообмінники. Зрошувальний теплообмінник (рис. 7.5) – це змійовик 2, зігнутий у вертикальній площині, розподільний жолоб з отворами 1 та піддон 3. Рідина з розподільного жолоба витікає на верхній виток змійовика, омиває зовнішню поверхню труб змійовика та стікає в піддон під змійовиком. Залежно від температури середовища, що протікає всередині змійовика, рідина, що омиває трубки, нагрівається або охолоджується.

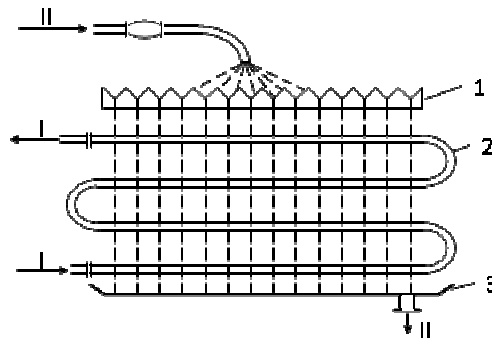


Рисунок 7.5 – Зрошувальний теплообмінник

Позитивна якість цих теплообмінників полягає в простоті обслуговування і невеликій витраті охолоджуючого агента (води), що використовується багаторазово. Недоліки зрошувальних теплообмінників: громіздкість, значна металомісткість та низькі значення коефіцієнта теплопередачі. Застосовуються для охолодження пива, молока та інших рідин, у холодильній техніці як конденсатор.

Спіральні теплообмінники. У спіральному теплообміннику (рис. 7.6) поверхня теплообміну утворюється двома металевими листами 1 і 2, згорнутими у вигляді спіралі. Внутрішні кінці листів приварені до глухої перегородки 3, а їхні зовнішні кінці зварені один із одним.

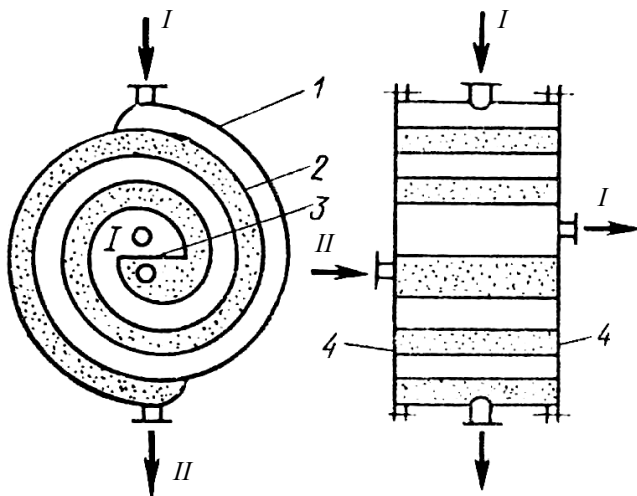


Рисунок 7.6 – Спіральний теплообмінник

Торці спіралі закриті встановленими на прокладках плоскими кришками 4. Біля зовнішніх кінців спіралей та в центрі кришки приварені патрубки для введення і виведення теплоносіїв.

Спіральний теплообмінник має високий коефіцієнт теплопередачі, незначний гідравлічний опір і відрізняється компактністю. Проте він складний у виготовленні та непридатний для роботи під тиском більше 1 МПа.

Пластинчаті теплообмінники знайшли широке застосування для охолодження та підігрівання різноманітних рідин (молока, соків, вина, пива та ін.) з робочими температурами до 300° С з тиском до 1,6 МПа.

Теплообмінник (рис. 7.7) складається з пакету гофрованих металевих пластин. Між пластинами утворюються герметичні канали 1, в яких здійснюється протиточна течія гарячого і холодного теплоносіїв. Пластини гофровані для того, щоб збільшити поверхню теплообміну і створити турбулентну течію рідини у вузьких каналах, відстань між якими дорівнює 3...10 мм. Пластини відокремлюються одна від одної прокладками 2 і мають два отвори по кутах для входу і виходу одного теплоносія, що циркулює в герметичному каналі. Через два інших кутових отвори в пластині втікає і витікає інший теплоносіїв. Пластини стягнуті зажимами.

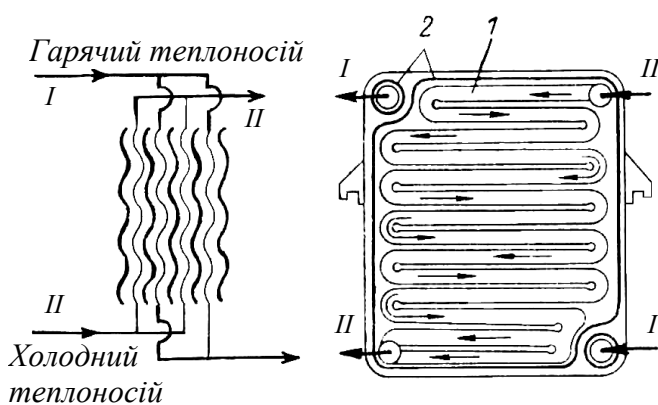


Рисунок 7.7 – Пластинчатий теплообмінник

Унаслідок високих швидкостей руху рідини між пластинами досягається високе значення коефіцієнта теплопередачі з малим гідравлічним опором.

Випускаються різноманітні модифікації теплообмінників цього типу з пластинами зі сталі різних марок, алюмінію, титану та інших металів, розбірної та нерозбірної конструкцій з поверхнями теплообміну від 0,4 до 600 м².

7.3. Розрахунок теплообмінників

Розрізняють два види розрахунку теплообмінників: проектний і перевірний. Проектний розрахунок виконується при проектуванні нового теплообмінника, коли задано кількість продукту, що охолоджується або нагрівається, і його параметри. Мета проектного розрахунку – визначення необхідної поверхні теплообміну, витрати теплоносія або холодоагенту, конструктивних розмірів обраного апарата, його гідравлічного опору та механічної міцності.

За допомогою перевірного розрахунку виявляють можливість використання наявних теплообмінників в умовах заданого процесу і визначають умови, що забезпечують оптимальний режим роботи апарата.

Проектний розрахунок включає вибір типу та конструкції теплообмінного апарата, тепловий, конструктивний, гідравлічний, механічний та техніко-економічний розрахунки.

Тепловий розрахунок теплообмінників *полягає у визначенні необхідної поверхні теплообміну з основного рівняння теплопередачі.*

$$s = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{сер.}}},$$

де Q – теплове навантаження теплообмінного апарата, Вт; K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); $\Delta t_{\text{сер.}}$ – середній температурний напір, °С.

Визначення теплового навантаження і витрат теплоносіїв

Теплове навантаження теплообмінника визначають з рівняння теплового балансу. Рівняння теплового балансу в загальному вигляді без обліку втрат теплоти в довкілля (що звичайно не перевищують 5%), виражається рівністю:

$$Q = Q_{\text{прих}} = Q_{\text{вит}}, \quad (7.1)$$

де $Q_{\text{прих}}$ – кількість теплоти, відданої гарячим теплоносієм, Вт; $Q_{\text{вит}}$ – кількість теплоти, одержаної холодним теплоносієм, Вт.

Залежно від конкретного процесу теплові баланси мають різний вигляд.

а) теплообмін протікає без зміни агрегатного стану теплоносіїв.

Тоді:

$$Q_{\text{прих}} = G_1 c_1 (t_{1n} - t_{1k}), \quad (7.2)$$

$$Q_{\text{вит}} = G_2 c_2 (t_{2k} - t_{2n}), \quad (7.3)$$

де G_1 – витрата гарячого теплоносія, кг/с; c_1 – середня питома теплоємність гарячого теплоносія, Дж/(кг·К); t_{1n} і t_{1k} – початкова і кінцева температури гарячого теплоносія, °С; G_2 – витрата холодного теплоносія, кг/с; c_2 – середня питома теплоємність холодного теплоносія, Дж/(кг·К); t_{2n} і t_{2k} – температура холодного теплоносія на вході в апарат і на виході з нього, °С.

Таким чином, рівняння теплового балансу набуде вигляду:

$$G_1 c_1 (t_{1n} - t_{1k}) = G_2 c_2 (t_{2k} - t_{2n}). \quad (7.4)$$

З рівняння (7.4) визначається витрата теплоносіїв або невідома температура одного з теплоносіїв. Наприклад, якщо невідома витрата холодного теплоносія (для холодильників), вона визначається, як:

$$G_2 = \frac{G_1 c_1 (t_{1n} - t_{1k})}{c_2 (t_{2k} - t_{2n})}. \quad (7.5)$$

За необхідності визначення кінцевої температури гарячого теплоносія, отримаємо:

$$t_{1k} = t_{1n} - \frac{G_2 c_2 (t_{2k} - t_{2n})}{G_1 c_1}. \quad (7.6)$$

б) теплообмін протікає при зміні агрегатного стану одного з теплоносіїв (наприклад: нагрівання холодного теплоносія відбувається за рахунок

конденсації гріючої водяної пари). Теплове навантаження визначиться виразами:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{прих}} &= D (i_{1n} - i_{1к}) = D \cdot r, \\ Q_{\text{вит}} &= G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n}). \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

Рівняння теплового балансу:

$$D (i_{1n} - i_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n}) \quad (7.8)$$

або

$$D \cdot r = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n}),$$

де D – витрата пари, кг/с; i_{1n} – ентальпія гріючої пари (визначається з таблиць насиченої водяної пари), Дж/кг; $i_{1к}$ – ентальпія конденсату, Дж/кг; r – теплота пароутворення (конденсації) води, Дж/кг.

Тоді витрата гріючої пари:

$$D = \frac{G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n})}{(i_{1n} - i_{1к})} = \frac{G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n})}{r}. \quad (7.9)$$

Якщо врахувати тепловтрати від стінок апарата в довкілля $Q_{\text{вт}}$, що складають 2...5% від підведеної теплоти, за допомогою коефіцієнта $\eta = 0,95...0,98$, то рівняння теплового балансу запишеться так:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{вит}} + Q_{\text{вт}}.$$

Вираз (7.9) зміниться на такий:

$$D = \frac{G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n})}{(i_{1n} - i_{1к}) \eta} = \frac{G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2n})}{r \cdot \eta}. \quad (7.10)$$

в) теплообмін протікає при зміні агрегатного стану обох теплоносіїв (наприклад, у випарникові). Нагрівання холодного теплоносія здійснюється зі зміною його агрегатного стану, тобто рідина переходить у пару, в той же час гарячий теплоносій (наприклад, насичена пара), віддаючи теплоту, також змінює агрегатний стан – конденсується:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{прих}} &= D (i_{1n} - i_{1к}), \\ Q_{\text{вит}} &= Q_H + Q_в + Q_{\text{вт}}, \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

де Q_H – теплота, що витрачається на нагрівання холодного теплоносія до температури кипіння, Вт; $Q_в$ – теплота, що витрачається на випаровування киплячої рідини, Вт.

$$Q_H = Gc (t_s - t_1), \quad (7.12)$$

$$Q_g = G \cdot r, \quad (7.13)$$

де G – витрата холодного теплоносія, кг/с; c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К); t_s – температура кипіння холодного теплоносія, °С; t_1 – початкова температура холодного теплоносія, °С; r – теплота пароутворення теплоносія, Дж/кг.

Рівняння теплового балансу:

$$D (i_{1n} - i_{1k}) \eta = Gc (t_s - t_1) + G \cdot r. \quad (7.14)$$

Витрата грючої пари, (кг/с):

$$D = \frac{Gc (t_s - t_1) + G \cdot r}{(i_{1n} - i_{1k}) \cdot \eta}. \quad (7.15)$$

г) при конденсації перегрітої пари з подальшим охолодженням конденсату теплове навантаження буде дорівнювати:

$$Q_{прих} = Q_{пер} + Q_{конд} + Q_{охол}, \quad (7.16)$$

де $Q_{пер}$ – теплота, що виділяється під час охолодження перегрітої пари від t_{nn} до насиченого стану $t_{nn} = t_s$, Вт; $Q_{конд}$ – теплота, що виділяється під час конденсації насиченої пари, Вт; $Q_{охол}$ – теплота, що виділяється під час охолодження гарячої рідини від t_s до заданої температури t_1 , Вт.

Теплота від гарячого теплоносія частіше за все відводиться холодною водою:

$$Q_{вит} = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}).$$

Якщо

$$Q_{пер} = G_1 c_p (t_{nn} - t_s), \quad (7.17)$$

$$Q_{конд} = G_1 r_1, \quad (7.18)$$

$$Q_{охол.} = G_1 c_1 (t_s - t_1), \quad (7.19)$$

то рівняння теплового балансу набуде такого виду:

$$G_1 c_p (t_{nn} - t_s) + G_1 r_1 + G_1 c_1 (t_s - t_1) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}), \quad (7.20)$$

де G_1 – витрата гарячого теплоносія, кг/с; c_p – масова теплоємність перегрітої пари при постійному тиску, Дж/(кг·К); r_1 – теплота конденсації гарячого теплоносія, Дж/кг; c_1 – масова теплоємність рідкого гарячого теплоносія, Дж/(кг·К).

Якщо вода, що охолоджується, подається в міжтрубний простір і зовнішні стінки апарата мають температуру, що мало відрізняється від температури навколишнього середовища, то теплові втрати дуже малі й тому їх не враховують.

З рівняння (7.20) визначається витрата води, що охолоджує:

$$G_2 = \frac{G_1 c_p (t_{nn} - t_s) + G_1 r_1 + G_1 c_1 (t_s - t_1)}{c_2 (t_{2к} - t_{2н})}. \quad (7.21)$$

Якщо у процесі теплообміну є додаткові умови, а ускладнюють процес, наприклад, додатковий прибуток або витрата теплоти за рахунок хімічних реакцій чи перетворень речовини, то під час обчислення теплового балансу їх треба врахувати.

Визначення рушійної сили теплообміну, тобто середньої різниці температур

Розрахунок температурного режиму теплообмінного апарата складається з визначення середньої різниці температур, обчислення середніх температур теплоносіїв (робочих середовищ), а також визначення температури стінок апарата. Під час розрахунку температурного режиму теплообмінника необхідно спочатку встановити характер зміни температур теплоносіїв, обрати схему їхнього руху так, щоб отримати більшу середню різницю температур. Це забезпечить найсприятливіші умови теплопередачі та мінімальну температуру стінок апарата.

Величина середнього температурного напору залежить від схеми руху теплоносіїв вздовж поверхні теплообміну. Середній температурний напір під час проточечії та протитечії, а також із постійною температурою одного з теплоносіїв визначається як середньологарифмічна різниця:

$$\Delta t_{сеп.} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{м}}{2,3 \lg \left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{м}} \right)},$$

де Δt_{δ} , $\Delta t_{м}$ – більша і менша різниці температур між гарячим і холодним теплоносіями на кінцях теплообмінника.

Якщо $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{м}} < 2$, то середній температурний напір визначається як середньоарифметична величина:

$$\Delta t_{сеп.} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{м}}{2}.$$

Для складних схем руху теплоносіїв, тобто під час перехресного та змішаного потоків, потрібно визначити середню різницю температур так же, як під час протитечії, а після цього ввести поправний коефіцієнт ϵ_{Δ} . Величина ϵ_{Δ} лежить у межах 0,65...1,0. Визначення середньологарифмічної різниці температур зручно виконувати за допомогою спеціальної номограми (рис. 7.8).

Середня різниця температур під час періодичного процесу нагрівання (або охолодження) в апараті:

$$\Delta t_{сеп.} = \frac{t'_1 - t'_2}{2,3 \lg [(t'_1 - t''_1) / (t''_2 - t'_2)]} \cdot \frac{A - 1}{2,3 \lg A}, \quad (7.22)$$

де t'_1 і t''_1 – початкова та кінцева температури рідини, що нагріває, °С; t'_2 і t''_2 – початкова і кінцева температури теплоносія що нагрівається, °С.

$$A = \frac{(t - t_1'')}{(t - t_2'')}, \quad (7.23)$$

де t – температура гріючого (або охолоджуючого) теплоносія в будь-який момент часу, °С.

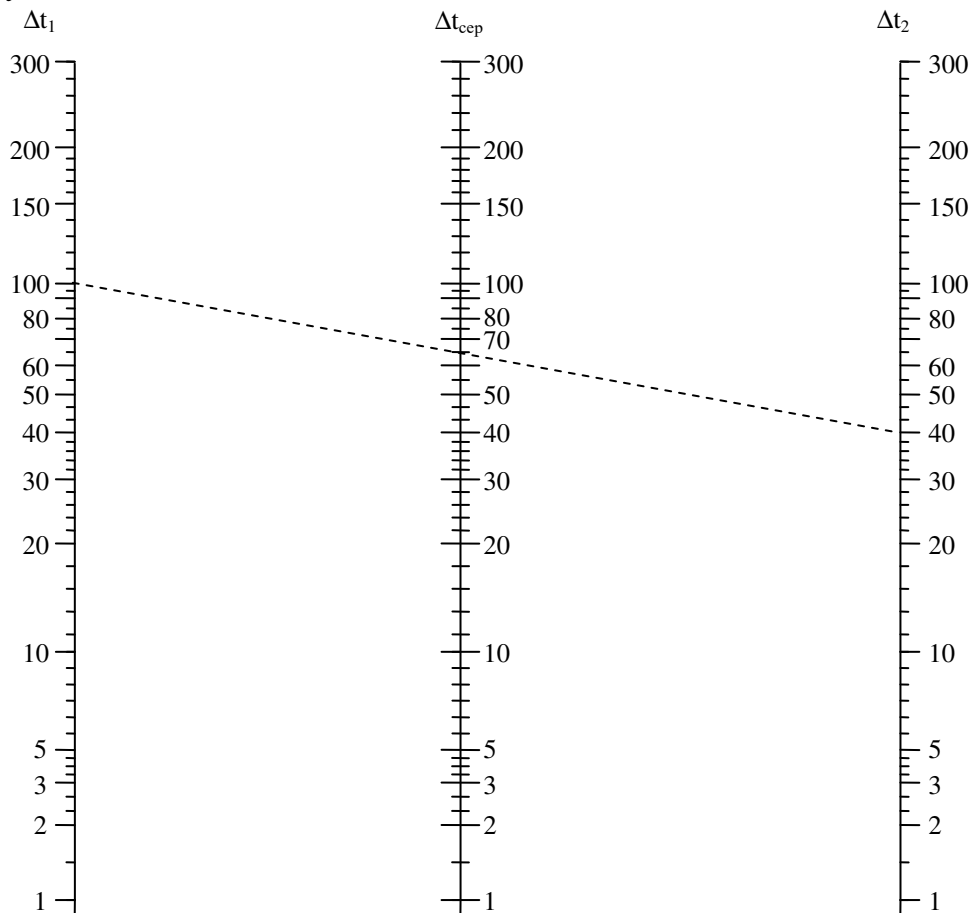


Рисунок 7.8 – Номограма для визначення середнього температурного напору

Визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі

Для деяких конструкцій теплообмінників є свої специфічні рівняння. Так, наприклад, коефіцієнт тепловіддачі під час руху рідкого теплоносія в міжтрубному просторі кожухотрубних теплообмінників визначається за рівнянням

$$Nu = c (d_e Re)^{0,6} Pr^{0,33}, \quad (7.24)$$

де коефіцієнт $c = 1,16$, якщо немає перегородок, і $c = 1,72$, якщо є сегментні перегородки; d_e – еквівалентний діаметр міжтрубного простору, м.

У рівнянні (7.24) визначальним розміром є еквівалентний діаметр.

Коефіцієнт тепловіддачі в апаратах зі зміювиками, оболонками та мішалкою визначається за рівнянням:

$$Nu = c Re^m Pr^{0,33} \left(\frac{\eta}{\eta_{cm}} \right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1}, \quad (7.25)$$

де $Nu = \alpha d_m / \lambda$; $Re = \rho n d_m^2 / \eta$; $\Gamma = D / d_m$; D – діаметр посудини, м; n – частота обертання мішалки, 1/с; d_m – діаметр кола, що обмітається мішалкою, м; η_{cm} і η – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини відповідно за температури стінки оболонки або зміювика і за середньої температури, що дорівнює $0,5 (t_{c.p.} + t_{cm})$.

Коефіцієнт теплопередачі для плоскої поверхні теплообміну визначається за формулою:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}.$$

Як вже було відзначено, це рівняння можна з достатнім ступенем точності застосовувати для розрахунку теплопередачі через циліндричну стінку (при $d_3 / d_e < 2$).

Вплив забруднення поверхні теплообміну враховують введенням коефіцієнта використання поверхні. Тоді дійсний коефіцієнт теплопередачі буде:

$$K = \varphi K_p, \quad (7.26)$$

де K_p – розрахункове значення коефіцієнта теплопередачі з чистою поверхнею нагрівання; φ – коефіцієнт використання поверхні теплообміну, що враховує вплив забруднення і неповноту омивання поверхні нагрівання теплоносіями. Для більшості апаратів $\varphi = 0,65 \dots 0,85$.

При визначенні коефіцієнтів тепловіддачі в низці випадків необхідно знати температуру стінки. Оскільки на початку обчислення ця величина невідома, її обирають, а після закінчення обчислення перевіряють за відповідними формулами. Температуру стінки з боку гарячого теплоносія перевіряють за формулою:

$$t_{cm1} = t_1 - \left(\frac{K \Delta t_{cp.}}{\alpha_1} \right), \quad (7.27)$$

де t_1 – температура гарячого теплоносія, °С.

З боку холодного теплоносія:

$$t_{cm2} = t_2 - \left(\frac{K \Delta t_{cp.}}{\alpha_2} \right), \quad (7.28)$$

де t_2 – температура холодного теплоносія, °С.

Конструктивний розрахунок теплообмінників

Завдання конструктивного розрахунку теплообмінних апаратів – визначення їх основних розмірів. Він виконується залежно від типу апарата. Детальний розрахунок проводиться в тому випадку, якщо немає можливості обрати стандартний теплообмінник серійного виробництва. Під час вибору стандартного теплообмінника конструктивний розрахунок зводиться до визначення поверхні теплообміну і основних параметрів. Конструктивний розрахунок кожухотрубного теплообмінника включає розрахунок проточної

частини трубного простору, вибір розміщення труб у трубних решітках, визначення діаметра корпусу апарата і діаметрів штуцерів. Виходячи з заданої продуктивності апарата та швидкості руху знаходять площу прохідного перерізу трубок одного ходу ($u \text{ м}^2$).

$$S_1 = \frac{G}{\rho v}, \quad (7.29)$$

де G – продуктивність (витрата рідини), кг/с; ρ – густина рідини, кг/м³; v – швидкість руху рідини всередині трубок, м/с.

Число трубок одного ходу:

$$n_1 = \frac{S_1}{0,785 d_g^2}, \quad (7.30)$$

де d_g – внутрішній діаметр трубки, м. Розрахункова довжина однієї трубки під час одного ходу дорівнює (u м):

$$L = \frac{S}{\pi d_p n_1}, \quad (7.31)$$

де d_p – розрахунковий діаметр труби; якщо α_1 і α_2 є величинами одного порядку, то:

$$d_p = 0,5 (d_3 + d_g). \quad (7.32)$$

Якщо $\alpha_1 \gg \alpha_2$ або $\alpha_1 \ll \alpha_2$, то за d_p приймається той діаметр труби, яким визначається поверхня, що омивається теплоносієм з малим α .

Кількість ходів трубного простору визначається як $Z = \frac{L}{l}$, де l – робоча довжина трубок: приймається за ДГСТ 9929-82; рекомендується брати $l = 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000, 9000$ мм.

Загальна кількість трубок, що розміщуються на трубних решітках визначають за формулою:

$$n = Z \cdot n_1.$$

Труби у трубних решітках розміщують по боках правильних шестикутників, квадратів і по концентричних колах. Найбільш розповсюджене розміщення труб по боках правильних шестикутників. При цьому:

$$n = 3a(a + 1) + 1,$$

де a – порядковий номер шестикутника (рахуючи від центру) або кола.

Кількість труб на діагоналі найбільшого шестикутника:

$$b = 2a + 1.$$

Загальна кількість труб повинна бути такою, щоб a та b були цілими числами. Відстань між центрами труб t згідно з ДГСТ 9929-82 залежить від їх діаметра і обирається у такому порядку:

- зовнішній діаметр труб d_3 , мм: 16, 20, 25, 38, 57;
- відстань отворів t , мм: 21, 26, 32, 48, 70;

Внутрішній діаметр корпусу апарата визначається за формулами:
одноходового

$$D_{\text{вн}} = t (e - 1) + 4d_n \quad \text{або} \quad D_{\text{вн}} = 1,1t\sqrt{n} \quad (7.33)$$

багатоходового

$$D_{\text{вн}} = 1,1t\sqrt{\frac{n}{\eta_3}}, \quad (7.34)$$

де $\eta_3 = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт заповнення трубної решітки. Розрахункове значення $D_{\text{вн}}$ округляють до найближчого більшого розміру діаметра, що рекомендується ДГСТом або нормами. Загальна висота кожухотрубного теплообмінника дорівнює сумі активної довжини труб і висоті двох розподільчих камер:

$$H = \ell + 2h \quad (7.35)$$

де $h = 200 \dots 400$ – висота розподільчої камери, мм.

Товщина трубних решіток $\delta_{\text{тр}} = 15 \dots 35$ мм залежить від діаметра розвальцьованих труб. Для сталевих решіток мінімальне значення:

$$\delta_{\text{тр}} = \frac{d_3}{8} + 5 \text{ мм}. \quad (7.36)$$

Діаметри патрубків визначають із рівняння витрати:

$$d_n = 1,13 \sqrt{\frac{G}{\rho v}}, \quad (7.37)$$

де G – витрата теплоносія, кг/с; ρ – густина, кг/м³; v – швидкість теплоносія в патрубку (для рідини $v = 0,5 \dots 1,5$; для пари та газів $v = 10 \dots 40$), м/с.

Конструктивний розрахунок теплообмінника типу «труба в трубі» виконується з вихідними даними: поверхнею теплообміну S і довжиною одного елемента l .

Діаметр внутрішньої труби визначається за формулою (7.37).

Внутрішній діаметр зовнішньої труби визначається за формулою:

$$D = \sqrt{\left(\frac{S_k}{0,785}\right) + d_3^2}, \quad (7.38)$$

де $S_k = G_I / (\rho_I V_I)$ – площа перерізу кільцевого простору, м²; G_I – витрата теплоносія, кг/с; ρ – густина нагріваючого теплоносія, кг/м³; v – швидкість руху нагріваючого теплоносія у міжтрубному просторі, м/с.

Діаметри труб d і D після розрахунку слід прийняти за ДГСТ 9930-78. Перерізи прийнятих труб повинні за необхідності відповідати турбулентному режиму руху рідин ($Re > 10^4$). Якщо за розрахунками $Re < 10^4$, то задають нові швидкості руху теплоносіїв і розрахунки d і D повторюють.

Загальна довжина труби, рахуючи за зовнішнім діаметром,

$$L = \frac{S}{\pi d_3}. \quad (7.39)$$

Приймаючи довжину теплообмінної поверхні рівною довжині кожухової труби, визначається кількість елементів теплообмінника:

$$n = \frac{L}{l_1},$$

де l_1 – прийнята довжина одного елемента (рекомендується 1,5; 3,0; 4,5; 6,0; 9,0; 12,0 м).

Конструктивний розрахунок змієвикових теплообмінників включає визначення загальної довжини L , кількості витків n і висоти H змієвика. Для виконання розрахунку повинні бути задані площа поверхні теплообміну S , середній діаметр трубки d_p , з якої навивається змієвик, діаметр витка змієвика D_{zm} та відстань між осями сусідніх витків h (звичайно $h = (1,5 \dots 2) d_p$).

Загальна довжина трубки змієвика:

$$L = \frac{S}{\pi d_p}.$$

Довжина одного витка:

$$l = \sqrt{(\pi D_{zm})^2 + h^2} \approx \pi D_{zm}. \quad (7.40)$$

Кількість витків змієвика:

$$n = \frac{L}{l}. \quad (7.41)$$

Загальна висота змієвика:

$$H = n \cdot h. \quad (7.42)$$

Внутрішній діаметр D корпусу теплообмінника, в який занурюється змієвик:

$$D = D_{zm} + (3 \dots 4) d_z, \quad (7.43)$$

де d_z – зовнішній діаметр труби змієвика.

Гідрравлічний розрахунок теплообмінників

Метою розрахунку є визначення величини гідравлічного опору, що вноситься теплообмінником у систему теплотехнічних трубопроводів, і визначення потужності, необхідної для переміщення теплоносіїв. Втрата тиску Δp (у Па) під час проходження теплоносіїв у трубному і міжтрубному просторах складається з втрат на опір тертю Δp_l та на місцеві опори Δp_m , а також залежить від конструкції апарата:

$$\Delta p = \Delta p_l + \Delta p_m = \left(\lambda \frac{L}{d_e} + \Sigma \xi \right) \frac{v^2 \rho}{2},$$

де v – швидкість руху теплоносія, м/с; ρ – густина теплоносія, кг/м³; λ – коефіцієнт тертя; L – довжина труби або каналу, м; d_e – еквівалентний діаметр труби, каналу, міжтрубного простору, м; ξ – коефіцієнт місцевого опору.

Місцеві опори пов'язані з різноманітними змінами форми та перерізів каналу. Значення коефіцієнтів місцевих опорів наведено у відповідних літературних джерелах.

Потужність на валу насоса (або вентилятора), необхідну для переміщення теплоносія через апарат, обчислюють за формулою:

$$N = \frac{G \Delta p}{\rho \eta},$$

де G – масова витрата теплоносія, кг/с; η – ККД насоса (або вентилятора).

Механічний розрахунок теплообмінників

Механічний розрахунок складається з перевірки на міцність окремих вузлів та деталей і зводиться до визначення їх номінальних розрахункових розмірів (товщини стінок, фланців і т. ін.), що повинні забезпечити їм необхідну довговічність. Розрахунок основних елементів (обичайок, днищ, оболонок, фланців, трубних решіток, опор, компенсаторів, перемішувальних пристроїв) теплообмінних апаратів за однакових умов діючих навантажень здійснюється за одними і тими ж формулами.

Товщина стінки циліндричної обичайки δ (у м), працюючої під внутрішнім тиском, розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{p D_e}{2 \beta [\delta] - p} + \delta_c, \quad (7.44)$$

де p – внутрішній тиск в апараті, МПа; D_e – внутрішній діаметр посудини або апарата, м; β – коефіцієнт міцності зварних сполучень ($\beta = 0,65 \dots 0,85$); $[\delta]$ – напруга, що допускається при розтягуванні для матеріалу стінки апарата, МПа; δ_c – надбавка на корозію до товщини стінки апарата ($\delta_c = 0,001 \dots 0,004$ м).

ЛЕКЦІЯ № 8 ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ЗІ ЗМІНЕННЯМ АГРЕГАТНОГО СТАНУ

План

1. Випаровування.
2. Кипіння.
3. Випарювання.
4. Конденсація.
5. Охолодження, заморожування та розморожування.

8.1. Випаровування

Випаровування – перехід речовини з рідкого або твердого стану в газоподібний шляхом підведення до неї теплоти.

Причиною випаровування з вільної поверхні рідини є тепловий рух її молекул. Після нагрівання рідини до відповідної температури в ній з'являються

молекули, що мають енергію, яка дозволяє їм подолати сили зчеплення і піти в довкілля. Проте не всі ці молекули залишаються в довкіллі – після зіткнення з молекулами газу частина їх повертається до поверхні випаровування. У свою чергу, молекули, що повертаються, можуть бути поділені на дві частини. Молекули з досить високою кінетичною енергією, переборюючи значні сили зчеплення поверхневого шару рідини, проникають всередину та залишаються у ній. Інша частина молекул із менш високим енергетичним рівнем відбивається від поверхні рідини і остаточно залишається у довкіллі. Нарівні з випаровуванням рідини можливе випаровування твердого тіла. Перехід речовини з твердої фази у газоподібну, минаючи рідку фазу, називається сублімацією. Для реалізації процесу сублімації необхідно, щоб температура твердого тіла була меншою від його температури в потрійній точці фазової діаграми. Як сублімуючий матеріал під атмосферним тиском і відповідних температурних умовах можуть виступати сухий лід, нафталін, графіт та інші матеріали. За фізичною сутністю процес сублімації аналогічний процесу випаровування рідини. У харчовій технології сублімація широко використовується в сушильних процесах під час так званого сублімаційного сушіння.

Розглянемо теплові потоки, що виникають біля поверхні рідини під час її випаровування в парогазове середовище. Слід відзначити, що процес теплообміну при цьому супроводжується процесом переносу маси речовини. Якщо газоподібне середовище не насичене паром, то масовий потік спрямований від поверхні випаровування. Напрямок теплового потоку визначається різницею температур поверхні рідини T_p і парогазового середовища T_c . Якщо $T_p > T_c$, то тепловий потік спрямований від рідини в парогазове середовище. При цьому випаровування рідини відбувається за рахунок внутрішньої енергії, що призводить до зниження температури рідини, яка в будь-який момент стає рівною температурі парогазового середовища. Згідно з рівнянням $q_\alpha = \alpha(T_p - T_c)$ тепловіддача в цей момент припиниться, проте випаровування буде тривати, що призведе до подальшого зниження температури рідини. Випаровування рідини триває як за рахунок внутрішньої енергії, так і за рахунок конвективного потоку теплоти $q_\alpha = \alpha(T_c - T_p)$, що передається від парогазового середовища до рідини. У той же час від поверхні рідини в парогазове середовище відводиться потік теплоти з випарованою вологою. Густина цього теплового потоку:

$$q_\beta = r\beta_p(p_c - p_p), \quad (8.1)$$

де r – теплота пароутворення, Дж/кг; p_c – парціальний тиск парогазового середовища, Па; p_p – парціальний тиск рідини, Па.

Коефіцієнт $\beta_p = \frac{\beta_c}{RT}$, де β_c – коефіцієнт масовіддачі, м/с; R – газова постійна; T – температура довкілля, К.

У міру охолодження рідини величина q_α буде збільшуватися внаслідок зменшення T_p , а величина q_β – зменшуватися внаслідок зменшення парціального тиску p_c , що дорівнює тиску насиченої пари, відповідної температурі T_c .

Коли теплота, отримана рідиною від парогазового середовища, виявиться рівною теплоті, що витрачається на випаровування, зміна температури поверхні рідини припиниться. Процес випаровування, під час якого вся теплота, передана від парогазового середовища до рідини, витрачається на її випаровування і повертається в парогазове середовище з парою, називається процесом адіабатичного випаровування, а відповідна рівноважна температура поверхні рідини – температурою мокрого термометра T_m .

Температуру T_m можна визначити з рівняння теплового балансу:

$$q_\alpha = q_\beta,$$

$$\alpha(T_m - T_c) = r\beta_p(p_c - p_p).$$

На практиці частіше за все зустрічаються неадіабатичні процеси випаровування, під час яких деяка кількість теплоти q_w передається через поверхню випаровування в рідку фазу. Теплота q_w може йти на підігрівання рідини, що надходить на випаровування і частково витрачатися в навколишнє середовище через поверхню рідини.

У цьому випадку:

$$q_\alpha = q_\beta - q_w. \quad (8.2)$$

Рівняння теплового балансу на поверхні характеризує рівноважний стан системи і дозволяє визначити значення рівноважної температури поверхні рідини.

Розглянемо широко використовуване в практиці таке явище, як самовипаровування. У даному випадку випаровування здійснюється за рахунок теплоти, якою володіє рідина. Якщо гаряча рідина (розчин) з температурою T_1 , надходить в простір, де створено тиск, під час якого рідина кипить із меншою температурою T_s , то виявиться, що рідина має зайву теплоту, яка і витрачається на її випаровування. Якщо рідина – водний розчин, то випаровується вода. Таке явище носить назву самовипаровування розчину. Кількість теплоти Q , що виділяється розчином, визначається рівнянням:

$$Q = Gc(T_1 - T_s), \quad (8.3)$$

де G – кількість розчину, кг; c – теплоємність розчину, Дж/(кг·К).

Цю теплоту сприйме вода, що випаровується:

$$Q = W \cdot r, \quad (8.4)$$

де W – кількість води, що випаровується, кг; r – теплота випаровування, Дж/кг.

Кількість самовипаровуваної води можна знайти з рівняння теплового балансу:

$$Gc(T_1 - T_s) = Wr,$$

$$W = \frac{Gc(T_1 - T_s)}{r}$$

Процес самовипаровування використовують при випарюванні в багатокорпусних випарних установках, а також для охолодження гарячих рідин. Це дуже інтенсивний процес. Встановлено, що зайву теплоту рідина втрачає протягом кількох секунд.

8.2. Кипіння

Кипінням називається процес переходу рідини, що знаходиться при температурі насичення T_s або дещо перегрітої відносно цієї температури, в пару всередині її об'єма з утворенням парових бульбашок. Процес пароутворення пов'язаний з підведенням теплоти, необхідної для фазового переходу рідини в пару, що називається теплотою пароутворення.

Рівняння теплового балансу під час кипіння рідини має вигляд:

$$Q = G \cdot r,$$

де Q – кількість підведеної теплоти, Дж; G – кількість пари, що утворюється, кг; r – теплота пароутворення, Дж/кг.

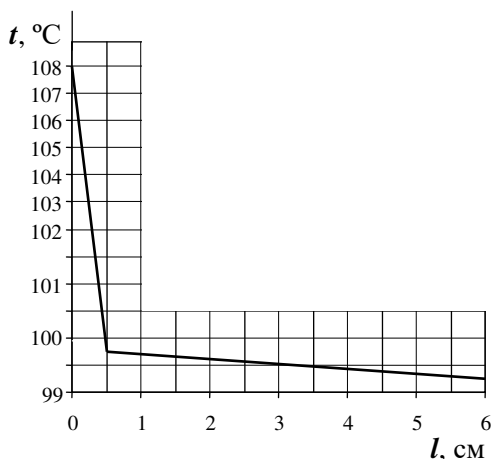


Рисунок 8.1 – Зміна температури в шарі киплячої рідини

Температура киплячої рідини T_p непостійна, вона зменшується у міру віддалення від поверхні нагрівання (рис. 8.1).

Характер зміни температури рідини T_p залежить від умов теплообміну з поверхнею нагрівання і між фазами (пара-рідина). На межі розділу фаз кипляча рідина завжди дещо перегріта, а біля поверхні нагріву має максимальну температуру, що дорівнює температурі стінки T_c . Основна зміна температури від T_c до T_p відбувається в пристінному пограничному шарі (2...5 мм) і тут перегрівання рідини $\Delta T = T_c - T_p$ досягає максимального значення. Для води перегрівання може досягнути 25°C . Основна маса рідини має незмінну температуру T_p .

Розрізняють кипіння в об'ємі рідини (об'ємне кипіння) і на поверхні нагрівання (поверхневе кипіння). У першому випадку бульбашки пари зароджуються в будь-якій точці об'єму рідини під час значного її перегріву відносно температури насичення ($T_p > T_s$), що можливо або під час різкого зниження тиску над рідиною, або за наявності в рідині внутрішніх джерел теплоти. У випадку поверхневого кипіння бульбашки пари утворюються тільки на поверхні нагрівання в окремих її точках – центрах пароутворення. Центрами пароутворення є нерівності поверхні нагрівання (мікровпадини, шорсткості,

тріщини), бульбашки газу або пари і найдрібніші тверді частинки. Для сучасної теплоенергетики характерне поверхневе кипіння на стінках труб, каналів, циліндричних, сферичних та інших поверхонь. Установлено існування двох основних видів поверхневого кипіння: бульбашкового і плівкового.

Під час бульбашкового кипіння на поверхні нагрівання періодично утворюються бульбашки пари, для зародження яких рідина повинна бути перегрітою. Бульбашки перегрітої пари, досягнувши розмірів 2...3 мм, відриваються від стінки і починають рухатися вгору під впливом підйомної архімедової сили, збільшуючись в об'ємі в десятки разів за рахунок інтенсивного випаровування навколишньої рідини. Об'єм бульбашки пари тим більший, чим вищий перегрів рідини і чим більший час спливання бульбашки. Встановлено, що приблизно 95% пари утворюється під час руху бульбашок у товщі рідини та 5% під час розвитку їх на поверхні нагрівання.

У процесі руху бульбашки рідина сильно перемішується, що призводить до інтенсифікації тепловіддачі. Природно, що зростає і коефіцієнт тепловіддачі α . Із збільшенням теплового потоку інтенсивність утворення бульбашок зростає, що веде до ще більшого зростання α . Нарешті настає період, коли парових бульбашок стає так багато, що вони починають зливатися між собою, утворюючи на поверхні нагрівання парову плівку. Ця парова плівка фактично відокремлює рідину від поверхні нагрівання, причому теплопровідність її значно менша теплопровідності рідини (в 20 разів і більше). Унаслідок малої теплопровідності пари в декілька разів зменшується тепловіддача від стінки до рідини, тому температура стінки різко зростає. Це явище носить назву кризи тепловіддачі та може призвести до руйнування поверхні нагрівання.

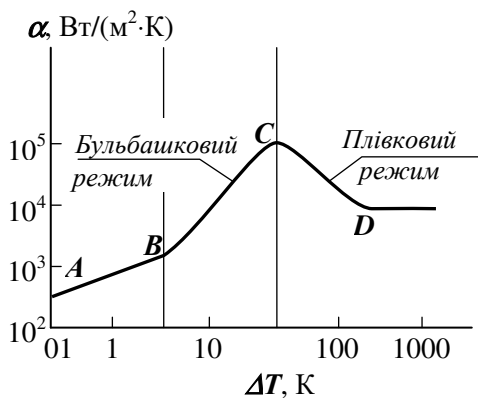


Рисунок 8.2 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від перегріву стінки

Графічну залежність коефіцієнта тепловіддачі α від перегріву стінки $\Delta T = T_c - T_s$ в логарифмічній системі координат під час плівкового та бульбашкового кипіння води з $P = 0,1$ МПа показано на рис. 8.2. Ділянка ABC відповідає бульбашковому кипінню, а лінійка CD – плівковому режиму. Момент переходу бульбашкового кипіння в плівкове називається кризою кипіння (точка C), а величини, що його характеризують, – критичними ($\Delta T_{кр}$, $\alpha_{кр}$, $q_{кр}$). З практичної точки зору, важливо організувати кипіння в області бульбашкового режиму з високим коефіцієнтом тепловіддачі α .

Під час розвиненого бульбашкового режиму кипіння та природної циркуляції коефіцієнт тепловіддачі від стінки до киплячої рідини α визначається критеріальним рівнянням подібності:

$$Nu = c Re^n Pr^m . \quad (8.5)$$

Критерії подібності, що входять у рівняння подібності (8.5), обчислюються за такими формулами:

$$Nu = \frac{\alpha l'}{\lambda_p}, Re = \frac{v_k l'}{\vartheta_p}, Pr = \frac{\vartheta_p}{a_p}. \quad (8.6)$$

Характерний розмір l' приймається пропорційним лінійному розміру бульбашки пари в момент зародження:

$$l' = \frac{c_p \rho_p \delta T}{r^2 \rho_n}, \quad (8.7)$$

$$v_k = \frac{q}{r \cdot \rho_n}, \quad (8.8)$$

де v_k – умовна швидкість кипіння пари, м/с.

У формулах (8.5–8.7) прийняті такі позначки: c_p – питома теплоємність рідини, Дж/(кг·К); δ – поверхневий натяг киплячої рідини, Н/м; T – температура кипіння, К; r – теплота пароутворення, Дж/кг; ρ_p , ρ_n – густина рідини і пари, кг/м³; q – густина теплового потоку на твердій стінці, Вт/м²; λ_p – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м·К); ϑ_p – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с; α_p – коефіцієнт температуропровідності рідини, м²/с. Індекс « p » означає рідину, індекс « n » – пару.

Значення констант рівняння подібності:

$$\begin{aligned} \text{при } Re < 0,01 & \quad c = 0,06; \quad n = 0,5; \quad m = 0,33, \\ \text{при } Re > 0,01 & \quad c = 0,125; \quad n = 0,65; \quad m = 0,65. \end{aligned}$$

В умовах вимушеного переміщення киплячої рідини по поверхні нагрівання під дією напору стовпа рідини (під час кипіння у вертикальних трубах), циркуляційного насосу або лопатей мішалки характер процесу дещо змінюється. Рух середовища, систематично руйнуючи парову плівку (під час плівкового режиму кипіння), полегшує доступ рідини до нагрітої поверхні й цим сприяє покращенню умов тепловіддачі.

Відзначимо, що досягнення критичних умов процесу можливе лише під час дуже інтенсивного підведення теплоти. На практиці в апаратах харчових виробництв кипіння відбувається у докритичній області. В умовах підприємств ресторанного господарства підтримують режим кипіння, що називається слабким, або тихим кипінням. У цьому випадку $\Delta T = 5 \dots 8^\circ \text{C}$ і густина теплового потоку звичайно не перевищує 6000 Вт/м².

8.3. Випарювання

Загальна характеристика процесу

Випарюванням називається процес концентрування розчинів твердих нелетких речовин шляхом вилучення леткого розчинника під час кипіння. За допомогою випарювання одержують і перенасичені розчини, в яких після цього

проводять кристалізацію, наприклад, розчини сахарози, фруктози, молочного цукру та ін.

Випарювання широко застосовують у цукровому, консервному, кондитерському, молочному та інших виробництвах для концентрування цукрових та вітамінних сиропів, плодових і овочевих соків, фруктово-ягідних начинок, молока, вершків та ін. Особливо важливий цей процес під час виробництва цукру. Підраховано, що протягом одного сезону на цукрових заводах СНД випарюють біля $15 \cdot 10^6$ т води, а в США щорічно на підприємствах харчової промисловості випарюється майже 10^8 т води з цукрового сиропу, фруктових соків, молока, кавових екстрактів і т. ін.

Існують три методи випарювання: 1) поверхневе випарювання, що здійснюється шляхом нагрівання розчину на теплообмінній поверхні за рахунок підведення теплоти до розчину через стінку теплообмінного апарата від гріючої пари; 2) адіабатичне випарювання, що здійснюється шляхом миттєвого випаровування перегрітого розчину в камері, де тиск нижчий, ніж тиск насиченої пари; 3) випарювання шляхом контактного випаровування, під час якого нагрівання розчину здійснюється під час прямого контакту між розчином та гарячим теплоносієм (газом або рідиною), які рухаються. Частіше за все використовується поверхневе випарювання.

Для нагрівання розчинів до температури кипіння використовують різноманітні теплоносії, але найбільше застосування знаходить водяна пара, що у цьому випадку називається гріючою. Утворена під час випарювання розчину пара називається вторинною, її теплоту може бути використано у теплообмінних апаратах, які працюють під меншим тиском.

Процес випарювання розчинника з розчину можна проводити під вакуумом, з атмосферним та підвищеним тиском.

Під час випарювання під вакуумом знижується температура кипіння розчину, що дає можливість використати для обігрівання апарата пару низького тиску. Цей спосіб особливо застосовується під час випарювання харчових розчинів, що чутливі до високих температур. Перевагою процесу випарювання під вакуумом є зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище, а також збільшення корисної різниці температур між гріючою парою та киплячим розчином. Це дозволяє зменшити поверхню теплообміну та габарити усього вакуум-випарного апарата.

Дійсно, середня різниця температур $\Delta t_{сер.}$ між гріючою парою t_n і киплячим розчином t_p дорівнює:

$$\Delta t_{сер.} = t_n - t_p .$$

У вакуумі температура кипіння розчину знижується, тому $\Delta t_{сер.}$ зростає. З рівняння теплопередачі,

$$Q = KAS \Delta t_{сер.} \tau,$$

виходить, що якщо $\Delta t_{сер.}$ збільшується, то для того, щоб через стінку апарата, працюючого під розрідженням, пройшла така ж кількість теплоти Q , як з

атмосферним тиском, поверхню теплообміну треба зменшити (при $K = const$ і $\tau = const$).

У разі випарювання під атмосферним тиском утворена вторинна пара звичайно не використовується і викидається в атмосферу.

Випарювання за підвищеного тиску викликає підвищення температури кипіння розчину і дає можливість використання вторинної пари як теплоносія в інших теплообмінниках. Можливість застосування цього способу випарювання залежить від стійкості компонентів розчину, що випарюється.

Процес випарювання можна здійснювати в одному апараті (однокорпусна установка) або у низці послідовно з'єднаних випарних апаратів (багатокорпусна установка). У однокорпусній випарній установці теплота гріючої пари використовується одноразово, а теплота вторинної пари звичайно не використовується. У багатокорпусній випарній установці вторинна пара, яка виходить з будь-якого попереднього корпусу, є гріючою парою для наступного, в якому розчин кипить за більш низького тиску. Цей метод проведення процесу забезпечує значну економію теплоти і тому має широке розповсюдження у промисловості.

За методом ведення процесу розрізняють періодичне та безперервне випарювання. Апарати і установки періодичної дії використовуються у виробництвах малого масштабу, коли економія теплоти не має великого значення, або для випарювання розчинів до високих кінцевих концентрацій.

Випарні апарати

Апарати, які призначені для проведення процесів випарювання, називаються випарними. Їх можна класифікувати за низкою ознак: роду теплоносія або методу обігрівання; розташуванню і виду поверхні теплообміну (компоновці та конструкції поверхні нагрівання); розташуванню робочих середовищ; режиму і кратності циркуляції розчину та ін.

Найбільше застосування отримали випарні апарати з паровим обігріванням, тому що водяна пара характеризується високою теплотою конденсації, високим коефіцієнтом тепловіддачі при конденсації; парове обігрівання характеризується гнучкістю регулювання.

За розташуванням поверхні теплообміну апарати можуть бути вертикальними, горизонтальними та похилими. Поверхня теплообміну може бути конструктивно оформлена у вигляді пучка труб, зміювика, кільцевих елементів або у вигляді парової оболонки.

За режимом руху киплячої рідини випарні апарати бувають з вільною, природною, примусовою циркуляцією та плівкові. За кратністю циркуляції розрізняють випарні апарати з однократною і багатократною циркуляцією киплячого розчину.

Існує велика різноманітність конструкцій випарних апаратів. На сьогодні є тенденція до скорочення кількості типів і конструктивних різновидів апаратів за рахунок уніфікації вузлів та деталей.

Враховуючи велике значення характеру циркуляції, звичайно її й беруть як визначальну ознаку під час розгляду конструкцій випарних апаратів.

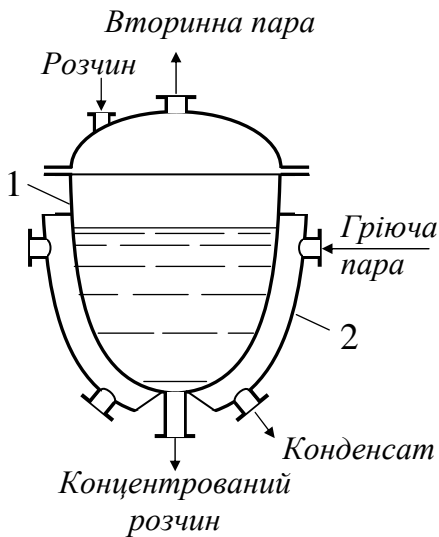


Рисунок 8.3 – Випарний апарат з паровою оболонкою

Випарні апарати з природною циркуляцією розчину поділяються на апарати з центральною циркуляційною трубою, з осьовою зоною кипіння і з виносною гріючою камерою.

Випарний апарат з центральною циркуляційною трубою (рис. 8.4) має гріючу камеру 1 з трубчатою поверхнею нагрівання, утворену пучком труб з двома трубними решітками, які знаходяться в кожусі-обичайці. Вихідний розчин подають в апарат через штуцер 3. Гріюча пара надходить через штуцер 2 в міжтрубний простір, а конденсат відводиться через штуцер 9.

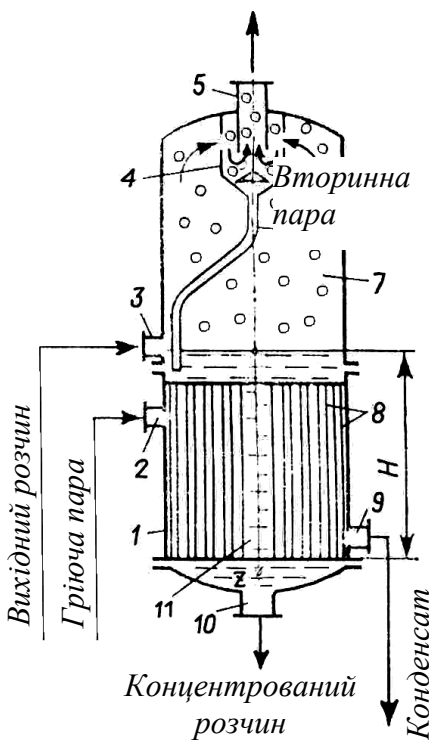


Рисунок 8.4 – Випарний апарат з центральною циркуляційною трубою

Для випарювання в'язких продуктів та продуктів, що кристалізуються в малотоннажних виробництвах знаходять ще застосування оболонкові випарні апарати періодичної дії з вільною циркуляцією і паровим обігріванням (рис. 8.3). Слабко концентрований розчин подається в апарат 1, де за рахунок обігрівання виникає вільна циркуляція. Підігрівання ведеться паром, яка поступає в оболонку 2, до температури кипіння. Після випарювання до необхідної концентрації випарений розчин випускається з апарата і він знову наповнюється неконцентрованим розчином. Обмежене застосування знаходять також випарні апарати з вільною циркуляцією, обладнані змієвикою або трубчатою поверхнями теплообміну.

Киплячий розчин разом із вторинною паром рухається в кип'ятильних трубах 8 вгору, а по центральній циркуляційній трубці 11 холодний розчин опускається вниз. Таким чином, за рахунок різниці густин розчину в циркуляційній трубці та парорідинної суміші в кип'ятильних трубах забезпечується природна організована циркуляція розчину. Вторинна пара у вигляді парорідинної суміші викидається у паровий сепараційний простір 7, з якого вона надходить до бризкоуловлювача 4. Бризкоуловлювач призначений для відокремлення піни і крапель розчину від вторинної пари; це відбувається завдяки зміні швидкості та напрямку руху вторинної пари. Рідина, що при цьому виділилась, стікає по трубці 6 в гріючу камеру, а вторинна пара через штуцер 5 виходить із випарного апарата. Концентрований розчин, що є цільовим продуктом, витікає з нижньої частини гріючої камери через штуцер 10.

Інколи циркуляційну трубу в апаратах з трубчатою поверхнею нагрівання розміщують ексцентрично або виносять за межі гріючої камери.

Апарат з винесеною гріючою камерою (рис. 8.5) складається з гріючої камери 1, виготовленої з труб, сепаратора 2 з бризкоуловлювачем 3 та циркуляційної труби 4, з'єднаної з нижньою камерою 5.

Гріюча пара надходить у міжтрубний простір трубної камери і обігріває трубки, заповнені рідиною. Парорідинна суміш, що утворюється, розділяється у сепараторі на вторинну пару і рідину, що надходить у циркуляційну трубу 4. За рахунок збільшення висоти трубок до 4...5 м створюється значна різниця тиску парорідинного стовпа в трубках 1 і стовпа рідини в циркуляційній трубці 4, що забезпечує інтенсивну природну циркуляцію. Цьому сприяє також те, що циркуляційна труба не обігрівається. Для покращення відокремлення пари та рідини парорідинна суміш вводиться з гріючої камери в сепаратор тангенціально. Перевага цих випарних апаратів полягає також у тому, що гріюча камера розміщена окремо; це дозволяє легко її оглядати і здійснювати очищення внутрішньої поверхні.

Апарат з примусовою циркуляцією принципово відрізняється від апарата з винесеною гріючою камерою тим, що між циркуляційною трубою 4 і нижньою камерою 5 (рис. 8.5) встановлюється насос. Швидкість рідини в трубках за рахунок роботи насоса піднімається до 2...2,5 м/с, що забезпечує більш інтенсивну циркуляцію. Роторно-плівковий випарні апарати (рис. 8.6) знаходять все більш широке застосування для випаровування високов'язких і пастоподібних термолабільних розчинів.

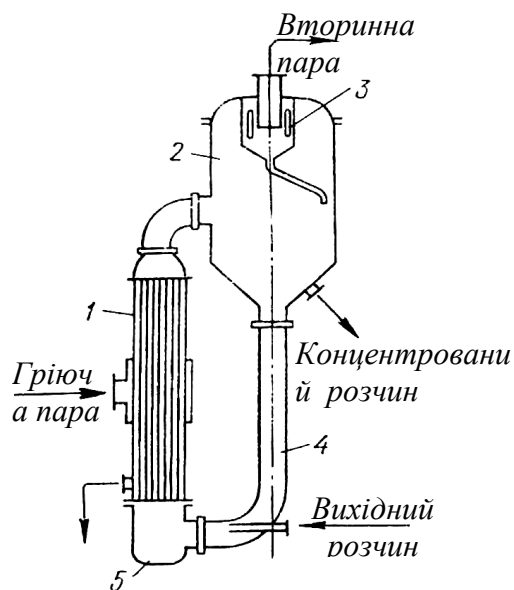


Рисунок 8.5 – Випарний апарат із винесеною гріючою камерою

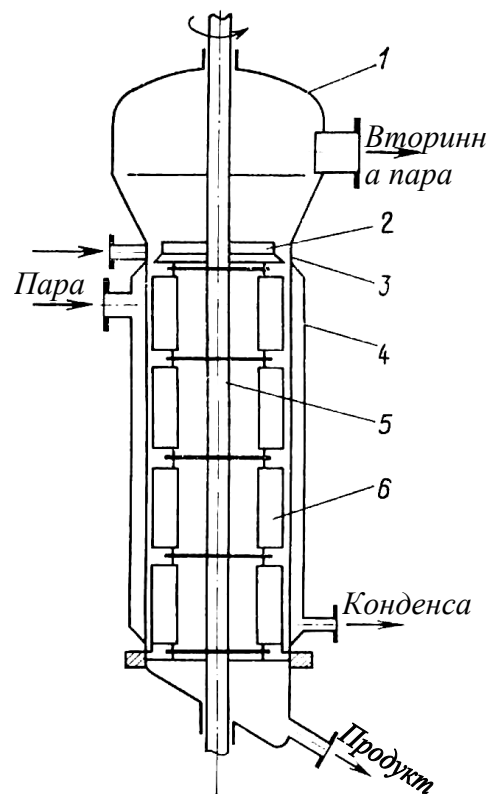


Рисунок 8.6 – Роторно-плівковий випарний апарат

Усередині гріючої камери 3, яка оточена нагрівальною паровою оболонкою 4, є ротор 5 з лопатями 6. Ротор приводиться в обертання з частотою $1...3\text{ с}^{-1}$. Надходячи в апарат, розчин розподіляється устроєм 2, що обертається разом із валом ротора, по стінці корпусу і стікає у вигляді тонкої плівки під дією сили тяжіння. Під час течії розчин концентрується за рахунок випаровування розчинника. Вторинна пара виходить із апарата через сепаратор 1. У міру випарювання розчинника на стінці корпусу утворюється пастоподібний або навіть сухий залишок розчиненої речовини, що знімається з поверхні, що обігрівается, лопатями 6. Проміжок між лопаттю і стінкою апарата складає від 0,4 до 1,5 мм. Час перебування рідини в апараті (залежно від продуктивності, фізичних властивостей розчину, частоти обертання ротора) $10...30\text{ с}$, що становить головну перевагу апарата. Апарати мають площу робочої поверхні до 40 м^2 і рекомендуються для проведення процесів випарювання широкої номенклатури харчових продуктів – молока, цукрових розчинів, екстрактів кави та цикорію, клеєвих бульйонів, соків, томатної пасти та ін.

Однокорпусні випарні установки

Однокорпусні випарні установки застосовуються для згущення порівняно невеликих кількостей розчину, коли економія теплоти не має великого значення. Установки можуть працювати або в періодичному, або в безперервному режимах.

На рис. 8.7 зображено схему однокорпусної випарної установки,

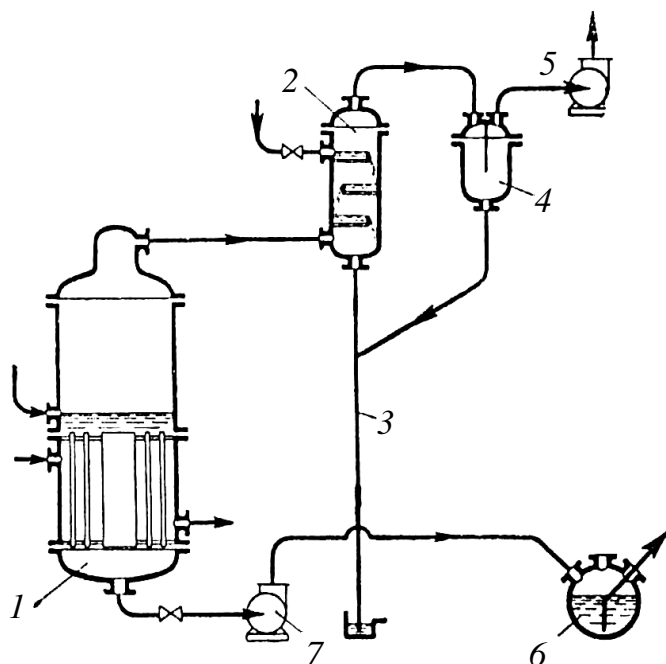


Рисунок 8.7 – Однокорпусна випарна установка

працюючої під вакуумом. Установка складається з випарного апарата 1, конденсатора 2 з барометричною трубою 3, уловлювача рідини 4, вакуум-насоса 5 і збірника готової продукції 6.

Установка працює таким чином. Холодний або нагрітий раніше в теплообміннику розчин надходить до випарного апарата 1 для згущення. У нижній частині апарата розчин сприймає теплоту гріючої пари, і розчинник випаровується. Утворена вторинна пара разом із повітрям і газами надходить до барометричного конденсатора 2. Тут пара конденсується під час змішування її

з водою, а повітря і гази з верхньої частини конденсатора через уловлювач 4 відкачуються вакуум-насосом 5. Конденсат разом із охолоджуючою водою вилучається через барометричну трубу 3. Згущений до потрібної концентрації розчин відкачується насосом 7 у збірник готового продукту 6.

Для складання матеріального та теплового балансів однокорпусного випарного апарата приймемо такі позначки: G – кількість розчину, що надходить, кг/с; G_1 – кількість упареного розчину, кг/с; W – кількість води, що випарюється, кг/с; α та ϵ – відповідно початкова та кінцева концентрація сухих речовин розчину, мас. %.

Рівняння матеріального балансу всього процесу випарювання має вигляд:

$$G_1 = G - W.$$

Запишемо рівняння матеріального балансу за абсолютно сухої речовини, згідно з яким кількість сухої речовини, що знаходиться в розчині до і після випаровування, не зміниться:

$$G \cdot \alpha = G_1 \cdot \epsilon. \quad (8.9)$$

Визначаємо кількість упареного розчину G_1 , остаточна концентрація розчину ϵ , кількість випареної води W :

$$G_1 = \frac{G\alpha}{\epsilon}; \quad W = \frac{G\alpha}{G - W}; \quad W = G \left(1 - \frac{\alpha}{\epsilon} \right).$$

Складемо тепловий баланс випарного апарата, що дозволяє визначити витрату теплоти на випарювання і витрату гріючої пари. Введемо додаткові позначки: Q – витрата теплоти на випарювання, Вт; D – витрата гріючої пари на випарювання, кг/с; i , i_1 , i_2 – відповідно ентальпія вторинної пари на виході її з апарата, ентальпія гріючої пари і конденсату, Дж/кг; c_ϵ , c_n , c_k – відповідно питома теплоємність води, початкового (вихідного) і кінцевого (згущеного) розчину, Дж/(кг·К); t_n , t_k – температура розчину на вході в апарат (початкова) і розчину на виході його з апарата (кипіння), °С; Q_ϵ – витрата теплоти на компенсацію втрат у довкілля, Вт.

Прихід теплоти в апарат складається з теплових потоків гріючої пари Di_1 і вихідного розчину $Gc_n t_n$. Витрата теплоти дорівнює сумі теплових потоків конденсату $D \cdot i_2$, згущеного розчину $(G - W) c_k t_k$, вторинної пари $W \cdot i$ та теплових втрат у довкілля Q_ϵ .

Тоді,

$$Di_1 + Gc_n t_n = Di_2 + (G - W) c_k t_k + W \cdot i + Q_\epsilon. \quad (8.10)$$

Рівняння (8.10) можна записати в такому вигляді:

$$Q = D (i_1 - i_2) = G (c_k t_k - c_n t_n) + W (i - c_\epsilon t_k) + Q_\epsilon. \quad (8.11)$$

Витрата гріючої пари на випарювання розчину складе:

$$D = \frac{G(c_k t_k - c_n t_n)}{i_1 - i_2} + \frac{W(i - c_\epsilon t_k)}{i_1 - i_2} + \frac{Q_\epsilon}{i_1 - i_2}. \quad (8.12)$$

За відсутності теплових втрат і подачі на випарювання розчину, нагрітого до температури t_k , отримаємо витрату пари під час одноразового випарювання:

$$D = \frac{W(i - c_\epsilon t_k)}{i_1 - i_2}. \quad (8.13)$$

Питому витрату гріючої пари на випарювання можна отримати відношенням загальної витрати пари до кількості води, що випарюється (кг/кг).

$$d = \frac{D}{W}. \quad (8.14)$$

З рівняння (8.12) видно, що загальна витрата гріючої пари визначається трьома складовими правої частини: перша з них – витрата пари на нагрівання розчину, що випарюється до температури кипіння, друга – витрата пари на утворення вторинних парів із постійною температурою кипіння розчину і третя – витрата пари на компенсацію втрат теплоти в довілля. Значення першої та третьої складових невеликі порівняно з другою, тому під час наближених обчислень приймають значення $d = 1,1 \dots 1,2$ кг/кг.

Поверхня теплообміну випарного апарата може являти собою стінки кип'ятильних трубок, зміювика або оболонки, по один бік яких знаходиться гріюча пара, а по інший – розчин, що випарюється. Величину поверхні нагрівання випарного апарата обчислюють з основного рівняння теплопередачі:

$$Q = K S \Delta t_{сер.},$$

де S – поверхня нагрівання випарного апарата, m^2 ; $\Delta t_{сер.}$ – середня різниця температур гріючої пари та розчину, $^{\circ}C$; K – коефіцієнт теплопередачі від конденсуючої пари до розчину, що випарюється, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Слід відзначити, що якщо розчин надходить на випарювання в апарат холодним, визначення поверхні теплопередачі треба вести окремо на дві стадії процесу: на підігрівання розчину до температури кипіння і на випарювання з температурою кипіння.

Тепловий потік, що передається через поверхню теплопередачі (8.11):

$$\text{під час нагрівання} \quad Q_n = G (c_k t_k - c_n t_n);$$

$$\text{під час випарювання} \quad Q_v = W (i - c_v t_k).$$

У коефіцієнті теплопередачі термічні опори $\sum \delta i / \lambda_i$ та $1/\alpha_1$, можна вважати для обох стадій однаковими, але термічний опір $1/\alpha_2$ на обох стадіях різний, бо коефіцієнт α_2 у першій стадії буде характеризувати тепловіддачу від стінки до рідини, що гріється, а в другій – до киплячої.

Поверхня теплопередачі (в m^2) буде дорівнювати:

$$\text{під час нагрівання} \quad S_n = \frac{Q_n}{K \Delta t_{сер.н}};$$

$$\text{під час випарювання} \quad S_v = \frac{Q_v}{K_v \cdot \Delta t_{сер.в}}.$$

З отриманих двох величин обирається більша, яка і приймається за поверхню теплообміну.

Корисна різниця температур і температурні втрати під час випарювання. Основним чинником, що визначає інтенсивність випарювання і

продуктивність випарного апарата, є температурний перепад (або температурний напір) – різниця між температурами грюючої пари і киплячого розчину.

У випарних апаратах розрізняють повну (загальну) і корисну різницю температур. Повною різницею температур Δt_0 називається різниця між температурами грюючої t_{zn} і вторинної пари, що надходить до конденсатора t_{en} :

$$\Delta t_0 = t_{zn} - t_{en}. \quad (8.15)$$

Корисна різниця температур Δt , що забезпечує теплопередачу, менша повної різниці на величину температурних втрат Δ .

$$\Delta t = \Delta t_0 - \Delta. \quad (8.16)$$

Температурні втрати Δ є сумою трьох складових:

$$\Delta = \Delta_{сер} + \Delta_2 + \Delta_c, \quad (8.17)$$

де $\Delta_{сер}$ – фізико-хімічна (або температурна) депресія, Δ_2 – гідростатична депресія, Δ_c – гідравлічна депресія.

Фізико-хімічна депресія $\Delta_{сер}$ – це різниця між температурами кипіння розчину і чистого розчинника з однаковим тиском. Температура кипіння розчину вища, ніж температура кипіння чистого розчинника. Так, чиста вода під атмосферним тиском кипить за температури 100°C , а 26%-ий розчин NaCl закипає за температури $107,5^\circ \text{C}$. Це підвищення температури кипіння залежить від природи розчиненої речовини та її концентрації в розчині. Із збільшенням концентрації депресія розчину значно зростає. З цього виходить, що під час нагрівання насиченою парою концентрованого розчину, рухома сила процесу – корисна різниця температур – нижча, ніж під час нагрівання розбавленого розчину; із збільшенням концентрації розчину в процесі випарювання $\Delta_{сер}$ зростає, а Δt відповідно зменшується.

Для однокорпусної випарної установки при згущенні вітамінного сиропу з шипшини величина $\Delta_{сер}$ складає $1,5^\circ \text{C}$; для трикорпусної установки при послідовному з'єднанні апаратів у другому корпусі $\Delta_{сер}$ становить 3°C , у третьому – 10°C .

Гідростатична депресія Δ_2 – різниця між температурами кипіння у верхньому шарі розчину і середньому за висотою шару, викликана гідростатичним тиском стовпа рідини. На рівні рідини, що стикається з паровим простором, розчин знаходиться під тиском, наявним у паровому просторі апарата. Розчин біля дна апарата знаходиться під тиском не тільки парового простору, але і стовпа рідини в апараті. Тому кипіння нижніх шарів розчину відбувається за більш високої температури. Так, наприклад, якщо нагрівати воду до кипіння в посудині, що має висоту 10 м, верхній шар води закипить за температури 100°C , а нижній, що знаходиться під тиском 202 кПа (101 кПа – це атмосферний тиск над водою +101кПа – тиск стовпа води висотою 10 м), – при 120°C . Δ_2 знижує корисну різницю температур приблизно

на $1 \dots 2^\circ \text{C}$ на 1 корпус багатокорпусної випарної установки. Відзначимо, що в плівкових випарних апаратах гідростатична депресія буде відсутня.

Гідравлічна депресія Δ_c – зниження температури вторинної пари, що викликається гідравлічним опором трубопроводів. Вторинна пара на шляху від поверхні киплячого розчину, який знаходиться у випарному апараті, до входу в конденсатор переборює гідравлічний опір трубопроводів, завдяки якому знижується її тиск, отже, знижується її температура. Зниження тиску і зниження температури тим більше, чим довший паропровід і вища швидкість вторинної пари.

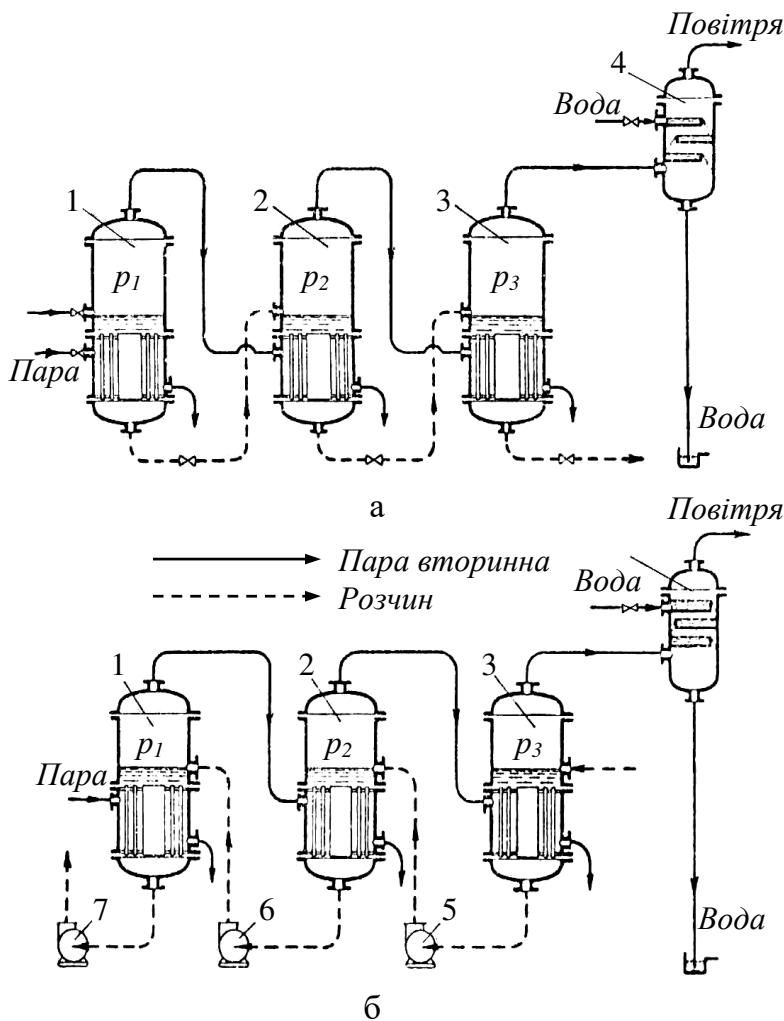
Величина Δ_c складає приблизно $1,0 \dots 1,5^\circ \text{C}$ для 1 корпусу установки.

Багатокорпусні випарні установки

На сучасних підприємствах харчової промисловості та в інших галузях випарюванню піддають дуже велику кількість розчинів, тому проблема економії гріючої водяної пари має винятково важливе значення.

Витрата гріючої пари значно знижується порівняно з одно корпусною випарною установкою, якщо процес проводити в багато- корпусних випарних установках. У таких установках гріюча пара надходить тільки на обігрівання першого корпусу, інші корпуси обігріваються вторинною парою попередніх.

Найбільше застосування знаходять випарні установки з прямоточним



рухом пари і розчину (рис. 8.8 а). Вихідний розчин подається в корпус 1, далі переміщується в корпуси 2 і 3 та видаляється з корпусу 3 у вигляді згущеного розчину. Тиск в установці зменшується у напрямку від корпусу 1 до корпусу 3 ($p_1 > p_2 > p_3$), що дозволяє переміщувати розчин під дією перепадів тиску.

Нагрівальна пара переміщується в тому ж напрямку, що і розчин; свіжа пара вводиться у корпус 1; утворена у цьому корпусі вторинна пара йде як нагрівальна у корпус 2; утворена у корпусі 2 вторинна пара надходить на обігрівання корпусу 3; вторинна пара з корпусу 3 спрямовується для конденсації у

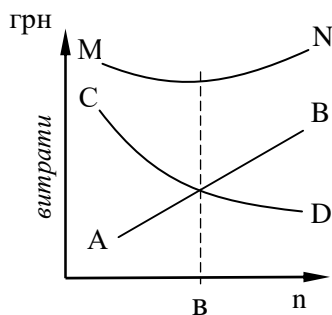
Рисунок 8.8 (а, б) – Багатокорпусні випарні установки

барометричний

конденсатор 4.

Принципову схему протитечійної випарної установки показано на рис. 8.8 б. Розчин, що випарюється, надходить у корпус 3, з якого перекачується насосом 5 у корпус 2, а звідти – в корпус 1. Необхідність у насосах 5 і 6 зумовлена тиском, що, як і під час прямоточного випарювання, змінюється по корпусах ($p_1 > p_2 > p_3$).

Гріючі пари (свіжа і вторинна) переміщуються від корпусу 1 до корпусу 3 протитечією по відношенню до руху розчину. Згущений розчин вивантажується з корпусу 1; вторинна пара з корпусу 3 спрямовується в конденсатор 4. Істотним недоліком протитечійної системи є наявність насосів, які перекачують киплячі розчини, що викликає труднощі під час експлуатації, а також додаткову витрату енергії на перекачування.



Продовження рисунка 8.9 (в) – Графік економічного розрахунку багатокорпусних випарних установок

Оптимальне число корпусів у випарній установці визначають на підставі економічних розрахунків та технологічних вимог. Для цього використовують графік наведений, на рис. 8.9 в. Крива CD характеризує затрати на свіжу гріючу пару; із збільшенням числа корпусів установки ці затрати зменшуються. Водночас зазначимо, що питома витрата гріючої пари (в кг на 1 кг випареної води) становить: для установки однокорпусної – 1,1; двокорпусної – 0,57; трикорпусної – 0,4; чотирьокорпусної – 0,3; п'ятикорпусної – 0,27. Крива AB характеризує затрати на установку, її обслуговування та ремонт. Сумарна крива MN відображає загальні витрати на випарювання; мінімум на цій кривій відповідає оптимальному числу корпусів.

8.4. Конденсація

Загальні відомості

Конденсацією називають процес переходу пари або стиснутого до критичного стану газу в рідкий стан. Скраплювання пари досягається охолодженням її, а газу – стискуванням з подальшим охолодженням.

Процес конденсації широко застосовується в харчових виробництвах для різноманітних цілей: створення розрідження у випарних, фільтраційних, сушільних та інших вакуумних установках; використання теплоти конденсації для нагрівання в теплообмінниках з паровим обігріванням; розподіл багатокомпонентних систем з різними температурами скраплення; скраплення парів спирту, вуглекислого газу (для одержання рідкої вуглекислоти), аміаку і фреонів у холодильних установках і т. ін.

Апарати, в яких відбувається конденсація, називають конденсаторами. Конденсатори бувають двох типів: поверхневі, в яких пара (або газ), що конденсується, та охолоджуючий агент розділені поверхнею теплопередачі, і

змішування, в яких конденсація пари відбувається під час безпосереднього зіткнення з охолоджуючим теплоносієм. Звичайно охолоджуючим агентом є холодна вода, рідше – повітря та інші холодоносії.

Поверхневі конденсатори

Поверхневі конденсатори застосовують у тих випадках, коли необхідно отримати конденсат в чистому вигляді або сконденсувати пари цінного продукту, наприклад, етилового спирту, винних парів та ін. Як поверхневі конденсатори широко застосовують теплообмінники кожухотрубні, «труба в трубі», змійовикові та зрошувальні.

Розглянемо загальний випадок конденсації перегрітої водяної пари. Охолоджуючим агентом є вода. Конденсація здійснюється у вертикальному кожухотрубному протитечійному конденсаторі. Графік зміни температур

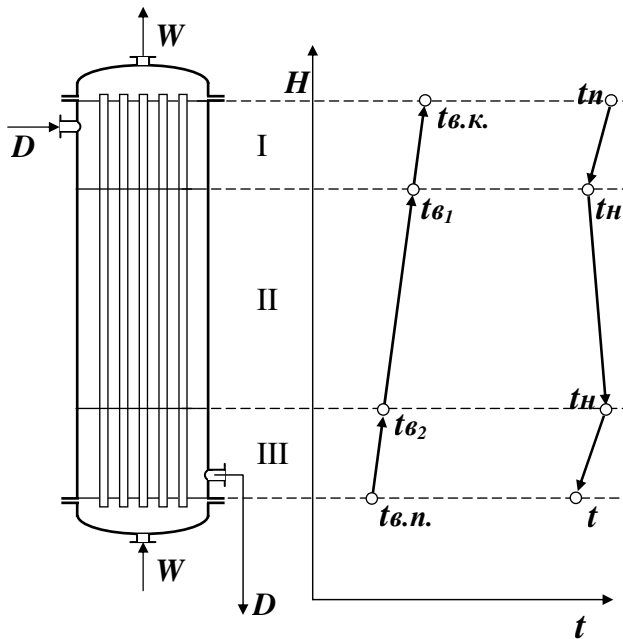


Рисунок 8.10 – Поверхнева конденсація

водяної пари, що конденсується охолоджуючої води в процесі конденсації показано на рис. 8.10.

З урахуванням особливостей процесів, які протікають у конденсаторі, робочу поверхню його по висоті умовно поділяють на три зони: I – зона охолодження перегрітої пари від температури t_n до температури насичення t_n , II – зона конденсації пари, в якій процес протікає з $t_n = \text{const}$, III – зона охолодження отриманого в другій зоні конденсату від t_n до заданої кінцевої температури t . Зазначимо, що в працюючому конденсаторі таких чітких меж між зонами немає. Для кожної зони складається

тепловий баланс і визначається необхідна поверхня теплообміну.

Для зони охолодження перегрітої пари рівняння теплового балансу, нехтуючи втратами теплоти, буде мати вигляд:

$$Q_1 = Dc(t_n - t_n) = Wc_e(t_{e.k.} - t_{e1}), \quad (8.18)$$

де D – кількість перегрітої пари, що надходить у конденсатор, кг/с; c , c_e – теплоємності перегрітої пари та води, Дж/(кг·К); t_n – температура перегрітої пари, °С; t_n – температура насиченої пари, °С; W – витрата охолоджувальної води, кг/с; t_{e1} – початкова температура води під час входу в зону, °С; $t_{e.k.}$ – кінцева температура води під час виходу з зони, °С.

Для зони конденсації пари з $t_n = \text{const}$ рівняння теплового балансу буде:

$$Q_2 = D \cdot r = Wc_e(t_{e1} - t_{e2}), \quad (8.19)$$

де r – питома теплота конденсації, Дж/кг; t_{62} – температура води на вході в зону II, °С.

Для зони охолодження отриманого конденсату від t_n до заданої температури t (в °С) рівняння теплового балансу буде:

$$Q_3 = Dc_k(t_n - t) = Wc_6(t_{62} - t_{6n}), \quad (8.20)$$

де c_k – теплоємність конденсату, Дж/(кг·К); t_{6n} – температура води на вході в зону III, °С.

Знаючи величини Q_1 , Q_2 , і Q_3 , можна встановити поверхні S_1 , S_2 та S_3 (в м²) для розглянутих зон:

$$S_1 = \frac{Q_1}{K_1 \Delta t'_{cep}}; \quad S_2 = \frac{Q_2}{K_2 \Delta t''_{cep}}; \quad S_3 = \frac{Q_3}{K_3 \Delta t'''_{cep}}.$$

Тут $\Delta t'_{cep}$, $\Delta t''_{cep}$ і $\Delta t'''_{cep}$ – температурний напір (рушійна сила процесу) для кожної з зон відповідно, °С; K_1 , K_2 , K_3 – коефіцієнти теплопередачі для кожної з зон відповідно, Вт/(м²·К).

Загальна поверхня теплообміну конденсатора становить:

$$S = S_1 + S_2 + S_3. \quad (8.21)$$

Витрата охолоджувальної води визначиться таким чином:

$$W = \frac{Dc(t_n - t_n) + D \cdot r + Dc_k(t_n - t)}{c_6(t_{6n} - t_{6k})} = \frac{D(i_n - c_k t)}{c_6(t_{6n} - t_{6k})}, \quad (8.22)$$

де i_n – ентальпія перегрітої пари, що надходить (Дж/кг), яку можна виразити співвідношенням:

$$i_n = c(t_n - t_n) + r + c_k t_n.$$

Визначаємо проміжні температури охолоджувальної води:

$$t_{62} = t_{6n} + \frac{Q_3}{W \cdot c_6}. \quad (8.23)$$

$$t_{61} = t_{6k} - \frac{Q_1}{W c_6}. \quad (8.24)$$

Конденсатори змішування застосовуються для конденсації парів рідини, не розчинних у воді, або пари, що є відходом, який не використовується, того або іншого процесу. Ефективність роботи конденсаторів змішування залежить від величини поверхні контакту охолоджуючої води та пари, тому для її збільшення охолоджуючу воду подають у конденсатор за допомогою різноманітних розбризкуючих приладів.

Витрату охолоджуючої води на конденсацію пари визначають із теплового балансу конденсатора:

$$Di + Wc_6 t_n = (D + W) c_6 t_k, \quad (8.25)$$

$$W = \frac{D(i - c_e t_k)}{c_e(t_k - t_n)}, \quad (8.26)$$

де W – витрата охолоджуючої води, кг/с; D – кількість пари, яка конденсується, кг/с; i – ентальпія пари яка конденсується, Дж/кг; c_e – теплоємність води, Дж/(кг·К); t_k – температура суміші констант конденсату та води, що виходить із апарата, °С; t_n – початкова температура охолоджуючої води, °С.

У співвідношення (8.25) та (8.26) не включені втрати теплоти через стінки конденсатора в довкілля, бо вони незначно знижують витрати охолоджуючої води.

Питома витрата охолоджуючої води на конденсацію (кратність охолодження) в кг/кг:

$$m = \frac{W}{D}.$$

Величина m звичайно становить від 15 до 60 кг води на 1 кг пари.

У конденсатор змішування разом із парою і водою, а також через нещільності апарата потрапляє повітря, що знижує ефективність теплообміну. Тому воно безперервно відсмоктується з конденсатора насосом.

Залежно від способу виведення з апарата води і газів розрізняють конденсатори змішування мокрі й сухі (рис. 5.37). У мокрих конденсаторах суміш води і конденсату, а також повітря та інші гази, які не конденсуються відводяться разом мокроповітряним насосом. У сухих конденсаторах суміш води і конденсату відводиться знизу (як правило – самопливом), а повітря та гази відсмоктуються вакуум-насосом із верхньої частини конденсатора. Для відводу суміші води і конденсату застосовують барометричну трубу.

Крім того, залежно від напрямку руху пари та води розрізняють конденсатори змішування прямоточні та протитечійні.

На рис. 8.11 а, б наведено мокрі прямоточні та протитечійні конденсатори змішування. На рис. 8.11 в зображено сухий протитечійний барометричний конденсатор. Пара на конденсацію надходить у конденсатор через штуцер 1 у нижній частині апарата. У конденсаторі розміщено низку перфорованих сегментних полиць 2. Охолоджуюча вода подається на верхню полицю, після цього перетікає з полиці на полицю у вигляді тонких струмків через отвори та борти. Утворений конденсат разом із водою виводиться через патрубок у нижній частині апарата, для відводу суміші служить барометрична труба 5. Повітря відводиться через патрубок 3 у верхній частині апарата і, минаючи бризкоуловлювач 4, висушеним вилучається з системи за допомогою вакуум-наосу.

Барометрична труба забезпечує відведення з апарата води і конденсату самопливом у барометричний ящик. Висота цієї труби H (у м) визначається рівністю

$$H = h_1 + h_2 + 0,5, \quad (8.27)$$

де h_1 – висота стовпа рідини в барометричній трубі, що врівноважує різницю між тиском у конденсаторі та атмосферним, м; h_2 – висота стовпа рідини у

барометричній трубі, що створює динамічний напір, який забезпечує рух по трубі, м; $0,5$ м – запасна висота, що відвертає заливання водою штуцера для введення пари під час збільшення атмосферного тиску.

Висоту h_1 (у м) знаходять зі співвідношення

$$h_1 = 1,02 \cdot 10^{-4} \cdot v, \quad (8.28)$$

де v – розрідження в конденсаторі, Па.

Висота h_2 може бути визначена зі співвідношення

$$h_2 = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \sum \zeta + \lambda \frac{H}{d} \right),$$

де v – швидкість рідини у барометричній трубі, м/с; λ – коефіцієнт тертя під час руху рідини по барометричній трубі; d – діаметр барометричної труби, м; H – висота барометричної труби, м; $\sum \zeta$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів (на вході води у барометричну трубу приймають $\zeta = 0,5$; на виході $\zeta = 1,5$).

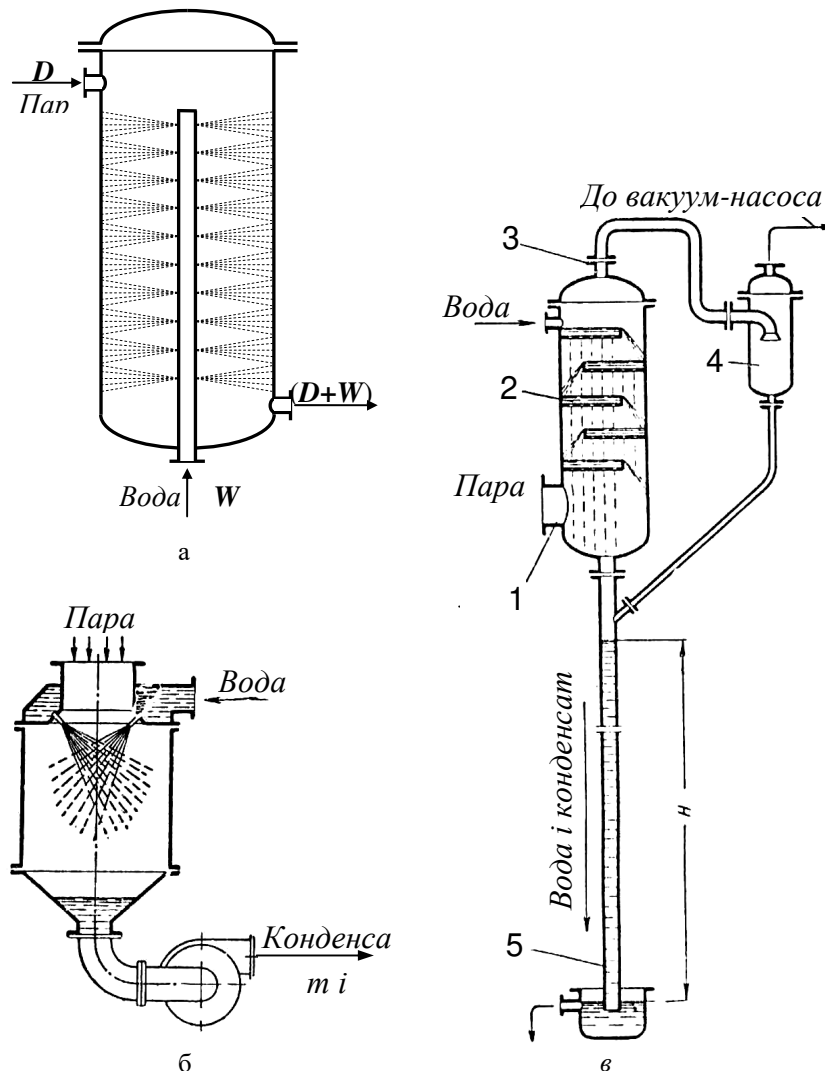


Рисунок 8.11 – Конденсатори змішування

Діаметр барометричної труби знаходять за формулою

$$d = \sqrt{\frac{4(D+W)}{\pi \rho v}}, \quad (8.29)$$

де ρ – густина води, кг/м³.

8.5. Охолодження, заморожування та розморожування

Штучне охолодження широко застосовується в різних галузях народного господарства, наприклад, для кондиціонування повітря, збереження харчових продуктів. До числа хіміко-технологічних процесів, що здійснюються під час штучного охолодження, відносяться процеси кристалізації, поділу газів, сублімаційного сушіння, деякі реакторні процеси. Холодильні процеси використовуються також у металургії, електротехніці й електроніці, ядерній, ракетній та інших галузях техніки.

Охолодження завжди пов'язане з перенесенням теплоти від тіла з більш низькою температурою до тіла з більш високою. Відповідно до другого закону термодинаміки, таке перенесення вимагає витрати енергії. Тому для одержання холоду необхідно безупинно підводити енергію до холодильної установки.

Способи одержання штучного холоду класифікуються за необхідною температурою охолодження. Умовно розрізняють помірне охолодження (діапазон температур від +20 до –100° С) і глибоке (температури нижче –100° С). Температури, близькі до абсолютного нуля (4 К і нижче), одержують лише в лабораторних умовах.

У процесах штучного охолодження теплота від охолоджуваного тіла відводиться до холодильного агента, що виконує роль переносника теплоти. Температуру холодильного агента знижують за допомогою випаровування рідин із низькою температурою кипіння, наприклад, аміаку NH₃, фреонів (CClF₂, CHClF₂) та інших, або розширення попередньо стиснутих газів. Так, якщо випаровувати NH₃ за тиску 0,1 МПа, то він буде кипіти за температури –34° С. Розширення газів і зниження тиску здійснюються в дросельних пристроях або детандерах.

Процес розширення ідеального газу відбувається без зміни ентальпії, і температура його не змінюється. Дроселювання ж реальних газів супроводжується зниженням температури, незважаючи на постійність ентальпії. Явище зміни температури реального газу під час його дроселювання називається *дросельним ефектом*. Під час проходження газу через детандер – машину, подібну до компресора, газ, розширюючись, здійснює роботу.

Крім випаровування низькокиплячих речовин і розширення газів, для охолодження використовують тепловий ефект плавлення, звичайно льоду, але його можна використовувати лише до температури його плавлення, тобто до 0° С. Для безперервного помірною охолодження найчастіше використовують компресійні холодильні машини. У цих машинах, як холодильні агенти, використовуються речовини з низькою температурою кипіння, що здатні випаровуватися за температури нижче нуля під час підведення теплоти від охолоджуваного тіла. У результаті наступного стиснення пари й охолодження

до звичайної температури вона знову перетворюються в рідину. Стиснення пари здійснюється в поршневих чи турбокомпресорах.

Робота компресійної холодильної машини побудована за принципом замкнутого циклу (рис. 8.12). Компресор 2 видаляє з випарника пару холодильного агента та стискає її до тиску, за якого вона може бути зріджена під час охолодження водою в кон-денсаторі 1.

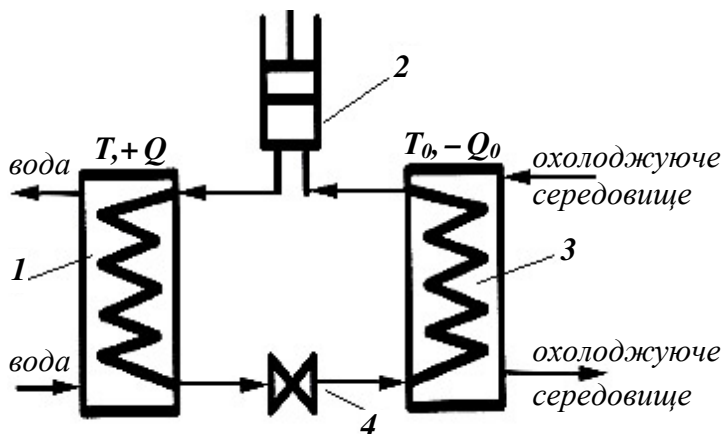


Рисунок 8.12 – Компресійна холодильна машина

Рідкий холодильний агент із конденсатора подається через дросельний вентиль 4 у випарник 3, де випаровується за низької температури, забираючи тепло від охолоджуваного середовища. Під час дроселювання ентальпія агента не змінюється, а тиск і температура знижуються.

Пара холодильного агента, що виходить із випарника 3, надходить у компресор, стискається, і цикл повторюється.

Основними вимогами до речовин, які застосовуються як холодильні агенти, є велика прихована теплота випаровування та можливо менший питомий об'єм пари. Велика прихована теплота випаровування дозволяє зменшити кількість агента, який циркулює в системі, що необхідно для досягнення заданої холодопродуктивності, а малий питомий об'єм пари призводить до зменшення розмірів холодильної машини. Крім того, холодильний агент не повинен бути хімічно агресивний, має задовольняти вимоги пожежної безпеки та бути за можливістю нешкідливим. На сьогодні найбільш розповсюдженими холодильними агентами є фреони й аміак. Фреони являють собою фторхлорпохідні метану. Фреони нешкідливі, пожежо- та вибухобезпечні, не викликають корозії конструкційних матеріалів. Недолік фреонів – їхня висока плинність, що вимагає забезпечення високої герметичності системи, і здатність розчиняти мастила.

У деяких технологічних процесах вимагаються більш низькі температури, ніж ті, котрі можуть бути отримані під час використання одноступінчатих холодильних машин. Наприклад, одноступінчата машина з аміаком дозволяє одержати температуру не нижче -34°C . Для досягнення більш низьких температур одноступінчаті машини малоефективні або зовсім непридатні. Тому для одержання більш низьких температур застосовують двоступінчаті чи тріступінчаті машини. Шляхом двоступінчатого стискання аміачної пари можна одержати температуру до -50°C , шляхом тріступінчатого – до -70°C . У виробничих умовах холодильна установка звичайно обслуговує кілька апаратів, для охолодження яких використовують проміжні холодоносії. Як проміжні

холодоносії використовуються охолоджені розсоли – водяні розчини солей CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl , що замерзають лише за низьких температур. Охолоджені розсоли подаються за допомогою насосів від випарника холодильної машини, де вони охолоджуються, до споживачів холоду, де вони віддають холод і самі нагріваються. Вибір розсолу та його концентрації залежить від необхідної температури охолодження, що має бути вище температури замерзання розсолу.

Для штучного охолодження застосовуються також пароежекторні та абсорбційні холодильні установки. Дія абсорбційних холодильних установок заснована на поглинанні пари холодильного агента яким-небудь абсорбентом і наступним виділенням його шляхом нагрівання. Замість стискання холодильного агента в компресорі, що необхідно для наступної конденсації, в абсорбційній холодильній установці застосовуються десорбція та відгонка холодильного агента з розчинника під надлишковим тиском.

Найчастіше як холодильний агент в абсорбційних установках використовується аміак, а абсорбент – вода. Аміак дуже добре поглинається водою, причому температура кипіння розчину вища, ніж аміаку.

Абсорбційні й пароежекторні холодильні установки в харчових технологіях майже не використовуються.

Загальні відомості про охолодження та заморожування

Холодильна обробка продуктів та їхнє зберігання за відповідних низьких температур є одним із найбільш досконалих прийомів попередження або уповільнення їх псування. Під час холодильної обробки досягається найбільш повне збереження первинних натуральних властивостей і забезпечуються мінімальні зміни харчової цінності та смаку продуктів. Обробка холодом зумовлює пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів, а також уповільнення хімічних та біохімічних процесів, що відбуваються у продукті під дією власних ферментів: кисню повітря, теплоти та світла. У промисловій практиці користуються такими трьома способами холодильної обробки і зберігання продуктів із їх середньооб'ємною температурою: 1) на $1...4^\circ\text{C}$ вище криоскопічної – це охолодження і зберігання охолоджених продуктів; 2) на $1...2^\circ\text{C}$ нижче криоскопічної – це підморожування і зберігання підморожених продуктів; 3) на $15...20^\circ\text{C}$ нижче криоскопічної – це заморожування і зберігання заморожених продуктів.

Під криоскопічною температурою мають на увазі температуру початку утворення кристалів льоду з тканинних соків продукту; її дуже часто називають температурою замерзання. Для більшості харчових продуктів ця температура знаходиться біля мінус $1,5^\circ\text{C}$.

Охолодження харчових продуктів – процес відводу від них теплоти із зниженням температури до рівня, близького до криоскопічної точки. Швидкість охолодження продуктів повинна бути максимальною, що гарантує краще збереження їх якостей і найменшу втрату маси. Якщо вона недостатньо велика, то в продуктах часто відбуваються небажані зміни внаслідок руйнівної дії мікробіологічних і ферментативних процесів, що можуть випереджати процес охолодження.

Продукти охолоджують у випадках відносно короткого терміну їх зберігання (до 10...15 діб), причому охолоджені продукти за своїми властивостями майже не відрізняються від неохолоджених.

Охолодження дуже часто є одним із етапів технологічного процесу виробництва різноманітних харчових продуктів. Охолодженню піддають карамель, глазури та шоколад з метою переведення їх з пластичного стану в твердий у кондитерському виробництві; маргаринову емульсію перед кристалізацією; пивне сусло та пиво перед освітленням; патоку та глюкозу після вакуум-випарювання з метою запобігання колірності; ковбаси після термічної обробки; вина з метою прискорення їхнього визрівання та стабілізації; молочні продукти (масло, сир) і т. ін.

Підморожування – процес охолодження продуктів до середньооб'ємної температури на 1...3° С нижче криоскопічної. До підморожування звертаються у тих випадках, коли необхідно продовжити термін зберігання харчових продуктів. При цьому тільки невелика частина води, наявна у продукті, перетворюється у лід.

Заморожування являє собою відведення теплоти від харчових продуктів із перетворенням у лід більшої частини рідини, що міститься у них. До заморожування вдаються звичайно для досягнення таких основних цілей: 1) забезпечення стійкості продуктів під час тривалого зберігання за низької температури (до них належать м'ясо, птиця, риба, тісто, сир, пельмені, ягоди, плоди, овочі та ін.); 2) відокремлення вологи під час концентрування пива, фруктових соків та інших рідких харчових продуктів або під час сублімаційного сушіння продуктів; 3) виробництво продуктів зі своєрідним смаком (морозиво, креми, морожені плоди та ягоди); 4) виробництво харчового льоду.

Останнім часом проводяться пошукові науково-дослідні роботи з консервування заморожуванням тіста і випечених хлібобулочних виробів. Для ресторанного господарства, має інтерес заморожування готових дрібноштучних булочних виробів, що швидко черствіють. Технологія заморожування виробів передбачає охолодження їх після випікання до 30...40° С протягом 1...2 годин і наступне заморожування за температури –18...–23° С та відносній вологості повітря 95...97%. Продукція, витримана в такому стані 3 тижні, після розморожування була за органолептичною оцінкою рівноцінна свіжовипеченій. Інтерес мають і роботи із заморожування тіста. Дослідження показують можливість заморожування напівфабрикатів як прісного листкового, так і дріжджового тіста за температури –18° С без погіршення якостей виробів, що випікаються. Гранична тривалість зберігання заморожених напівфабрикатів – 12 тижнів, перевищення цього терміну погіршує якість випечених виробів. Проведено дослідження також і з вивчення впливу тривалого зберігання тортів і тістечок за температури мінус 18° С (заморожування проводилося за мінус 35° С), які показали збереження якості виробів протягом трьох місяців зберігання.

Відзначимо деякі особливості заморожування продуктів із метою їх тривалого зберігання. Кінцевою метою технології заморожування, на жаль недосяжною на сьогодні, є збереження оборотності процесу. Перетворення тканинної рідини в лід під час заморожування продукту викликає фізико-хімічні зміни, що впливають на його якість. Щоб звести до мінімуму шкідливий вплив низьких температур на продукт у результаті заморожування, слід передбачати оптимальне поєднання температури, швидкості та тривалості процесу заморожування.

Передусім необхідно враховувати, що розчини солей та цукрів, що містяться в тканинах харчових продуктів, замерзають за більш низької температури, ніж чиста вода (інколи за мінус 60° С). Встановлено, що за температури мінус 4° С виморожується ¾ частини води, що міститься в м'ясі, рибі, яйцях, і 1/2 – в плодах і картоплі. Під час подальшого зниження температури кількість вимороженої води різко скорочується. Під час заморожування продуктів у них утворюються кристали льоду. Під час повільного заморожування кристали льоду зароджуються в першу чергу в міжклітинному просторі, що зумовлено меншою концентрацією цукрів і солей у ньому, ніж у клітинах. Тому міжклітинна рідина замерзає за більш високої температури, ніж та, що міститься в клітинах. У процесі зростання кристалів льоду, що утворилися, і підвищення концентрації рідини у міжклітинному просторі волога з клітин мігрує в міжклітинний простір і викликає подальше зростання кристалів. Великі кристали льоду деформують і своїми гострими гранями руйнують тканину клітини.

Під час швидкого заморожування у тканинах виникає велика кількість центрів кристалізації, причому вони виникають як у міжклітинному просторі, так і у клітинах. Це пояснюється великою швидкістю зниження температури. Утворення великої кількості центрів кристалізації зумовлює невелике збільшення розмірів кристалів і відсутність руйнування оболонки клітин. Під час швидкого заморожування швидкість утворення кристалів вище швидкості переміщення вологи, тому значна частина рідини заморожується там, де вона знаходилася до заморожування. Для запобігання пошкодження клітинної структури необхідно застосовувати температуру заморожування мінус 40° С. При цьому в лід переходить біля 90% вологи, що міститься в плодах, ягодах і овочах, до 85% вологи – під час заморожування м'яса. Аналогічне явище спостерігається і під час заморожування продуктів коагуляційної структури (сир та ін.).

Таким чином, при високому темпі заморожування утворюються дрібні кристали і завдяки цьому створюються умови для максимальної оборотності структури і властивостей продукту під час розморожування. Температурний режим зберігання для заморожених продуктів залежить від виду продукту і тривалості його збереження. У рекомендаціях Міжнародного інституту холоду температуру –12° С названо як максимально допустиму, а температуру –18° С і нижче – як рекомендовану.

Спосіб концентрування рідких продуктів (пива, соків, вина, оцту та ін.) шляхом заморожування (кріоконцентрування) заснований на тому, що за низької температури вимерзає розчинник (вода), а екстрактивні речовини (цукор, сіль, кислоти, фарбуючі речовини і т. ін.) залишаються в розчині й не кристалізуються. При цьому рідину, що концентрується, заморожують за температури $-10...-12^{\circ}\text{C}$ і на центрифугах відокремлюють від льоду.

Способи охолодження та заморожування

Вибір того або іншого способу охолодження і заморожування залежить від техніко-економічних показників різноманітних способів і визначається цільовим призначенням процесу, видом продукту і його кількістю.

Процес охолодження продуктів здійснюється в газовому (повітряному) і рідкому середовищах, в апаратах із теплопередаючою поверхнею, у вакуумі. Повітря – найбільш розповсюджений холодоагент; воно не має запаху і на більшість продуктів не чинить шкідливого впливу. До недоліків охолодження в повітрі можна віднести слабку інтенсивність процесу і випаровування вологи з поверхні продуктів, що супроводжується втратою їхньої маси.

Охолодження в холодній воді або розсолі може бути контактним або безконтактним. При контактному охолодженні продукт розміщують у рідкому охолоджуваному середовищі. Так, наприклад, охолоджують тушки птиці та варені ковбасні вироби до $4...6^{\circ}\text{C}$, розміщуючи їх у спеціальні ванни або зрошуючи холодною (крижаною) водою (з температурою $1...4^{\circ}\text{C}$). За безконтактного охолодження продукт відокремлений від рідкого охолоджувача металевією стінкою або волого-непроникною оболонкою.

Останнім часом одержує розповсюдження спосіб вакуумного охолодження, в якому відвід теплоти здійснюється за рахунок прихованої теплоти фазового переходу частини вологи, що міститься в продукті. Такий спосіб застосовують для охолодження плодів, риби, сиру, м'ясного фаршу, курей, кулінарних виробів. Відзначимо, що процес вакуумного охолодження рідких і пастоподібних продуктів, які містяться у відкритих функціональних ємностях супроводжується їх розбрикуванням і віднесенням з паровими бульбашками, що утворюються під час кипіння. Спливаючи до вільної поверхні, бульбашки швидко ростуть в об'ємі та, руйнуючись, викидають краплі продукту з ємності. Інтенсивність кипіння продукту, що охолоджується, залежить від швидкості зміни тиску в вакуум-камері.

Основні методи заморожування у сучасній технології, також як і охолодження, поділяються на заморожування в рідкому та заморожування в повітряному середовищі. Найбільш широко застосовується спосіб контактного заморожування у повітрі. Розрізняють заморожування з природним переміщенням повітря (у камерах) та зі змушеним рухом повітря (тунельні морозилки, гравітаційно-конвейерні та флюїдизаційні швидкоморозильні апарати). Найбільш перспективне заморожування продуктів охолодженим повітрям у псевдозрідженому шарі. Цей вид заморожування називається флюїдизацією, а швидкоморозильні апарати, в яких здійснюється процес, називаються

флюїдизаційними. Істотні переваги цих апаратів порівняно зі звичайними – скорочення часу заморожування і більш висока якість заморожених продуктів.

Рідкими середовищами для контактного заморожування продуктів (риби, м'яса) є розчини солі (наприклад, кухонної). Водночас із перевагами (простота і доступність, прискорення процесу та відсутність втрати маси) цей спосіб заморожування має і недолік – проникнення солі в продукт, що призводить до зміни його кольору і погіршення зовнішнього вигляду. Знаходить застосування і розсільне охолодження продуктів, які упаковані в різноманітні плівки.

Заморожування киплячими холодоагентами буває безконтактним і контактним. Безконтактне заморожування здійснюється здебільшого у швидкоморозильних апаратах, де продукти затискаються між порожніми металевими плитами, в яких «кипить» холодоагент. Під час контактного заморожування використовують кріогенну рідину – азот або фреони (хладони). Останній метод холодильної обробки різноманітних продуктів (м'ясних, молочних, кулінарних виробів) є найбільш перспективним, бо процес заморожування протікає швидко і за дуже низьких температур. Існує декілька способів заморожування харчових продуктів за допомогою рідкого азоту: під час безпосереднього контакту з газоподібним азотом; зануренням в азот; зрошенням рідким азотом. Азот – інертний газ без запаху і смаку; під час контакту з харчовими продуктами шкідливо на них не впливає. Зазначимо, що температура кипіння азоту під час нормального атмосферного тиску – 196° С, а заморожування в рідкому азоті в 3...4 рази дорожче, ніж заморожування в повітряному середовищі.

Розрахунок процесів охолодження та заморожування

Охолодження твердих продуктів відбувається теоретично згідно з законом Фур'є про теплопровідність тіл під час нестационарного режиму. Спочатку охолоджуються поверхневі шари, а після цього охолодження поступово розповсюджується в глиб тіла (рис. 8.13). Через деякий час τ_0 , що складає тривалість охолодження продукту, температура всіх частин тіла вирівнюється і дорівнює температурі зовнішнього середовища t_c .

Для визначення тривалості охолодження τ_0 (у годинах) можна використати формулу А.Г. Фікіїна, яку застосовано для тіл правильної геометричної форми:

$$\tau_0 = A \frac{\delta^2}{a} \left[\left(\frac{2,3}{Bi} + 0,8 \right) \lg \frac{t_n - t_c}{t_k - t_c} + 0,12 \right], \quad (8.30)$$

де A – безрозмірний коефіцієнт форми (для пластини $A = 1$, для циліндра $A = 1/2$, для сфери $A = 1/3$); δ – половина товщини продукту, м; a – коефіцієнт температуропровідності продукту, м²/год; Bi – критерій Біо ($Bi = \alpha \delta \lambda_n$); α – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); t_n і t_k – початкова та кінцева температури в центрі продукту, °С; λ_n – коефіцієнт теплопровідності продукту, Вт/(м·К).

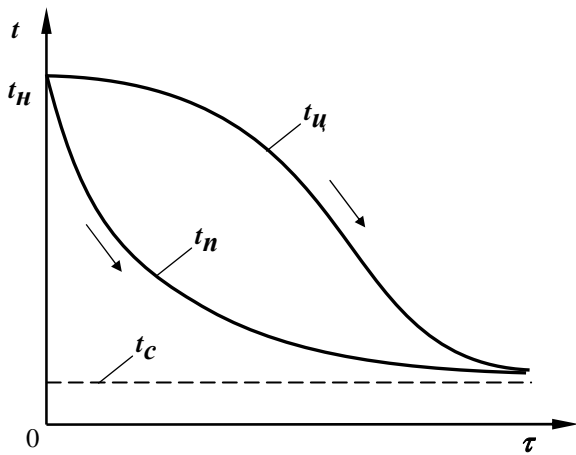


Рисунок 8.13 – Діаграма зміни температур у поверхневому шарі t_n і центральній частині t_u під час охолодження

Аналіз рівняння (8.30) показує, що тривалість охолодження продукту τ_0 збільшується пропорційно квадрату характерного розміру δ і знаходиться у зворотній пропорційній залежності від коефіцієнта теплопровідності a продукту. Зі збільшенням коефіцієнта тепловіддачі α збільшується Bi , а отже зменшується τ_0 .

Тривалість заморожування продукту τ_3 (у годинах) від початкової температури, що дорівнює криоскопічній $t_{кр}$ до температури зберігання (рис. 8.14), може бути визначена формулою Р. Планка з урахуванням форми тіла:

$$\tau_3 = \frac{q_3 \rho_3}{\Delta t} \delta A \left(\frac{\delta}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (8.31)$$

де q_3 – видалена теплота з одиниці маси продукту під час його заморожування, кДж/кг; ρ_3 – густина замороженого продукту, кг/м³; Δt – різниця температур між криоскопічною температурою продукту $t_{кр}$ і охолоджуючого середовища t_c , °С; λ – коефіцієнт теплопровідності замороженого продукту, Вт/(м·К); α – коефіцієнт тепловіддачі продукту в охолоджуюче середовище, Вт/(м²·К).

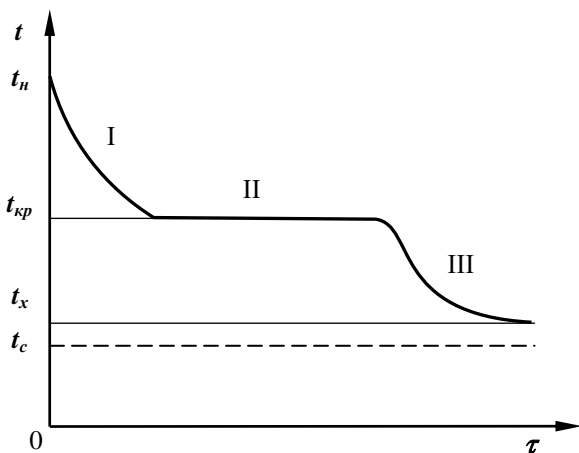


Рисунок 8.14 – Діаграма зміни температури продукту під час заморожування

З формул (8.30) і (8.31) виходить, що за одних і тих же умов тіло циліндричної форми охолоджується та заморожується вдвічі, а сферичної форми – втричі швидше, ніж у формі пластини розміром δ . Інтенсивність охолодження і заморожування доцільно підвищувати шляхом збільшення коефіцієнта тепловіддачі, температурної різниці та зменшення розмірів продукту.

Величина ефективного коефіцієнта тепловіддачі визначається засобом охолодження. Під час охолодження в повітряному середовищі конвективна тепловіддача (α_k) супроводжується теплообміном під час випаровування ($\alpha_в$) та радіаційним теплообміном (α_r).

При цьому:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_в + \alpha_r \quad (8.32)$$

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі α_k визначають з критеріального рівняння:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,17 Re^{0,7} \\ \text{або} \\ Nu &= 0,33 Re^{0,58}, \end{aligned} \quad (8.33)$$

де $Nu = \alpha_k 2 \delta \lambda_g$; $Re = v 2 \delta \vartheta_g$; v – швидкість повітря, м/с; λ_g – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К); ϑ_g – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м²/с.

Для визначення α_k можна використати емпіричну формулу:

$$\alpha_k = 6,15 + 4,18 v. \quad (8.34)$$

Коефіцієнт тепловіддачі під час випаровування вологи α_g з поверхні продукту S можна визначити за абсолютною втратою маси в процесі охолодження:

$$\alpha_g = \frac{W \cdot r_0}{S(t_n - t_c)}, \quad (8.35)$$

де W – кількість випарованої вологи, кг/с; r_0 – питома прихована теплота фазового перетворення води в пару без льодоутворення, $r_0 = 2483$ кДж/кг.

Радіаційний коефіцієнт тепловіддачі α_r визначається за формулою:

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon C_0 \varphi}{t_k - t_{BAT}} \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{BAT}}{100} \right)^4 \right], \quad (8.36)$$

де ε – ступінь чорноти; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К); φ – коефіцієнт опроміненості; T_{BAT} – температура поверхні батареї або холодного екрану, К; T_k – середня температура поверхні продукту, що охолоджується, яка дорівнює кріоскопічній, К.

Відзначимо, що під час повітряного охолодження α_r – величина незначна, вона становить приблизно 1 Вт/(м²·К). Під час охолодження продукту в рідкому середовищі або під час охолодження в контакт з твердими тілами має місце лише конвективна тепловіддача, тобто $\alpha = \alpha_k$.

Коефіцієнт теплопередачі під час охолодження твердого продукту визначається за формулою:

$$K = 1/(\delta/\lambda + 1/\alpha). \quad (8.37)$$

Знаючи коефіцієнт теплопередачі K , можна, використовуючи основне рівняння теплопередачі, встановити кількість відведеної теплоти під час охолодження продукту. При заморожуванні на межі розділу між продуктом та холодоносієм утворюється шар замерзлого продукту, що також треба враховувати. У зв'язку з цим сумарний коефіцієнт теплопередачі під час заморожування продукту можна подати таким рівнянням:

$$K = 1/(\delta_n/\lambda_n + \delta_z/\lambda_z + 1/\alpha), \quad (8.38)$$

де δ_n , δ_z – товщина незамерзлого та замерзлого шару продукту, м; λ_n , λ_z – коефіцієнти теплопровідності продукту та льоду, Вт/(м·К).

Основою розрахунків процесів охолодження і заморожування є теплові та матеріальні баланси. З метою спрощення рівнянь під час складання теплових балансів нехтують додатковими теплопритоками і втратами маси продукту.

Тепловий потік (у кВт) від тіла, що охолоджується:

$$Q_0 = Gc(t_n - t_k), \quad (8.39)$$

де G – масовий потік продукту, що охолоджується, кг/с; c – питома теплоємність продукту, кДж/(кг·К); t_n і t_k – середня об'ємна початкова і кінцева температури продукту відповідно, °С.

Кількість теплоти (у кВт), що повинна бути прийнята охолоджуючим приладом апарата з урахуванням біохімічного екзотермічного ефекту та масообмінного теплового ефекту, становить:

$$Q = Gc(t_n - t_k) + Q_{БХ} + W(r_k - r_0), \quad (8.40)$$

де $Q_{БХ}$ – внутрішнє тепловиділення під час біохімічного екзотермічного процесу, кВт; W – кількість випарованої вологи, кг/с; r_k – питома теплота конденсації та льодоутворення; r_0 – питома теплота випаровування води, кДж/кг ($r_0 = 2500$ кДж/кг).

Тепловий баланс під час заморожування продукту без обліку теплових втрат висловлюється рівнянням:

$$Q_{зм} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (8.41)$$

де $Q_{зм}$ – кількість теплоти, яка сприймається холодоносієм, кДж; Q_1 – кількість теплоти, що віддається продуктом під час його охолодження від початкової до криоскопічної температури, кДж; Q_2 – кількість теплоти, що віддається продуктом під час фазового перетворення води (утворення льоду), кДж; Q_3 – кількість теплоти, що віддається продуктом після заморожування під час його охолодження до температури зберігання, кДж.

Рівняння (8.41) теплового балансу під час заморожування можна подати в розгорненому вигляді таким чином:

$$Q_{зм} = Gc(t_n - t_k) + G_l r_k + Gc_k(t_k - t_x), \quad (8.42)$$

де G – маса продукту, кг; c , c_k – питома теплоємність продукту до і після заморожування, кДж/(кг·К); t_n – початкова температура продукту, °С; t_k – криоскопічна температура продукту, °С; t_x – кінцева температура замороженого продукту, °С; G_l – маса льоду, що утворився під час заморожування продукту, кг; r_k – прихована теплота льодоутворення кДж/кг ($r_k = 335$ кДж/кг).

Необхідна кількість (у кДж) холоду для заморожування може бути визначена також рівнянням:

$$Q_{зм} = G(i_n - i_k), \quad (8.43)$$

де i_n – початкова ентальпія продукту при середньооб'ємній початковій температурі t_n , кДж/кг; i_k – кінцева ентальпія продукту при середньооб'ємній кінцевій температурі t_k , кДж/кг. При цьому $t_n > t_k > t_x$.

Типи та конструкції апаратів для охолодження і заморожування

У залежності від призначення розрізняють апарати для охолодження і апарати для заморожування продуктів. За видом продуктів, що піддаються охолодженню і замороженню, розрізняють апарати для рідких, пластичних і твердих продуктів. У залежності від агрегатного стану охолоджуючого середовища, розрізняють: обладнання для охолодження і заморожування у повітряному середовищі, у рідкому середовищі, а також таке, що використовує твердий теплоносій (лід та «сухий» лід) і вакуум.

Охолодження і заморожування харчових продуктів у повітряному середовищі найбільш розповсюджені засіб. Розрізняють установки з природним переміщенням повітря (камери і тунелі) та зі змушеним рухом повітря (тунельні морозилки, гравітаційно-конвейерні та флюїдизаційні швидкоморозильні апарати). При невеликій кількості заморожуваного чи охолоджуваного продукту, використовують найпростіші апарати та пристрої. В умовах централізованого виробництва охолоджених і кулінарних виробів застосовують спеціалізовані апарати періодичної та безперервної дії.

Серед безперервно діючих апаратів для охолодження рідких продуктів застосовуються пластинчаті, трубчаті та зрошувальні охолоджувачі. Їхня будова принципово не відрізняється від теплообмінних апаратів, призначених для нагрівання.

До трубчатих теплообмінників (охолоджувачів) відносяться і спеціальні апарати – ультраохолоджувачі, в яких для охолодження використовують безпосередньо випаровуваний холодоагент. Вони являють собою апарат, в якому є декілька горизонтально розташованих елементів типу «труба в трубі». По внутрішній трубці кожного елемента протікає продукт, що обробляється, а по міжтрубному простору – холодоносій (аміак або фреон). Для запобігання продукту (вина, соку та ін.) від замерзання в порожнину внутрішньої труби вставлена мішалка. Значна швидкість руху оброблюваного продукту та його перемішування забезпечують швидке охолодження без замерзання. Ультраохолоджувачі можуть бути використані також для концентрування вина, соків та інших рідких продуктів їхнім виморожуванням.

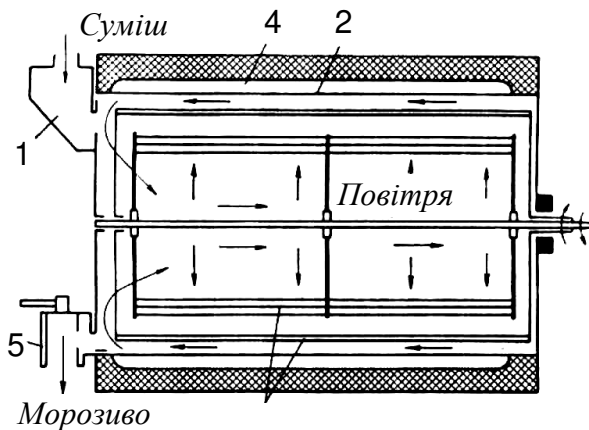


Рисунок 8.15 – Схема фризера періодичної дії

Специфічними теплообмінниками, призначеними для охолодження і часткового заморожування в'язких продуктів під час виробництва морозива, є так звані морожениці та фризери. У цих апаратах водночас із процесами охолодження та заморожування продукту відбувається його збивання, тобто насичення повітрям. Відзначимо, що звичайно у фризери температуру морозива доводять до мінус 5...6° С, причому в лід перетворюється до 65% води, що у

ньому міститься. Об'єм морозива в результаті збивання збільшується по відношенню до початкового об'єму суміші у 1,3...2 рази.

На рис. 8.15 наведено технологічну схему фризера періодичної дії.

Процес фризювання здійснюється таким чином. Через лійку 1 у морозильний циліндр 2 заливають певну порцію суміші (30...50% повної ємності циліндра). У циліндрі суміш перемішується мішалкою 3 і, віддаючи теплоту через стінку в охолоджуючу оболонку 4, замерзає. Ножі мішалки зрізають намерзлий шар. Водночас відбувається і збивання. Після закінчення циклу фризювання (12...15 хв.) морозиво вивантажується з циліндра через засувку 5. Рух суміші показано стрілками. Складаючись в основному з двох рухів – поступального та обертального, циркуляція суміші має гвинтовий характер. В охолоджуючу оболонку надходить холодоагент (розсіл, рідкий аміак або рідкий хладон), ззовні вона покрита шаром ізоляції, який облицьовано кожухом.

Очистка поверхні, яка передає тепло, що досягається зрізанням ножами з неї володіючого теплоізоляційними властивостями шару морозива, дає значне покращення теплообміну. Поряд з цим інтенсивно перемішується заморожена маса, збагачуються центри кристалізації та додатково відводиться теплота не лише з поверхні, але і від усієї суміші, яка знаходиться в циліндрі.

Принцип механічної інтенсифікації теплообміну, характерний для фризюрів, широко застосовується в інших теплообмінних апаратах, в яких шар, що нагромаджується на стінці, знімається з неї механічним способом (щітками, скрібками). До них належить і льодогенератор для одержання лускоподібного (сніжного) льоду, схему якого наведено на рис. 8.16.

Апарат являє собою порожній циліндр – корпус 3, оточений охолоджуючою оболонкою 2. У оболонку через штуцер 1 надходить рідкий холодоагент. На внутрішню поверхню циліндра насосом подають воду через форсунки 6. Стікаючи, вода замерзає тонким шаром льоду, що зрізається ножем 4, закріпленим на вертикальній осі 5, що обертається. Ніж 4 та трубка з форсунками 6 для розбризкування води обертається з однаковою частотою, бо їх насаджено на загальну раму 7. Отриманий лід разом із водою падає в піддон 8, звідки надходить у виробництво або для виготовлення брикетів.

Апарати для охолодження та заморожування твердих продуктів за видом контакту продукту з холодоносієм бувають контактними та безконтактними. У контактних апаратах продукт (без упаковки або разом із нею) має безпосередню межу розділу з холодоносієм, в безконтактних – безпосереднього контакту продукту з холодоносієм немає.

Як приклад контактного апарата з повітряним охолодженням, розглянемо холодильну шафу (рис. 8.17).

Такі апарати застосовують як для охолодження, так і заморожування різноманітних за формою і розмірами продуктів, що надходять на обробку в відносно невеликих кількостях. Апарати універсальні, прості та надійні в експлуатації, не вимагають значних затрат ручної праці. Всередині теплоізоляційної камери 1 знаходяться повітроохолоджувач 2, вагонетка 3 та

канал з відбивачами 4 у верхній частині апарата для організації поперечного руху повітря. Повітря з каналу всмоктується вентилятором, проходить через повітроохолоджувач, після цього обдуває продукти і знову надходить в канал.

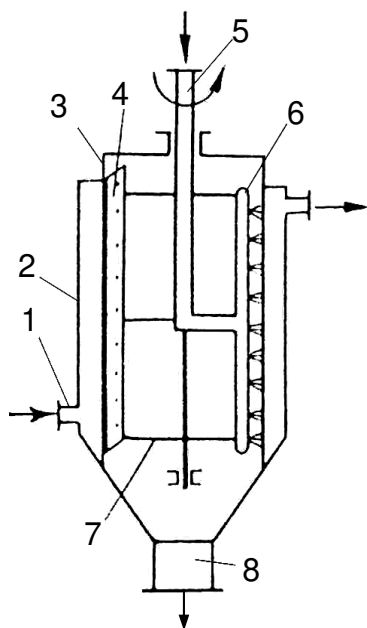


Рисунок 8.16 – Схема генератора лускоподібного льоду

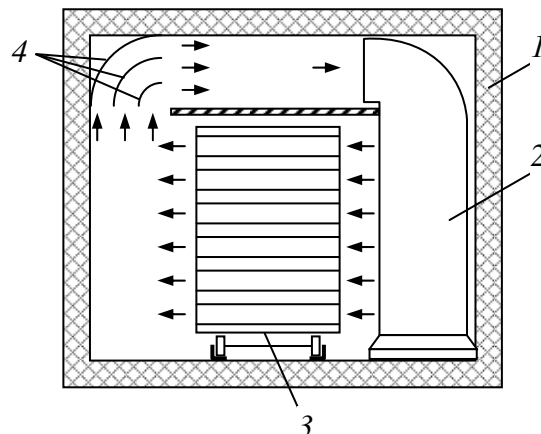


Рисунок 8.17 – Схема холодильної шафи

Продукт (м'ясо, риба, птиця, овочі, плоди) в упаковці або без неї вкладають на металеві листи (лотки) з проміжком, необхідним для циркуляції повітря, і встановлюють на вагонетку, яка заковчується в апарат через завантажувальні двері. У подібних апаратах режим обробки продукту залежить від температури, що створюється в повітроохолоджувачі.

Заморожування у рідких холодоносіях або криогенних рідинах більш ефективно, ніж у повітряному середовищі, бо інтенсивність тепловідводу від продукту при цьому різко зростає.

Продукт у них заморожується швидко, що забезпечує його гарну якість і

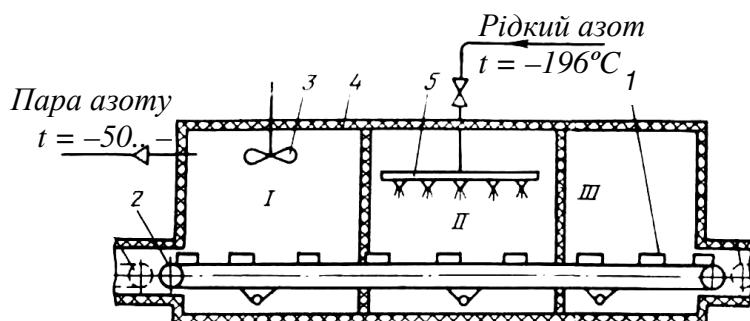


Рисунок 8.18 – Схема апарата заморожування продукту рідким азотом

невеликий розмір втрат маси (до 0,5%). Схему апарата для заморожування продуктів рідким азотом наведено на рис. 8.18. Апарат являє собою решітчастий конвейєр 2, теплоізолюючий камерою 4, в якій розміщені вентилятор 3 і зрошуючий пристрій 5. Для

максимального використання охолоджуючого ефекту азоту апарат по довжині розділений на три зони. Пара азоту з середньої зони II за допомогою

вентилятора спрямовується в зону попереднього охолодження I, де продукт 1 (може бути упакований в тонку, щільно прилеглу плівку) охолоджується до -1°C . Після цього продукт надходить в зону зрошення II, де відбувається його повне заморожування (температура в центрі до -10°C). Рідкий азот, який не випарувався, стікає в резервуар для рідкого азоту і насосом подається знову в форсунки. В останній третій зоні температура продукту вирівнюється по об'єму в середовищі газу. Продукт виводиться з апарата з температурою біля -20°C . Азот виходить з установки з температурою $-50\dots-60^{\circ}\text{C}$.

Відзначимо, що вартість криогенного заморожування харчових продуктів рідким азотом дуже висока із-за високої ціни азоту (в 3...4 рази дорожча, ніж заморожування в повітрі). У таких апаратах доцільно заморожувати ті продукти, натуральні властивості яких можна зберегти лише під час дуже швидкого заморожування і дуже низьких температур, наприклад рослинні продукти з ніжною консистенцією (малина, полуниця, цитрусові), продукти з панірованою поверхнею, пельмені. До криогенних морозильних апаратів належать також апарати, що працюють на зрідженому повітрі, азоті, вуглекислоті.

Широке розповсюдження в харчових виробництвах отримали контактні морозильні апарати, засновані на методі відводу теплоти з продукту під час безпосереднього контакту з охолодженою металевою поверхнею. До них належать багатоплиткові та мембранні апарати; за конструктивними особливостями вони бувають роторними, барабанными і стрічковими.

На рис. 8.19 наведено схему горизонтального багатоплиткового апарата з нижнім розташуванням гідравлічної силової системи.

Продукти (м'ясо, риба, сир, плоди, ягоди та ін.) 2 упаковують у картонні коробки або полімерну плівку і поміщують в апарат при віддалених одна від одної плитах 1. Після цього за допомогою гідравлічної силової системи 3 плити щільно притискаються до продукту. По краях плит вкладають дерев'яні рейки висотою на 2...3 мм менше висоти коробок. Вони захищають коробки від роздавлювання плитами. Постійний тиск підтримується спеціальним масляним клапаном. У плити через пружні сполучення надходить охолоджений до мінус 30°C розчин хлористого кальцію або стислий холодоагент, де він випаровується і охолоджує плити, а через них продукт. Апарати мають від 6 до 21 плити.

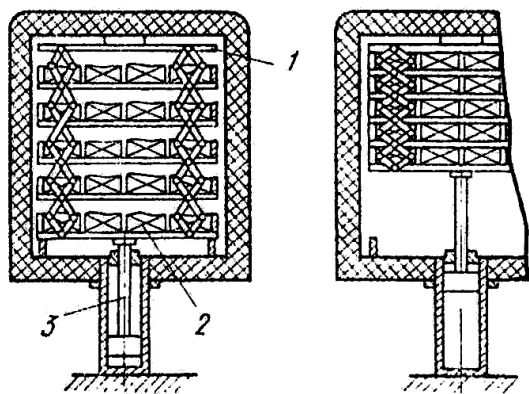


Рисунок 8.19 – Горизонтальний багатоплитковий апарат

Наприкінці відзначимо процес вакуумного охолодження і заморожування продуктів, здійснюваний у вакуум-охолоджувачах і вакуум-заморожувачах. У них продукт охолоджується за рахунок випаровування частини води, бо при цьому витрачається теплова енергія на пароутворення.

Кінцева температура залежить від глибини розрідження і відповідає температурі пари при тиску в апараті. Наприклад, при розрідженні в охолоджувачі 680 мм рт.ст. (остаточний тиск 80 мм рт.ст.) продукт за рахунок самовипаровування охолоджується на 50° С. Вакуум-охолоджувач являє собою герметичну посудину, з'єднану з конденсатором і вакуум-насосом. З цією метою може бути використаний вакуум-випарний апарат із двотільною нагрівальною камерою. Кількість води, що випарувалася шляхом самовипаровування, знаходять з рівняння теплового балансу:

$$W = \frac{Gc(t_1 - t_2)}{r},$$

де W – кількість води, що випарувалася, кг; r – теплота випаровування, відповідна тиску над дзеркалом випаровування, кДж/кг; G – маса продукту, що охолоджується, кг; c – середня теплоємність продукту, кДж/(кг·К); t_1 і t_2 – початкова і кінцева температури продукту, °С.

Сутність процесу розморожування. Розморожування продуктів здійснюють перед випуском у реалізацію, кулінарною обробкою або промисловою переробкою. Метою цього процесу є повернення продукту в стан, близький до вихідного, що він мав перед заморожуванням. У підприємствах ресторанного господарства процес розморожування є одним із основних, бо значна частина сировини і напівфабрикатів надходять на підприємства галузі в замороженому стані.

Процес розморожування продукту проходить зі зміною його агрегатного стану – кристали льоду в продукті перетворюються в рідину. Процес теплообміну в цьому випадку складається з двох стадій: теплота підводиться до поверхні замороженого продукту, а після цього передається на глибину продукту через талу зону; причому коефіцієнт теплопровідності розмороженого продукту в 2...2,5 рази нижчий, ніж замороженого. Тому при великому перепаді температур між продуктом і навколишнім середовищем легко виникають місцеві перегрівання поверхні, які негативно впливають на якість продуктів.

Існують два методи розморожування продуктів: поверхнєве і внутрішнє нагрівання. При поверхневому нагріванні енергія для відтавання поступає від поверхні продукту, а як носії теплоти використовують повітря, пароповітряні суміші, рідину (вода, розсіл). Під час внутрішнього нагрівання тепла енергія виділяється всередині продукту, при цьому для одержання теплоти використовують струми НВЧ, ІЧ-промені та ультразвук. Методи внутрішнього нагрівання пов'язані з більшими енергетичними витратами, ніж розморожування в повітрі або у воді, але дуже прості, гігієнічні та технологічні; вони знаходять застосування, в основному, для розморожування, розігрівання та приготування кулінарних виробів.

Частіше за все розморожування здійснюється в спеціальних камерах із посиленою циркуляцією повітря, яке кондиціонується – дефростерах. Температуру повітря, що циркулює, поступово збільшують, підтримуючи її

постійно на 5...6° С вище температури продукту, що розморожується, вологість повітря підтримують на рівні 80%. Розморожування вважається завершеним при досягненні в товщі продукту криоскопічної температури.

У воді продукти розморожують шляхом занурення (наприклад, м'ясо, рибу, птицю) або зрошенням. Під час розморожування у воді скорочується тривалість процесу і виключається втрата маси внаслідок випаровування вологи.

Теорія процесу розморожування. Перенесення теплоти під час розморожування описується рівняннями теплопередачі та теплового балансу. Кількість теплоти Q , що треба підвести до продукту, складається з теплоти Q_1 , необхідної для підвищення температури продукту від t_x до t_k , Q_2 – теплота відтавання і Q_3 – теплота, необхідна для можливого підвищення температури розмороженого продукту від t_k до t_n всередині, тобто теплоти опечлювання.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Gc_3 (t_k - t_x) + G_l r_k + Gc (t_n - t_k),$$

де G – маса продукту, кг; c_3 і c – питома теплоємність продукту до і після розморожування, кДж/(кг·К); t_k – криоскопічна температура продукту, °С; t_x і t_n – початкова (зберігання) і кінцева температури продукту, °С; G_l – маса розплавленого льоду (вологи продукту), кг; r_k – теплота плавлення льоду, кДж/кг.

Рівняння теплопередачі:

$$Q = K S \Delta t_{сеп.} \tau,$$

де S – поверхня контакту продукту з теплоносієм, м²; $\Delta t_{сеп.}$ – середня різниця температур між продуктом і теплоносієм, °С; τ – тривалість процесу, с; K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К).

Останній є змінною величиною і визначається, як:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}, \quad (8.44)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від гріючого середовища до продукту, Вт/(м²·К); δ_p і δ_3 – відповідно товщина розмороженого і замороженого шарів продукту, м; λ_p і λ_3 – відповідно коефіцієнти теплопровідності розмороженого і замороженого шарів продукту, Вт/(м·К).

Значення величин λ , α , K коливаються в широких межах залежно від виду, властивостей, розмірів і форми продуктів; вони визначаються, в основному, експериментально.

Апарати для розморожування продуктів. Розрізняють апарати з підведенням теплоти до поверхні продукту і з об'ємним нагріванням продукту. У свою чергу, апарати для розморожування з підведенням теплоти до поверхні продукту поділяють на повітряні й рідинні. Апарати з повітряним обігріванням працюють аналогічно апаратам для заморожування. Тільки замість

охладжуючих у них встановлюють нагрівальні батареї. Апарат, де здійснюють розморожування, обладнують кондиціонерами або калориферами і системою повітряних каналів. Він має теплоізоляційну огорожуючу конструкцію, всередині якої розташовуються системи транспортування продукту, подачі повітря, автоматичного управління та регулювання. Під час розморожування в повітрі перепад температур між повітрям і продуктом повинен забезпечити відсутність точки роси з метою запобігання конденсації вологи. При розморожуванні продуктів (в основному – м'яса) в пароповітряному середовищі досягається значне прискорення процесу, тому що отеплювання відбувається конденсуючою парою.

Рідинні апарати для розморожування бувають занурювальними і зрошувальними. У занурювальних апаратах продукт поміщують у гарячу воду, а в зрошувальних розморожувачах гаряча вода зрошує продукт із спеціальних розбризкуючих приладів.

Під час розморожування НВЧ-енергією найбільш істотними чинниками, що впливають на протікання процесу і кінцевий результат, є потужність НВЧ-енергії, маса продукту, що розморожується і тривалість процесу (до 4...5 хв). Такі чинники, як температура повітря довкілля, його відносна вологість, відіграють незначну роль і в деяких випадках взагалі не впливають на процес розморожування в НВЧ-полі. У промисловості використовується конвеєрна НВЧ-установка з частотою збудження 433 МГц потужністю 6 кВт для розморожування м'ясних блоків. Тривалість впливу НВЧ-енергії при цьому складає 4 хв.

ЛЕКЦІЯ № 9

СПЕЦИФІЧНІ ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

План

1. Процес в'арення.
2. Смаження.
3. Пастеризація.
4. Стерилізація.
5. Інтенсифікація теплових процесів. Регенерація теплоти.

9.1. Процес в'арення

В'арення – це процес гідротермічної обробки продуктів із метою доведення їх до стану готовності. Воно знаходить широке застосування при виробництві продуктів у підприємствах ресторанного господарства та технологічних процесах низки харчових виробництв. Так, при виробництві спирту одним із найбільш важливих процесів є розварювання зерна і картоплі, у пивоварінні варять хмільне пивне сусло, у консервному і кондитерському виробництвах варять джеми, повидло, начинки тощо. При варенні змінюються

білки, жири, вуглеводи, вітаміни, мінеральні та смакові речовини, які містяться в продуктах, що впливає на засвоюваність, харчову цінність, масу, смак, запах і колір цих продуктів. Під час варення денатуруються і коагулюються білки, колаген сполучної тканини м'ясо-рибних продуктів переходить у глютин, знищується більшість вегетативних форм мікробів, інактивуються ферменти. Жири у процесі варення переходять у воду і емульгують, розпадаючись на дрібні жирові кульки, які під час бурхливого кипіння і тривалого нагрівання утворюють гліцерин і жирні кислоти, які в свою чергу надають бульйону каламутного кольору і неприємного смаку і запаху. Тому бульйон варять за слабого кипіння, знімаючи з його поверхні жир.

Крохмаль, що нагрівається з водою, клейстеризується, поглинаючи вологу; завдяки цьому збільшується маса круп, бобових і макаронних виробів.

Продукти рослинного походження розм'якшуються, бо протопектин, що міститься в стінках клітин, переходить у розчинний пектин.

Основною метою розварювання сировини, яка містить крохмаль (зерно, картопля), широко застосовуваного у виробництві спирту, є руйнування клітинних стінок, звільнення крохмалю з клітин і переведення його в форму, в якій він швидше і легше оцукрюється ферментами. Розварювання сировини проводять шляхом обробки його парою з тиском 0,4...0,5 МПа, в основному за двома схемами: за температури 130...140° С і тривалості варення 50...60 хвилин; за температури 165...172° С і тривалості варення 2...4 хвилини.

Під час варення (у воді, бульйоні, молоці або насиченій парі) відбувається рівномірне прогрівання продуктів за всім об'ємом до стану кулінарної готовності при повному або частковому зануренні їх у середовище, що обігрівається. Кулінарна готовність багатьох продуктів визначається не лише температурою в їхніх центральних шарах, але, головним чином, за змінами, що відбуваються з основними їхніми компонентами.

Відзначимо, що варення, як теплообмінний процес, супроводжується масообміном – мають місце екстрагування, сорбція, розчинення тощо. Частина розчинних речовин (білки, вуглеводи, мінеральні солі, екстрактивні та фарбуючі речовини, вітаміни) переходять у рідину. Найбільша екстракція спостерігається при основному способі варення, значно менша – при припусканні та тушкуванні, і цілком незначна – при варенні парою. Кількість екстрагованих речовин зростає із збільшенням тривалості та температури процесу варення.

При варенні відбуваються як бажані, так і небажані зміни в різноманітних продуктах. Особливо це стосується варення круп. Так, наприклад, під час варення в крупах утворюються одоруючі речовини, що надають крупам у нагрітому стані неприємний і незвичний запах, а інколи і прогірклий смак. Ці речовини можна легко видалити з парою. Але якщо варення здійснюється в герметично закритій посудині, пара нікуди не видаляється, а конденсується (захоплюючи при цьому і одоруючі речовини) та всмоктується продуктом.

Класифікація способів варення та їх характеристика

Усі способи варення можна класифікувати за декількома ознаками. За технологічною ознакою існують такі способи варення: у великій кількості

рідини (основний спосіб), у малій кількості рідини (припускання, тушкування та бланшування). За видом гріючого середовища (теплоносія) розрізняють варення: в рідині (у воді, бульйоні, відварі, молоці, сокові, сиропі), в атмосфері пари, пароводяній і пароповітряній суміші. Окрім цього, розрізняють варення під атмосферним тиском, під надлишковим тиском і під вакуумом. Від тиску, за якого здійснюється варення в рідині, залежить температурний режим процесу, відповідно 98...100° С – під атмосферним тиском, 110...120° С – під надлишковим тиском і 60...80° С – у вакуумі.

Варення здійснюють також нагріванням: конвективним, кондуктивним, електроконтактним, інфрачервоним і в електромагнітному полі ВЧ і НВЧ.

У кулінарній практиці застосовуються комбінації основних прийомів варення.

Зупинимось більш докладно на розгляді двох основних способів варення – в рідині та атмосфері насиченої та перегрітої пари. Варення у рідині під атмосферним тиском можна проводити у двох режимах. При першому рідину з продуктом доводять до кипіння, далі температуру дещо знижують (на 2...3° С) і продовжують варення при слабкому (тихому) кипінні. Другий режим полягає у тому, що рідину з продуктом доводять до кипіння, витримують деякий час за цієї температури, а після цього припиняють підведення теплоти. Кулінарна готовність продукту досягається за рахунок теплоти, що акумулювалася апаратом, рідиною і продуктом. Зміна температури рідини і продукту в робочій ємності варильного апарата при другому режимі варення перших страв можна простежити на прикладі одного з характерних графіків (рис. 9.1). На цьому графіку ділянка 1-2 характеризує нагрівання рідини до кипіння; 2-3 – сильне кипіння; 3-4 – закладання продукту; 4-5 – нагрівання до кипіння; 5-6 – сильне кипіння; 6-7 – зниження температури; 7-8 – слабе кипіння; 8-9 – акумулювання теплоти. Завантаження продукту для варення в киплячу воду зменшує перехід розчинних речовин в бульйон. Теплофізичні

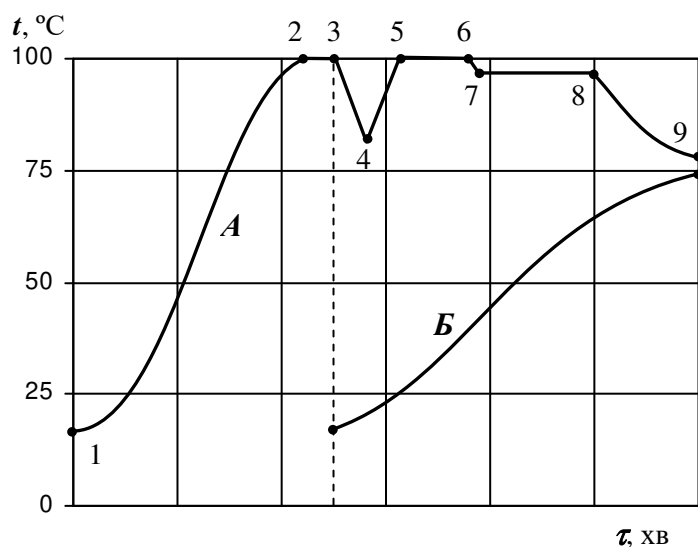


Рисунок 9.1 – Графік зміни температур рідини (А) і продукту (Б) під час варення

закономірності варення продукту в рідині буде розглянуто нижче. Залежно від параметрів варення з використанням водяної пари поділяють на варення в атмосфері вологої насиченої пари (за температури 100...120° С), варення в атмосфері перегрітої пари (за температури 140...180° С), варення пароповітряною сумішшю (за температури 80...90° С). Під час варення в атмосфері насиченої пари на поверхні

продукту утворюється плівка конденсату і теплота передається від пари до продукту через цю плівку за рахунок теплопровідності. При варенні в атмосфері перегрітої пари плівка конденсату утворюється на поверхні продукту лише в самому початку процесу, при первинному прогріванні. Після цього вона випаровується і передавання теплоти від пари до продукту здійснюється безпосередньо конвекцією. За рахунок високої температури при варенні в атмосфері перегрітої пари на продукті завдяки реакції меланоїдиноутворення з'являється рум'яна скоринка, що виявляє певний термічний опір теплопередачі. При варенні на парі, порівняно з варенням у воді, істотно знижуються втрати продуктами харчових речовин і маси, скорочується час варення. Прогрівання продуктів при варенні вологою насиченою парою має три основних періоди, що добре видно на прикладі варення овочів (рис. 9.2). Перший період – період прогрівання продукту, його тривалість у основному визначається геометричними розмірами продукту (5...10 хвилин). Другий період – період постійної швидкості процесу (температура змінюється лінійно). У цьому періоді теплота витрачається на випаровування вологи з поверхні продукту і на нагрівання самого продукту. Третій період – період спадної швидкості процесу – характеризується вирівнюванням температури за об'ємом продукту і наближенням її до температури гріючого середовища.

У останній час широке розповсюдження отримало варення пароповітряною сумішшю. Воно найбільш раціональне під час варення ковбасних виробів. При цьому повітря насичене водяною парою до 90...95%, а мінімальна різниця парціальних тисків пари в повітрі та на поверхні продукту приводить до виключення випаровування вологи з продукту, підвищенню коефіцієнта тепловіддачі.

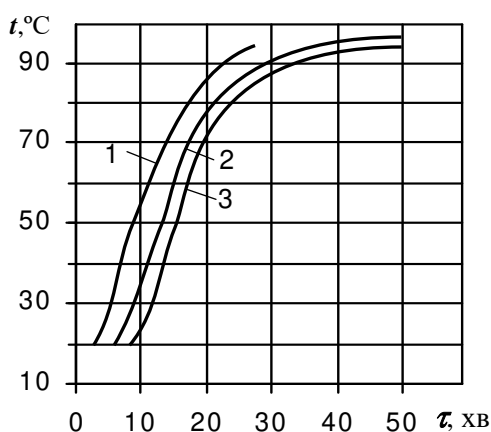


Рисунок 9.2 – Графік зміни температури під час варення паром: 1) морква; 2) буряк; 3) картопля

У кінці наведемо стислу характеристику допоміжного прийому теплової обробки продуктів – бланшування. Це процес короткочасної (від 1 до 5 хвилин) теплової обробки плодоовочевої сировини, м'яса і риби за певної температури у воді, паром або у водних розчинах солі, цукру, органічних кислот або лугів. Мета бланшування залежить від виду і призначення продукту. У більшості випадків бланшування застосовують для досягнення такої мети:

- збереження природного кольору продукту, що досягається руйнуванням окислювальних ферментів під впливом порівняно високих температур (70° С і вище);
- зміни консистенції, об'єму та маси плодів та овочів;

– підвищення проникливості протоплазми клітин плодів і овочів, що полегшує подальше вичавлювання соку на пресах;

– часткового знищення мікроорганізмів, головним чином тих, що знаходяться на поверхні продуктів; полегшення очищення і виділення шкірки від плодів і овочів.

Плоди і овочі бланшуються частіше за все в цілому вигляді, м'ясо і риба – шматками. При бланшуванні у гарячій воді спостерігаються втрати цінних розчинних поживних речовин (цукру, кислот, вітамінів та ін.). Для зменшення втрат розчинних речовин, бланшування проводять у водному розчині солі, або у середовищі водяної пари.

Теплофізичні закономірності процесу варення

Весь процес варення в рідині можна розбити на два етапи. Перший полягає у нагріванні рідини до температури кипіння, другий – у нагріванні продукту до необхідної температури.

Тривалість нагрівання рідини до кипіння у варильному апараті залежить від багатьох чинників: теплофізичних характеристик і початкової температури рідини, величини коефіцієнта теплопередачі, поверхні нагрівання, температурного напору. Без урахування теплових втрат тривалість нагрівання може бути визначена з рівняння теплового балансу:

$$Gc(t_k - t_n) = K S \Delta t_{сеп} \tau,$$

Звідки:

(9.1)

$$\tau = \frac{Gc(t_k - t_n)}{K S \Delta t_{сеп}},$$

де G – кількість рідини, кг; c – питома теплоємність рідини, Дж/(кг·К) t_k і t_n – відповідно температура кипіння і початкова температура рідини, °С; K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); S – робоча поверхня варильного апарата (поверхня теплообміну), м²; $\Delta t_{сеп}$ – температурний напір, °С.

Цілком очевидно, що скорочення тривалості нагрівання можна досягти за рахунок збільшення коефіцієнта теплопередачі та температурного напору. Про основні шляхи досягнення цього буде сказано далі.

Нагрівання продукту, поміщеного в киплячу рідину (у парове середовище), здійснюється під час підведення теплоти до його зовнішньої поверхні. Теплообмін між гріючим середовищем (рідиною або паром) і продуктом, що нагрівається, здійснюється, в основному, конвекцією, а перенос теплоти від поверхні продукту до його центральної частини – теплопровідністю.

Більшість харчових продуктів мають відносно низький коефіцієнт теплопровідності, що і визначає тривалість процесу їхньої теплової обробки. Як було вже відзначено, під час теплової обробки продукту в киплячій рідині, необхідно нагріти всю масу продукту до певної температури і витримати за неї для здійснення процесів, пов'язаних із хімічними змінами окремих складників продукту (перехід колагену в глютин, протопектина у пектин та ін.). Тривалість за часом теплової обробки продукту являє собою суму двох складових:

тривалість нагрівання продукту до заданої температури в центрі та тривалості процесу власне варення за постійної температури. Особливий інтерес являє аналіз першого етапу процесу, коли температурне поле продукту змінюється в часі, тобто є функцією часу. Такі теплові процеси називаються нестационарними. Про характер зміни температури однорідного продукту за час прогрівання дають уявлення криві на рис. 9.3, де t_c – температура на поверхні, t_u – температура у центрі продукту, t_p – температура рідини.

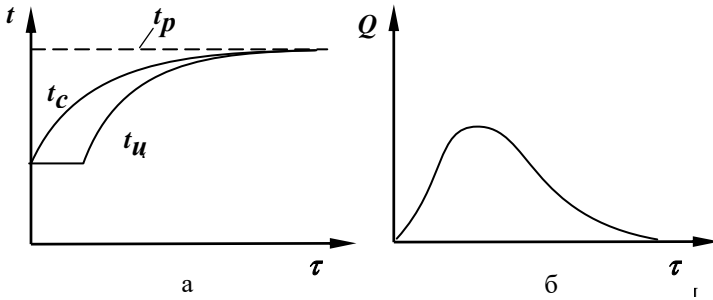


Рисунок 9.3 – Характер зміни температури (а) та кількості теплоти (б) в процесі нагрівання продукту

Через деякий час температура всіх частин продукту вирівнюється і дорівнює температурі довкілля, тобто настає теплова рівновага. За умов нестационарного режиму інтенсивність підведення теплоти також мінлива в часі. У міру прогрівання продукту кількість сприйнятої теплоти спочатку збільшується, досягає деякого

максимуму, після цього зменшується і в межах теплової рівноваги дорівнює нулю. Через те, що швидкість зміни ентальпії прямо пропорційна здатності матеріалу проводити теплоту (тобто коефіцієнта теплопровідності λ) і обернено пропорційна його акумулюючій здатності (тобто об'ємній теплоємності $c \cdot \rho$), то в цілому швидкість нагрівання продукту за нестационарного режиму визначається значенням температуропровідності $a = \lambda / c\rho$. Зміна температурного поля твердого тіла за нестационарного режиму описується диференціальним рівнянням теплопровідності (рівнянням М. Фур'є):

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (9.2)$$

Залежність зміни температури і кількості теплоти в часі для будь-якої точки тіла в кожному конкретному випадку може бути знайдена аналітичним способом у результаті розв'язання рівняння (9.2) спільно з умовами однозначності (краєвими умовами), що являють собою математичне описання всіх поодиноких особливостей явища, що розглядається. Умови однозначності складаються з геометричних (що характеризують форму та розміри системи, в якій протікає процес), фізичних (властивості середовища і тіла), тимчасових (що характеризують початковий стан і особливості протікання процесу в часі) і граничних (характеризуючих особливості протікання процесу на межі тіла) умов. Наприклад, вказується, що досліджувальним тілом є пластина з розмірами l_1, l_2, l_3 , матеріал тіла характеризується фізичними параметрами λ, ρ і c , в початковий момент часу ($\tau = 0$) температура на поверхні та в центрі тіла однакова ($t_c = t_u = \text{const}$), відома і температура довкілля t_p . Тоді теплообмін між

довкіллям і поверхнею продукту можна оцінити, використовуючи закон Ньютона-Ріхмана:

$$dQ = \alpha(t_p - t_c) dS.$$

Згідно з цим законом кількість теплоти dQ , що передається від рідини продукту, пропорційна поверхні теплообміну (поверхні продукту) dS , різниці температур рідини t_p і поверхні продукту t_c та коефіцієнта тепловіддачі α , що залежить від багатьох чинників.

Кількість теплоти, яка протікає від поверхні тіла всередину, визначається законом Фур'є:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dn} dS.$$

Зіставляючи рівняння Ньютона-Ріхмана і Фур'є, отримаємо:

$$-\frac{dt}{dn} = \frac{\alpha}{\lambda}(t_p - t_c). \quad (9.3)$$

Шукана функція:

$$\tau = f(t), \quad (9.4)$$

де τ – тривалість теплової обробки, с; t – температура нагрівання продукту, °С. Ці величини є критеріями подібності, вони одержуються з рівнянь (9.3) і (9.4):

$$a l / \lambda = Bi - \text{критерій Біо};$$

$$a \tau l^2 = Fo - \text{критерій Фур'є}.$$

Функціональна залежність має вигляд:

$$Fo = f(Bi), \quad (9.5)$$

або

$$\tau = f(Bi, l^2/a), \quad (9.6)$$

де l – лінійний розмір продукту, м; a – коефіцієнт температуропровідності продукту, м²/с; λ – коефіцієнт теплопровідності продукту, Вт/(м·К).

Стосовно до процесу варення критерій Біо Bi характеризує відношення внутрішнього термічного опору теплопровідності продукту до зовнішнього термічного опору тепловіддачі від теплоносія до продукту. Визначити числове значення Bi , хоч і наближено, не складає труднощів, бо значення α можна розрахувати за відомими критеріальними рівняннями. Значення коефіцієнта теплопровідності приймають усередненим для усього шматка продукту.

На основі теоретичного аналізу і узагальнення емпіричних даних отримано таку залежність:

$$\tau = \left(\frac{c \rho}{\Psi \alpha S_{num}} \right) l n \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_k} \right), \quad (9.7)$$

де Ψ – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від критерію Bi ; c – усереднена питома теплоємність продукту, Дж/(кг·К); ρ – густина продукту, кг/м³; Δt_n та

Δt_k – відповідно початкова і кінцева різниця температур між довкіллям (теплоносієм) і продуктом; S_{num} – питома поверхня шматків продукту.

Як виходить з (9.7), одним із найважливіших чинників, що визначають тривалість нагрівання продукту, є питома поверхня шматків продукту, яка, у свою чергу, залежить від їхніх розмірів і форми.

Для шматків продукту, що мають форму паралелепіпеда:

$$S_{num} = \frac{S}{V} = \frac{(2bh + 2lh + 2bl)}{blh} = 2 \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right), \quad (9.8)$$

де S – поверхня шматка продукту, м²; V – об'єм шматка, м³; b, l, h – відповідно ширина, довжина і висота паралелепіпеда, м.

Найгірші умови для нагрівання продукту (найменша питома поверхня) створюються у тому випадку, коли шматки продукту мають форму куба, найкращі – для пластини.

Для шматків циліндричної форми радіусом R і висотою h

$$S_{num} = \frac{2}{R} + \frac{2}{h}. \quad (9.9)$$

Для того щоб можна було скористатися формулою (9.7), необхідно встановити значення ψ для основних видів продуктів, що піддаються варенню з урахуванням їхньої структури і форми. У зв'язку з цим слід відзначити, що властивості та структура харчових продуктів за об'ємом, як правило, не однакові, тому ізотермічні поверхні продукту в різноманітних його шарах можуть мати найвигадливішу конфігурацію. Це призводить до того, що швидкість нагрівання продукту в різноманітних напрямках також може бути неоднаковою.

Основні типи варильних апаратів

У харчовій промисловості та ресторанному господарстві знаходять застосування різноманітні варильні апарати, що можуть бути класифіковані за низкою ознак. Передусім, варильні апарати поділяються на апарати для варення в киплячій рідині, для варення в атмосфері вологої насиченої водяної пари, перегрітої пари та пароповітряної суміші.

За структурою робочого циклу вони можуть бути періодичної та безперервної дії. За тиском, а отже, за температурою обробки, розрізняють апарати, що працюють за таких умов:

– під атмосферним тиском (температура 100° С) – стравоварильні котли, пароварильні шафи, сосисковарки, термоагрегати і різноманітні варильні апарати безперервної дії;

– під надлишковим тиском (тиск до 0,7 МПа, температура до 180° С) – автоклави, пароварильні камери і агрегати безперервного розварювання крохмалистої сировини;

– під вакуумом (температура нижче 100° С) – вакуум-апарати, вакуум-камери, вакуум-горизонтальні котли.

Найбільшу групу складають апарати оболонкового типу – стравоварильні котли, де варення відбувається зануренням у рідину. Котли бувають перекидні

та з нижнім розвантаженням готового продукту, відкриті або герметично закриті, з мішалкою або без неї. Внутрішня поверхня у них буває емальованою,

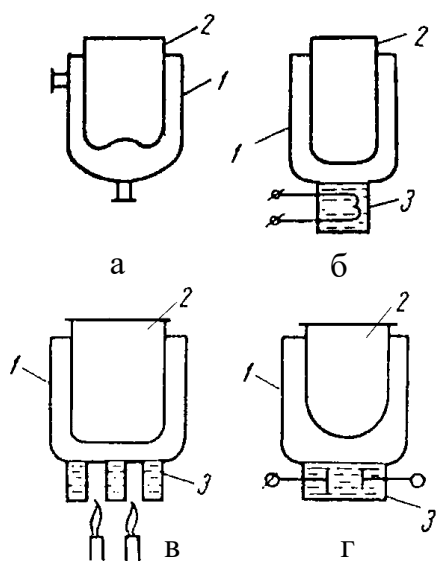


Рисунок 9.4 – Схеми стравоварильних котлів із оболонками

з нержавіючої сталі та іншого корозієстійкого матеріалу. Залежно від виду енергоносія котли поділяють на електричні, газові, парові та твердопаливні. У котлах варять бульйони, перші та солодкі страви, гарніри, соуси, маринади, каші, ковбасні та інші фаршеві вироби в оболонці, джеми, варення тощо.

Схеми основних типів стравоварильних котлів із оболонками наведено на рис. 9.4. Основними частинами стравоварильного котла є варильна посудина 2, парогенератор 3, пароводяна оболонка 1, постамент, контрольно-вимірювальна апаратура. У котлів, які перекидаються, крім того, є механізм перекидання. Зовні котли покриваються теплоізоляцією та облицьовуються кожухом.

Розглянуті нами стравоварильні котли з оболонками носять ще назву апаратів із непрямим обігрівом, тобто з теплоносієм. Використовуються і теплообмінні апарати, в яких є поверхневі нагрівачі, але немає теплоносія – стравоварильні котли з безпосереднім обігрівом. За приклад наведемо котел, схему якого надано на рис. 9.5.

Для обігрівання варильної посудини 3 використано гнучкі нагрівальні елементи 4, розташовані на її боковій поверхні, що дозволяє здійснити рівномірне підведення теплоти. Електронагрівальний елемент із зовнішнього боку покритий шаром теплової ізоляції 6. Котел має кришку 2, кожух 1, між кожухом і шаром теплоізоляції знаходиться повітряний прошарок 7. Пускорегулююча апаратура розміщена під пультом управління 5.

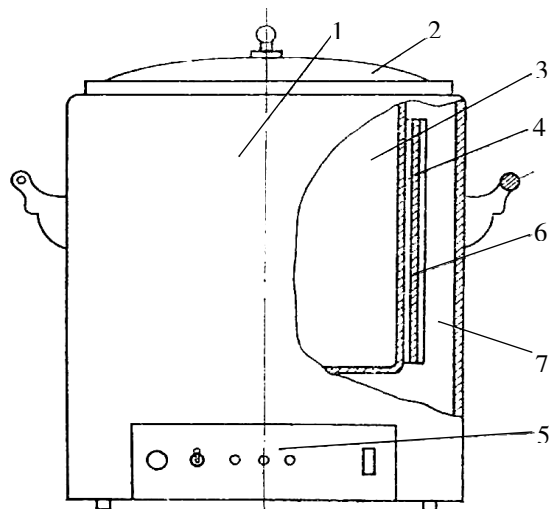


Рисунок 9.5 – Схема стравоварильного котла з гнучким електронагрівачем

У апаратів із безпосереднім обігріванням порівняно з котлами з непрямим обігріванням значно нижча питома витрата енергії (на 5%) і металоємність (на 40%).

На підприємствах ресторанного господарства для варення бульйонів, а також швидкого варення овочів і бобових використовуються автоклави. Автоклав являє собою стравоварильний котел із герметичною кришкою, що закривається. Завдяки цьому тиск у варильній посудині досягає 0,3 МПа, а температура варення – 130...135° С. Це сприяє

швидкому прогріванню продуктів і значному прискоренню масообмінних процесів, що відбуваються при цьому.

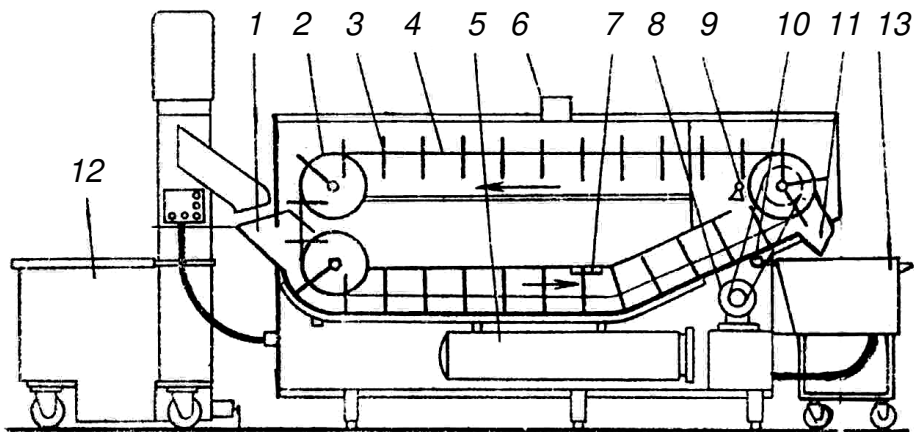


Рисунок 9.6 – Апарат для варення продуктів у киплячій воді

Для механізації процесів варення деяких виробів (макарони, рис, картопля, фрикадельки) у киплячій воді призначено автоматизований апарат безперервної дії (рис. 9.6).

Апарат являє собою ланцюговий транспортер 4 з пластинами 3, привідною і натяжною зірочками 2 та приводом 8. Транспортну систему розміщено в корпусі, що має в нижній частині короб із киплячою рідиною, завантажувальний лотік 1, розвантажувальний лотік 11, вентиляційний отвір 6 і переливні отвори 7 та 10.

Транспортер діє переривчасто: під час завантаження і вивантаження його чашечок і протягом процесу варення він залишається нерухомим. Залежно від виду їжі, яка готується, апарату задається певна програма роботи, що виконується автоматично. До складу апарата входить вузол 5 для приготування окропу, працюючий на парі невисокого тиску (30...50 кПа), що виробляється в електричному парогенераторі. У апараті здійснюється безперервна регенерація води і систематичний контроль свіжості води, що надходить. У випадку необхідності залишки продукту видаляються за допомогою пристосування для пропарення апарата 9. Апарат комплектується візками – завантажувальним 12 і розвантажувальним 13, який обігривається. Для варення м'яса, різноманітних м'ясних і ковбасних виробів, риби, овочів на парі застосовуються пароварильні шафи, різноманітні пароварки, камери і термоагрегати.

У цих апаратах, що являють собою контактні теплообмінники, обігрівання продуктів здійснюється гострою парою, тобто під час безпосереднього співдотику насиченої пари з продуктами. При цьому пара, конденсуючись, віддає теплоту пароутворення продукту, який термічно обробляється. За конструкцією розрізняють пароварильні шафи з парогенератором (рис. 9.7 а, б) і без нього (рис. 9.7 в).

Пароварильна шафа з власним парогенератором 2 має робочу камеру 5, в якій на перфорованих полицях 6 встановлюється посуд із продуктами, які обробляються. Камера закривається дверцятами 7 з ручкою-засувом; ззовні

вона покривається теплоізоляцією 4. У основі 1 розміщено парогенератор 2 з нагрівальними елементами 3 і живильним бачком із поплавковим клапаном.

Пароварильні камери, що застосовуються в різних галузях харчової промисловості та термоагрегати мають таку ж принципову будову, як і пароварильні шафи, але більш високу продуктивність.

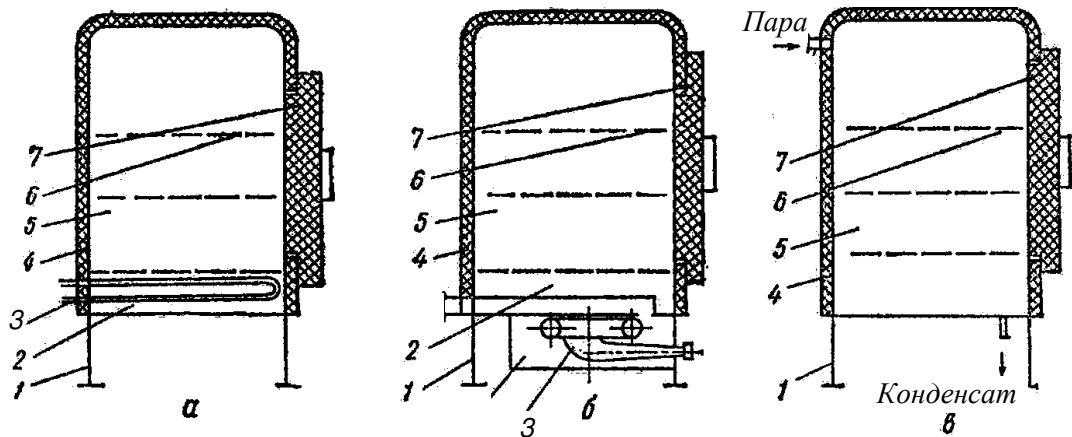


Рисунок 9.7 – Принципові схеми пароварильних шаф

Знаходять застосування і різноманітні пристрої безперервної дії малої продуктивності. Схему одного з таких пристроїв, призначеного для варення на парі пельменів, вареників та інших аналогічних виробів наведено на рис. 9.8.

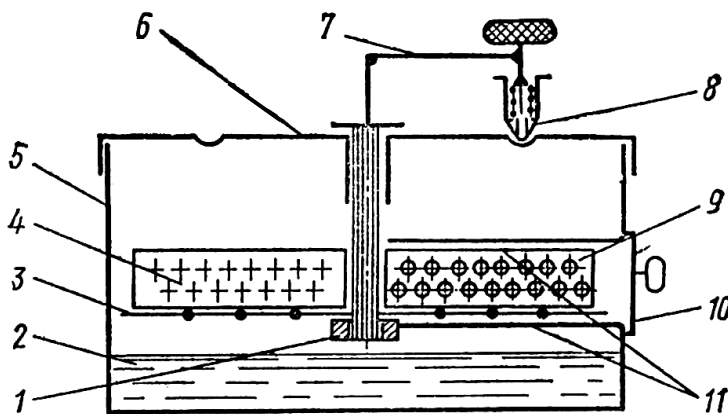


Рисунок 9.8 – Схема пристрою для варення парю

емностей 9, розрахованих на одну порцію виробів. У стінці корпусу виконано завантажувально-розвантажувальний отвір, що закривається дверцятами 10, розміри якого дозволяють встановлювати в камеру сітчасті ємності. Верхній і нижні краї отвору мають запобіжні щитки 11. Вал, який закріпленний в опорі 1, приводиться в обертання важелем 7 з пружинним фіксатором 8. Водяна ванна може обігріватися електричними нагрівачами, газовими пальниками або від конфорок плити. Під час роботи сітчасті ємності з продуктом послідовно просуваються разом з транспортуєчим диском по колу робочої камери, обігріваються парю і повертаються по закінченні теплової обробки до завантажувально-розвантажувального пристрою, де здійснюється розвантаження готових виробів і подальше завантаження сітчастих ємностей.

Більш прогресивні високопродуктивні варильні апарати безперервної дії, що поділяються на апарати для варення продуктів у воді, на парі, у пароповітряній суміші та універсальні. У цих апаратах застосовується в основному конвейерна система транспортування, а джерелом теплоти є водяна пара відповідних параметрів.

Уніфікованим варильним апаратом безперервної дії, призначеним для варення різноманітних харчових продуктів у стандартних функціональних ємностях, є трансферавтомат (рис. 9.9).

Основна частина апарата – циліндрична варильна камера 4 із роликівим конвейером 15, що проходить всередині неї. Вхідні 3 і вихідні 9 дверцята камери, працюючої в автоматичному режимі, мають блокувальні пристрої. Перед відкриттям дверей тиск в камері знижується за рахунок розпилення холодної води за допомогою спеціального пристрою. По паропроводу з вентилем 6 пара подається в робочу камеру на паророзподільну гребінку 5 з соплами 7.

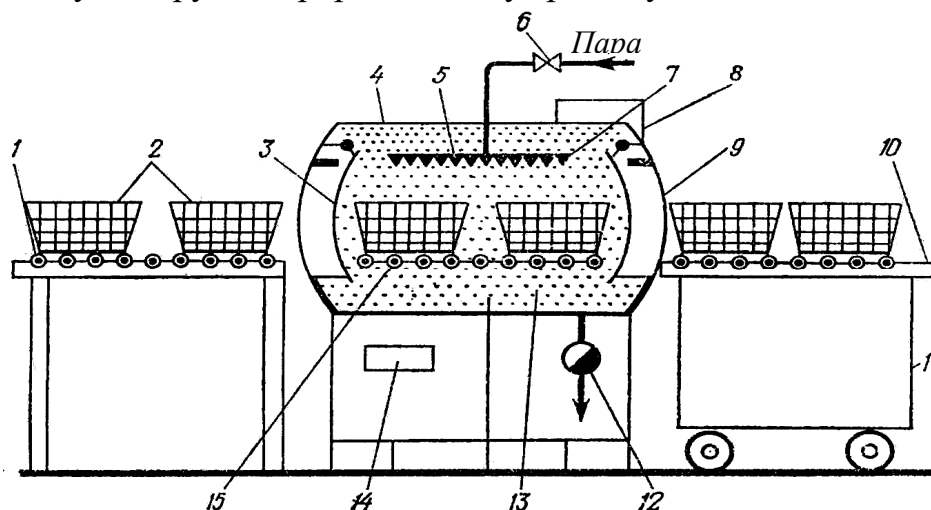


Рисунок 9.9 – Пароварильний трансферавтомат

Ємності 2 з напівфабрикатами подаються на спеціальних візках по рольгангу 1. Пересуваючись на роликівому конвейері в робочій камері, продукти обробляються паром 13 і після цього в ємностях розвантажуються на рольгангу 10 в теплоізольовані візки 11. З робочої камери конденсат видаляється по конденсатній лінії 12. Камера має органи автоматичного регулювання 8 і автоматику управління люками 14.

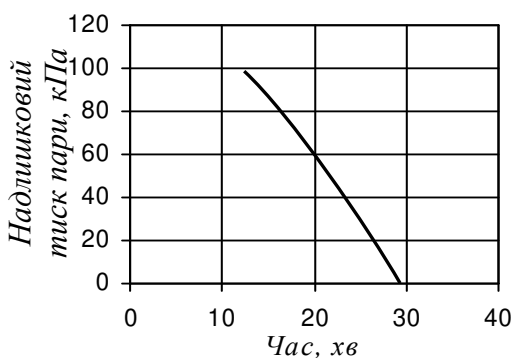


Рисунок 9.10 – Графік залежності часу варення від тиску в робочій камері

Камера має органи автоматичного регулювання 8 і автоматику управління люками 14.

На рис. 9.10 наведено графік залежності часу варення в трансферавтоматі від надлишкового тиску в робочій камері.

Однією з найбільш досконалих є конструкція варильного апарата безперервної дії, що використовується в харчоконцентратному виробництві для варення різноманітних круп і гороху, схему якого наведено на рис. 9.11.

Апарат складається з корпусу 1, транспортної сітчастої стрічки 2 із привідним 3 і натяжним 4 барабанами, паровою камерою 5, регулюючим висоту шару шиберам 6. Висота шару продукту на рухомій сітці-конвеєрі складає 100...200 мм, тривалість процесу варки залежить від швидкості конвейєра і коливається від 10 до 60 хвилин. Варення в цьому апараті здійснюється під атмосферним тиском пароповітряною сумішшю, що забезпечує одержання круп без надмірної клейстеризації та деструкції крохмалю, створює умови для їхньої повної дезодорації.

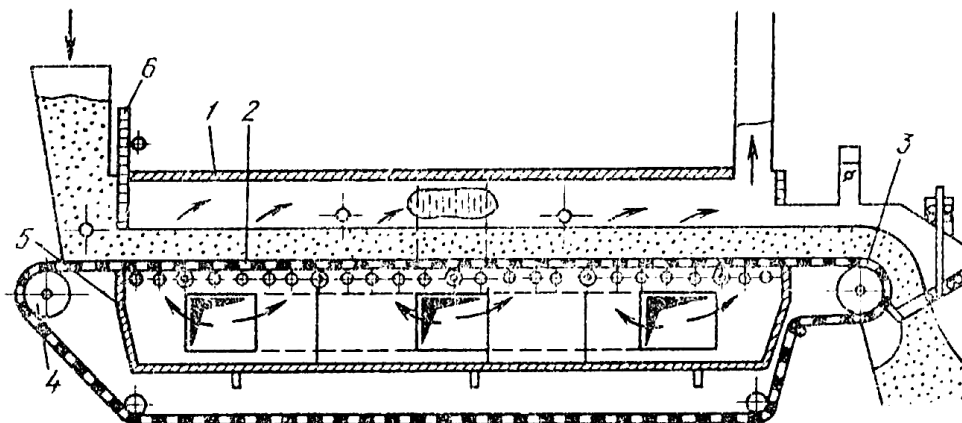


Рисунок 9.11 – Схема апарата для варення круп

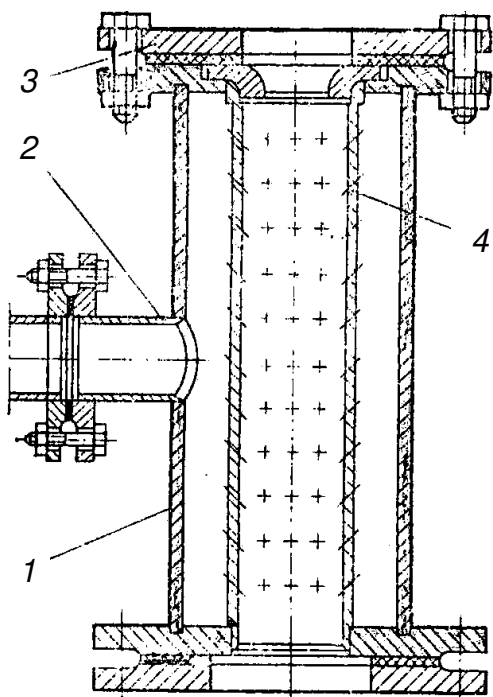


Рисунок 9.12 – Обігрівальна камера контактного апарата розварювання зерна

У апаратах безперервного розварювання зерно-спиртового виробництва (рис. 9.12) прогрівання продукту до необхідної температури забезпечується в результаті активного введення гострої пари дрібними струминками в потік продукту, що рухається. Обігрівальна камера такого апарата обладнана перфорованою трубою 4 для проходження пари та має корпус 1, патрубок підведення пари 2, вхідний 3 і вихідний патрубки продукту.

Для аналізу варення як теплообмінного процесу важливі режими його проведення. При цьому одним із визначальних параметрів, які характеризують ефективність процесу, є швидкість або тривалість його протікання. Основним чинником, який впливає на тривалість процесу варення в стравоварильному котлі, є його питома поверхня, що визначається як:

$$S_{num} = \frac{S}{V}, \quad (9.10)$$

де S – поверхня нагрівання апарата, м^2 ; V – об’єм апарата, м^3 .

Очевидно, що чим менше значення S_{num} , тим вища ефективність апарата. Для циліндричних варильних котлів із плоским днищем питому поверхню можна представити на основі формули (5.183) таким чином:

$$S_{num} = \frac{S}{V} = \frac{\left(\pi D h + \frac{\pi D^2}{4} \right)}{\frac{\pi D^2 h}{4}} = \frac{4}{D} + \frac{1}{h}, \quad (9.11)$$

де D – діаметр котла, м ; h – висота робочої частини котла, м .

Встановлено, що мінімальна питома поверхня котла забезпечується при співвідношенні $h/D \approx 1$. При однакових об’ємах варильних апаратів максимальна тривалість нагрівання рідини до температури кипіння буде у тих із них, де діаметр варильної посудини $D \geq h$.

У роботі будь-якого теплового апарата мають місце два періоди – період розігрівання та стаціонарний. У період розігрівання теплового апарата, коли температурне поле всіх його елементів залежить від часу і температура як самого апарата, так і вмісту робочого об’єму підвищується, має місце нестационарний (який не встановився) режим роботи апарата. Після закінчення нестационарного періоду розігрівання апарата і стабілізації температурного поля в часі апарат починає працювати в стаціонарному режимі. Слід зазначити, що по відношенню до харчового продукту, який переробляється в даному апараті, процес не є стаціонарним, бо в ньому в цей час відбуваються всілякі зміни – температури, фізико-хімічних властивостей, агрегатного стану тощо.

Для будь-якого варильного апарата рівняння теплового балансу, що показує рівність прибутку і витрати теплоти в апараті, має такий вигляд:

$$Q_{заг} = \sum Q_{кор} + \sum Q_{вт}, \quad (9.12)$$

де $Q_{заг}$ – загальна кількість теплоти, підведеної до апарата, кДж ; $\sum Q_{кор}$ – теплота, що використовується корисно, кДж ; $\sum Q_{вт}$ – сумарні втрати теплоти в апараті, кДж .

Оскільки під час експлуатації варильного апарата розрізняють два режими роботи – розігрівання і варення, то тепловий баланс складають на кожний режим. Теплові баланси для нестационарного і стаціонарного режимів роботи висловлюються відповідно рівняннями:

$$Q'_{заг} = Q'_{кор} + Q'_{роз} + Q'_{вт} \quad (9.13)$$

$$Q''_{заг} = Q''_{кор} + Q''_{роз} + Q''_{вт}, \quad (9.14)$$

де $Q'_{кор}$, $Q''_{кор}$ – теплота, що корисно використовується при нестационарному і стаціонарному режимах відповідно, кДж ; $Q'_{вт}$, $Q''_{вт}$ – втрати теплоти апаратом у довкілля за відповідних режимів, кДж ; $Q'_{роз}$, $Q''_{роз}$ – втрати теплоти на розігрівання конструкції апарата за відповідних режимів, кДж .

Розглянемо основні варіанти визначення теплоти, що корисно використовується під час варення. При режимі розігрівання апарата теплота, що корисно використовується, витрачається на нагрівання рідини в варильній посудині та визначається за відомою формулою:

$$Q'_{кор} = Gc(t_k - t_n),$$

де G – маса рідини, що нагрівається, кг; c – питома теплоємність рідини, кДж/(кг·К); t_k – температура кипіння, °С; t_n – початкова температура рідини, °С.

За стаціонарним режимом апарата теплота, що корисно використовується, складається, в основному, зі статей витрати теплоти на нагрівання продукту і випаровування вологи (ця теплота передається продукту від киплячої рідини):

$$Q''_{кор} = G_n c_n (t_k - t_n) + Wr, \quad (9.15)$$

де G_n – загальна кількість завантажувальних продуктів у варильний апарат, кг; c_n – середня теплоємність завантажувальних продуктів, кДж/(К·кг); t_n – середня початкова температура продуктів, °С; W – кількість вологи, випаровуваної в процесі варення, кг; r – прихована теплота пароутворення, кДж/кг.

Під час процесу варення м'ясо-кісткових бульйонів у автоклаві теплота, що корисно використовується, необхідна для режиму розігрівання, визначається як:

$$Q'_{кор} = Gc(t_k - t_n) + G_k c_k (t_k - t_n), \quad (9.16)$$

де G , G_k – маса води і кісток відповідно, кг; c , c_k – теплоємність води і кісток відповідно, кДж/(кг·К); t_k – температура кипіння вмісту автоклаву (залежить від тиску в варильній посудині), °С; t_n – початкова температура води і кісток, °С.

За стаціонарним режимом теплота, що корисно використовується, іде на слабке кипіння вмісту автоклаву (процес виварювання жиру з кісток триває 4...5 годин) і може бути визначена як:

$$Q''_{кор} = Wr + Q_{бх}, \quad (9.17)$$

Тут W – маса вторинної пари у варильній посудині, кг; r – теплота пароутворення (залежить від тиску в варильній посудині), кДж/кг; $Q_{бх}$ – теплота, що витрачається на біохімічні процеси, пов'язані з виварюванням жиру з кісток, кДж. Оскільки $Q_{бх}$ незначна, то її, як правило, в розрахунках не враховують.

У варильних апаратах безперервної дії має місце витрата теплоти на нагрівання води, яка доливається в процесі роботи в апарат.

Втрати теплоти на розігрівання конструкції апарата мають, в основному, місце за нестаціонарним режимом його роботи. У загальному випадку ці втрати можуть бути визначені з вираження:

$$Q'_{роз} = Q_m + Q_n + Q_m, \quad (9.18)$$

де Q_m – теплота, витрачена на нагрівання металевих конструкцій апарата (в тому числі й транспортуючого органу); Q_n – теплота, витрачена на нагрівання

ізоляційної конструкції апарата; Q_m – теплота, що витрачається на нагрівання теплоносія (в основному води, яка міститься в парогенераторі апарата) до температури кипіння і його пароутворення.

За стаціонарним режимом варильного апарата $Q''_{роз}$ включають втрати теплоти на розігрівання транспортуючого органу (якщо він виходить за межі варильної камери) або функціональних ємностей.

Втрати теплоти апаратом у довкілля визначаються, виходячи з конструктивних особливостей апарата і температурних режимів.

У основному ці втрати пов'язані з теплообміном між зовнішніми поверхнями апарата та довкіллям і визначаються за формулою

$$Q_{em} = \alpha S \Delta t \tau,$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх поверхонь апарата у довкілля, Вт/(м²·К); S – зовнішня поверхня апарата, м²; Δt – середня різниця температур між апаратом і довкіллям, °С; τ – тривалість теплообміну, с.

До цих втрат можуть бути включені втрати теплоти через завантажувальні та розвантажувальні вікна апаратів.

За відомими кількостями витраченої теплоти в апараті $Q'_{заг}$ і $Q''_{заг}$ визначаються витрати палива, електроенергії або пари для проведення процесу варення.

9.2. Смаження

Смаженням називається процес нагрівання продукту з жиром чи без нього за температури вище 100° С, під час якого відбувається вилучення з продукту деякої частини вологи і повна або часткова зміна кольору. Смаження продукту з використанням різноманітних середовищ, що передають теплоту, викликає зміну його структурно-механічних, теплофізичних і органолептичних властивостей, які в сукупності визначають консистенцію, колір, запах, смак, що характеризують ступінь готовності продукту.

Процес смаження харчових продуктів характеризується значним різноманіттям прийомів і режимів, класифікацію яких наведено в табл. 9.1.

Зупинимося стисло на характеристиці способів смаження. Під час смаження основним способом продукт нагрівають із жиром (5...10% від маси продукту) на сковороді або листі за температури 130...160° С до утворення підрум'яненої скоринки. Під час смаження у великій кількості жиру (у фритюрі) продукт поміщують у жир (співвідношення 1:4 або 1:6), нагрітий до температури 160...180° С. Жир не дає можливості продукту пригоріти до поверхні нагрівання, забезпечує рівномірне нагрівання, покращує смак і підвищує його калорійність. Для того, щоб не викликати розкладу жиру, його нагрівають до температур, що не перевищують 180° С (максимальна температура димоутворення жирів 230° С).

Таблиця 9.1

Класифікація процесів смаження

Спосіб обробки	Мета процесу	Гріюче середовище (поверхня)	Температура, °С		Тривалість обробки, хв	Вид продукту
			гріючого середовища	середньо-об'ємна готового продукту		
1	2	4	4	5	6	7
У невеликій кількості жиру (основний) на відкритій жарильній поверхні	Доведення продукту до повної готовності, утворення скоринки, надання продукту смаку та аромату	Жир	150...180	75...95	15...30	Овочі, м'ясопродукти, рибопродукти, птиця, млинці
Основний у жарильній шафі	Те ж	Жир, повітря, ІЧ-промені	150...350	75...95	15...90	Те ж
У фритюрі	Те ж	Жир	130...190	85...98	5...10	Те ж, а також пиріжки, пончики, ковбасні палички
Без додавання жиру (за рахунок жиру в продукті)	Те ж	Жарильна поверхня	150...160	85...95	1...2	Рідке тісто для млинців, оладків
У грилях, над палаючим жаром	Те ж	Повітря, ІЧ-промені	180...200	85...90	15...30	М'ясо
Запікання	Те ж	Повітря	120...170	90...95	30...40	М'ясні хліби, зерноборошняні вироби
Випікання	Те ж	Повітря	110...280	90...98	15...60	Вироби з тіста

Продовження табл. 9.1

1	2	3	4	5	6	7
Пасерування з жиром	Доведення продукту до напівготовності	Жир	120...180	80...90	20...30	Цибуля, морква, коріння і борошно
Пасерування без жиру	Те ж	Жарильна поверхня, повітря	150...160	120...150	10...15	Борошно
Обсмаження	Вилучення вологи, утворення смаку, кольору, аромату	Повітря	180...240	120...150	10...18	Зерна кави, арахісу, злакових, сої. Горіхи, кукурудзяні пластівці
Те ж	Те ж	Димо - повітряна суміш	110...120	85	10...30	Ковбасні вироби
Те ж	Руйнування оболонки клітин, що містять олію, розм'якшення продукту	Пара	120...140	100...115	10...15	Олійна сировина (м'ятка бавовняна, соняшникова, кукурудзяна та ін.).

Пасерування – смаження ароматичних овочів (цибулі, моркви, петрушки, селери, ріпи) до утворення легкої золтавої скоринки, покритої тонкою плівкою жиру; всередині овочі залишаються сируватими. При цьому в жир переходить частина ефірного масла, що сприяє збереженню запаху продуктів і покращує якість страв, які готуються. Борошно пасерують для збільшення в ньому кількості водорозчинних речовин і одержання еластичної маси під час виготовлення соусів.

Під процесом випікання мають на увазі термічну обробку тістових заготовок у робочій камері жарильного апарата, в результаті чого одержуються хлібобулочні вироби, що істотно відрізняються від вихідної заготовки розмірами, зовнішнім видом, ароматом, структурою, фізичними і теплофізичними властивостями.

Запікання – смаження в жарильній шафі продукту, политого соусом або олією, попередньо звареного, припущеного або обсмаженого. Рибу та м'ясо запікають сирими.

Під час смаження, випікання та запікання продукту в камері жарильної шафи нагрівання здійснюється, в основному, за рахунок випромінювання (радіацією) від нагрітих поверхонь камери, конвекцією потоків повітря, що переміщуються і частково завдяки теплопровідності гарячого поду (радіаційно-конвективне нагрівання). За рахунок ІЧ-випромінювання здійснюється смаження продуктів у спеціалізованих апаратах-грилях, а також на відкритому вогні.

Смаження без жиру здійснюють під час приготування виробів із рідкого тіста, наприклад під час смаження млинцевої стрічки на жаровні ВЖШ, яка обертається; в цьому випадку смаження відбувається за рахунок жиру, який випресовується з тіста.

Обсмаження зерен кави, арахісу, сої та інших зернистих продуктів у гарячому повітрі викликає зміни білків, вуглеводів і жирних кислот, що впливає на органолептичні показники продукту. При цьому об'єм зерна збільшується до 50%, а його маса зменшується приблизно на 16...20% (здебільшого за рахунок втрати вологи).

Основи тепло- і масообміну під час смаження

Олія під час смаження є проміжним середовищем, що сприймає теплоту від джерела нагрівання і передає її продукту, який обсмажується. Під впливом теплоти в продукті протікає низка пов'язаних між собою фізичних і фізико-хімічних процесів; у результаті цих процесів відбувається виділення і вилучення частини вологи, всмоктування жиру, об'ємна усадка продукту, виділення газів, підвищення тиску всередині зразків, збільшення пористості, а також зміна густини і теплоємності продукту.

Швидкість процесів, що протікають у продукті, залежить від виду, форми та розмірів шматочків продукту, температури олії, умов теплообміну між олією та продуктом та інших чинників. Дослідження показують, що під час смаження продукту є 2 періоди тепло- і масообміну.

У перший період після занурення продукту в гарячу олію температура в ньому поступово підвищується від поверхневих шарів до центральних. Починається випаровування вологи, і передусім, з поверхні продукту. У цей

період волога рухається як назовні у вигляді пари і рідини (за рахунок дифузії та під дією градієнта загального тиску), так і до центра у вигляді рідини (під дією градієнта температури).

Оскільки концентрація вологи в глибині продукту виходить більшою, ніж на поверхні, відбувається дифузійне підсмоктування вологи з глибини на поверхню, де вона знову випаровується. Ззовні в продукт всмоктується деяка кількість олії. До тих пір доки поверхня продукту зволожена, температура її не може піднятися вище 100° С, хоч вона і стикається з олією, що має температуру 130...140° С: википаюча волога віднімає теплоту від поверхні та охолоджує її. Оскільки для карамелізації вуглеводів і утворення скоринки необхідна температура вище 100° С, то в цей період вона не утворюється. Температура центральних шарів у цей період продовжує зростати. Момент досягнення в центрі зразка продукту температури 96...99° С можна вважати закінченням першого періоду. У другий період температура в кожному шарі зразка залишається деякий час постійною. При цьому волога рухається тільки назовні й тільки у вигляді пари за рахунок істотного температурного перепаду між теплоносієм (жиром) та температурою кипіння води. Отже настає момент, коли коефіцієнт випаровування вологи з поверхні починає перевищувати швидкість дифузійного підсмоктування її з глибини на поверхню. Тому як тільки поверхневий шар продукту зневоднюється, температура його відразу піднімається вище 100° С і утворюється карамелізована скоринка. Вона утворюється з вуглеводів, що містяться у продукті: цукрів, крохмалю, целюлози, пектину. Аналогічні уявлення про механізм випаровування вологи і утворення скоринки характеризують процес випікання хлібобулочних виробів.

Відзначимо деякі особливості обсмажування риби. Вони полягають в тому, що в рибі немає вуглеводів, тому перед обсмаженням її панірують, тобто покривають поверхню обробленої риби борошном або рідким тістом, і скоринка утворюється з вуглеводів борошна. Скоринка карамелізованого крохмалю на поверхні шматка риби ускладнює випаровування вологи з тканин риби, що дозволяє прогрівати весь шматок до температури 95...98° С (в центрі), і забезпечує необхідні умови для гідролізу колагену мускульних тканин.

Утворення скоринки є органолептичною ознакою готовності обсмаженої сировини. Проте є і більш надійний, об'єктивний критерій якості – зниження маси сировини під час обсмаження, що називається видимим усмаженням. Як було відзначено, під час обсмажування відбуваються два протилежно направлених процеси масообміну: випарювання вологи (направлений назовні) і всмоктування жиру (направлений усередину). Вологи випарюється більше, ніж всмоктується жиру, тому в процесі обсмажування маса сировини зменшується. Видимий відсоток усмаження (у % до маси вихідної сировини) визначається за формулою:

$$x = \frac{A - B}{A} 100, \quad (9.19)$$

де A – маса сировини до обсмажування, B – маса обсмаженої сировини. Величина x нормована і складає, наприклад, для моркви 45...50, для цибулі – 50, для риби – 20%.

Для проведення теплових розрахунків жарильних апаратів необхідно мати відомості про істинний відсоток усмаження, що показує кількість випареної під час обсмажування вологи у % до вихідної кількості вологи в сировині. Залежність між істинним і видимим відсотками усмаження має вигляд:

$$\omega = \frac{x + m(100 - x)}{100}, \quad (9.20)$$

де ω – істинне усмаження, % до маси вихідної сировини; m – кількість жиру, всмоктаного в сировину під час обсмажування, % до маси обсмаженої сировини.

Дослідженнями процесу обсмажування кавопродуктів, що є головною операцією їх виробництва, встановлено, що він проходить у три стадії. Перша стадія, що протікає за 80...120° С характеризується інтенсивним збільшенням швидкості зміни маси речовини за рахунок випаровування вологи (стадія підсушування сировини). На другій стадії швидкість зміни маси сировини дещо уповільнюється, але спостерігається утворення темно-пофарбованих пігментів (стадія обсмажування). Третя стадія (стадія витримання), що протікає за температури більше 180° С, знову супроводжується різким збільшенням швидкості зміни маси сировини. При цьому концентрація темно-пофарбованих пігментів у каві продовжує зростати і досягає максимуму за температури 205...215° С. За рахунок вивільнення вологи з клітинних стінок за температурою 200...215° С дещо зростає вміст кофеїну, що є одним із найважливіших компонентів кави. За цієї ж температури досягає оптимального рівня і головний показник якості кави – екстрактивність.

Механізм переносу теплоти і вологи в продуктах під час обсмажування надто складний. Форма зв'язку вологи з матеріалом, колоїдно-капілярнопориста структура багатьох продуктів, а також температура олії, розмір і форма шматочків та інші чинники впливають на механізм переносу теплоти.

За станом, що встановився, коли температура олії залишається постійною в часі, кількість теплоти (в кДж), сприйнятої олією від поверхні нагрівання, дорівнює кількості теплоти, що перейшла від олії через скоринку всередину продукту на його нагрівання та випаровування вологи, а також на компенсацію всіх втрат.

Без обліку тепловтрат можна записати:

$$Q = \alpha_1 S (t_{cm} - t_m) \tau, \quad (9.21)$$

$$Q = \alpha_2 S_1 (t_m - t_n) \tau, \quad (9.22)$$

$$Q = \frac{\lambda S_1 (t_n - t_e) \cdot \tau}{\delta}, \quad (9.23)$$

де α_1 і α_2 – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від поверхні нагрівання до олії, від олії до продукту, Вт/(м²·К); λ – коефіцієнт теплопровідності скоринки, Вт/(м·К); δ – товщина скоринки, м; S , S_1 – відповідно поверхня нагрівання, що віддає теплоту олії, і поверхня продукту, м²; t_{cm} , t_m , t_n , t_e – відповідно температура поверхні нагрівання, олії, поверхні продукту і поверхні випаровування, °С.

Позначимо поверхню продукту S_1 через поверхню нагрівання S коефіцієнтом:

$$f = \frac{S_1}{S}, \quad (9.24)$$

При цьому поверхня продукту є середнє між початковою і кінцевою поверхнею його з урахуванням об'ємної усадки. Поверхня продукту залежить від ступеня його подрібнення.

Після деяких перетворень рівнянь (9.21), (9.22) і (9.23) отримаємо:

$$Q = \frac{S (t_{cm} - t_e) \tau}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{f\alpha_2} + \frac{\delta}{f\lambda} \right)}. \quad (9.25)$$

Як видно з рівняння (9.25) загальний коефіцієнт теплопередачі від поверхні нагрівання до продукту (в Вт/(м²·К)) має вигляд:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{f\alpha_2} + \frac{\delta}{f\lambda} \right)^{-1}. \quad (9.26)$$

Аналіз величин всіх термічних опорів, які входять у коефіцієнт теплопередачі, показує їхню нерівнозначність. У першому періоді процесу обсмажування, коли скоринка ще немає або товщина її незначна (вплив $\delta f \lambda$ малий), вирішальне значення на передавання теплоти від поверхні нагрівання до продукту виявляють величини α_1 і α_2 . У другому періоді, коли утвориться скоринка, температура якої близька до температури олії, термічний опір $1/f\alpha_2$ практично не відбивається на загальному коефіцієнті теплопередачі. Внаслідок цього на теплопередачу в цьому періоді вирішальне значення відіграють α_1 та $\delta f \lambda$. Таким чином, величина K у ході процесу обсмажування змінюється. У період, коли випарюється вільна волога з поверхні продукту, K зростає, а після цього у міру збільшення товщини скоринки він зменшується і тим швидше, чим вище температура олії та менший ступінь подрібнення продукту.

Слід відзначити, що зараз немає достатніх даних для аналізу впливу термічного опору скоринки на величину K . Близький до дійсності аналіз теплопередачі під час смаження може бути здійснений, якщо експериментами будуть визначені значення $\delta \lambda$ і уточнені коефіцієнти α_1 і α_2 .

Численні дослідження дозволили встановити значення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні нагрівання до олії α_1 . Для його визначення можна, наприклад, використати критеріальні рівняння, запропоновані М.І. Беляєвим:

для вільної конвекції:

$$Nu = 0,29 (Gr \cdot Pr)^{0,36}, \quad (9.27)$$

за умов змушеного руху олії:

$$Nu = 0,4 Re^{0,33} Gr^{0,1} \cdot Pr^{0,43}, \quad (9.28)$$

де Nu – критерій Нуссельта; Gr – критерій Грасгофа; Pr – критерій Прандтля; Re – критерій Рейнольдса.

Процеси теплообміну між нагріваючим середовищем і продуктом, (що характеризуються коефіцієнтом тепловіддачі α_2), відбуваються за складними закономірностями, що доки ще мало вивчені та важко піддаються узагальненням.

Визначити тривалість процесу можна за допомогою методу, основанийого на складанні балансу теплоти, яка підводиться до поверхні шматочка продукту.

Теплота, підведена до продукту, згідно з (9.22):

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha_2 (t_m - t_n) dS_1,$$

витрачається головним чином на випаровування вологи:

$$\frac{dQ}{d\tau} = q_{num} dS_1 \cdot \left(\frac{dx}{d\tau} \right), \quad (9.29)$$

де x – поточна координата, q_{num} – питомі затрати теплоти на 1 м^3 продукту, Дж.

$$q_{num} = \frac{\Delta\omega \rho_n r}{1000}, \quad (9.30)$$

де $\Delta\omega$ – зміна вологості продукту, %; r – теплота пароутворення, кДж/кг, ρ_n – середня густина продукту, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Прийнято, що кількість підведеної та сприйнятої теплоти однакові між собою і що α_2 і t_m постійні в першому періоді.

Тоді тривалість періоду складе:

$$\tau_1 = \frac{q_{num} \cdot l}{\alpha_2 (t_m - t_g)}, \quad (9.31)$$

де t_g – температура випаровування вологи, $^{\circ}\text{C}$; l – визначальний розмір, м.

Для другого періоду (знаходять також з балансу теплоти):

$$\tau_2 = \frac{q_{num} \cdot l^2}{2 \lambda_n (t_m - t_g)}, \quad (9.32)$$

де λ_n – теплопровідність продукту, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Загальний час обсмажування:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2.$$

Наведені рівняння більшою мірою придатні скоріше для якісного аналізу, встановлення чинників, впливаючих на тривалість, ніж для кількісного визначення, бо в дійсності величини ρ_n , α_2 , λ_n , t_m і t_g безперервно змінюються.

Основні типи жарильних апаратів

Усі жарильні апарати можна класифікувати за низкою ознак, а саме: за видами і способами смаження, видом джерела енергії, структурою робочого

циклу. За видами і способами смаження розрізняють жаровні, призначені для відкритого смаження на невеликій кількості жиру (сковороди); обладнання для смаження продукту у фритюрі; жарильні шафи, в яких продукт має безпосередній контакт із гріючою поверхнею; жарильні шафи, в яких процес смаження і випікання здійснюється без дотику продукту до поверхні нагрівання.

За видом джерела теплової енергії розрізняють жарильні апарати: з електронагріванням, з газовим або вогневим нагріванням, з нагріванням за допомогою водяної насиченої пари тиском до 1,2 МПа, з радіаційним нагріванням. Усі жарильні апарати можуть бути періодичної та безперервної дії. До жарильних апаратів періодичної дії належать сковороди, фритюрниці, жарильні та пекарські шафи, що використовуються, в основному, у підприємствах ресторанного господарства. Апарати безперервної дії частіше за все мають транспортуючий орган, виконаний у вигляді сітчастого транспортера. Деякі конструкції мають робочий орган у вигляді шнека, барабана або ротора. Для смаження продуктів основним способом, а також пасерування овочів, тушіння і припускання м'ясних, рибних та овочевих кулінарних виробів призначені сковороди. Принципову схему електричної сковороди з безпосереднім обігріванням наведено на рис. 9.13.

Сковорода складається з чавунної круглої або прямокутної чаші 2, встановленої на станині 1. Електронагрівальний елемент 4 змонтований під днищем сковороди. Чаша закривається кришкою 3, яка обертається на осі, або знімається. Сковорода має перекидаючий пристрій і оснащена автоматикою регулювання теплового режиму.

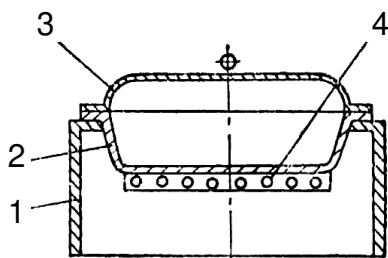


Рисунок 9.13 – Схема сковороди

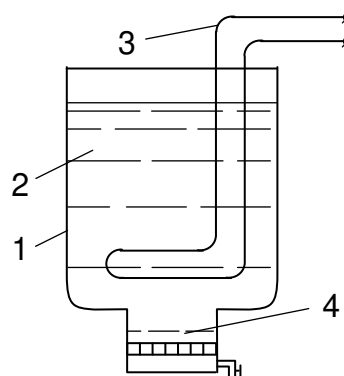


Рисунок 9.14 – Схема фритюрниці

Аналогічне обладнання мають фритюрниці (рис. 9.14), призначені для смаження продуктів у великій кількості жиру 2. Жарильна ванна 1 має більшу порівняно зі сковородою висоту, виконана з нержавіючої сталі. Відмінною особливістю фритюрниць є наявність у них «холодної зони» 4, куди потрапляють дрібні частинки продукту, а температура жиру в ній не перевищує 90° С. Обігрівання апарата може здійснюватися за допомогою тенів 3 або газових пальників.

Для смаження і запікання кулінарних виробів і випікання деяких борошняних виробів знаходять широке застосування жарильні та пекарські шафи.

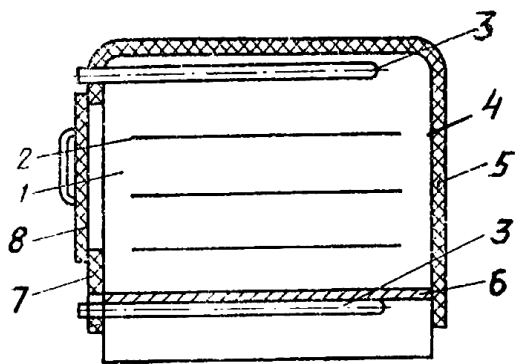


Рисунок 9.15 – Схема жарильної та пекарської шафи

Як правило, шафа складається з декількох робочих камер-секцій (рис. 9.15), що обігріваються тенами або газовим пальником. Робоча камера 1 являє собою двостінний теплоізолюваний металевий короб 5 з дверцятами 8. Внутрішній короб 4 виконується зі сталевих листів товщиною 1...2 мм, зовнішній – з облицювання 7, покритого емаллю. У верхній частині камери розміщено відкриті тенти 3, в нижній – закріплі подовим листом 6, що

служить для вирівнювання температурного поля в робочому об'ємі шафи. У камері є листи 2, в яких розміщуються продукти, що нагріваються. Шафи випускаються з природним і примусовим рухом теплоносія – повітря або пароповітряної суміші, обладнуються автоматичним регулюванням потужності та заданого температурного режиму.

Розглянуті нами жарильні апарати є апаратами періодичної дії. На харчових підприємствах, на великих і спеціалізованих підприємствах ресторанного господарства широко застосовуються апарати безперервної дії. Їх умовно можна поділити на 4 групи: апарати для смаження у великій кількості жиру (пароолійні печі, автомати смаження пиріжків, пончиків, фритюрниці), апарати для смаження на грилючій поверхні (жаровні для млинців, оладок), апарати з радіаційним (ІЧ) і НВЧ-нагріванням і апарати з різноманітними комбінованими способами смаження.

Процес смаження овочів і риби здійснюється в пароолійних печах, що отримали свою назву в зв'язку з тим, що обробка сировини здійснюється в олії, яка в свою чергу нагрівається водяною парою. Пароолійні печі бувають різних конструкцій, проте більшість із них містить прямокутну ванну 5, яка донизу звужується на клин (рис. 9.16). Поверхня нагрівання складається з двох рядів труб 3, кожний з яких пов'язаний зі своїм колектором 2. Клиноподібна частина ванни 1 заповнена водою. Частинки сировини, що потрапили сюди під час роботи, будуть знаходитися в так званій «холодній зоні» не обуглюючись та не забруднюючи олії. Парові нагрівачі розміщені в олії, яка кладеться шаром поверх водяної подушки. Вздовж ванни рухається ланцюговий конвеєр, що несе сітки 4 з сировиною. Останні повністю занурені в олію 6.

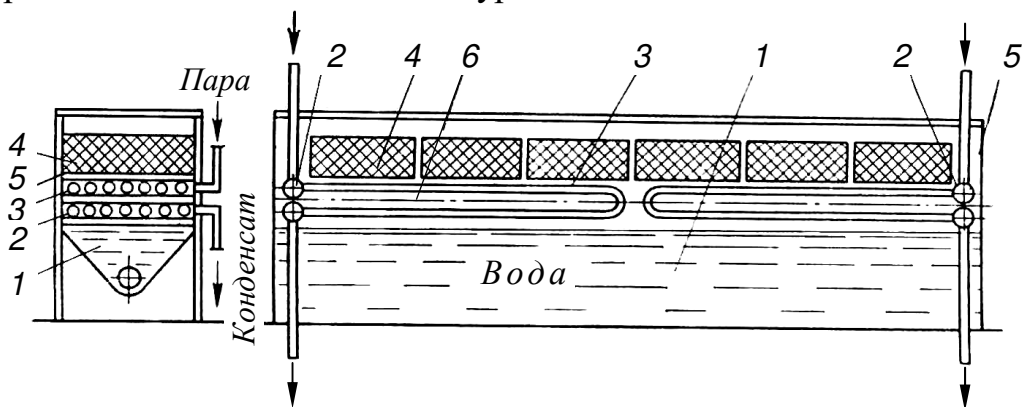


Рисунок 9.16 – Схема пароолійної печі

Фритюрниці безперервної дії (рис. 9.17) являють собою жарильну ванну, наповнену жиром, температура якого регулюється автоматично.

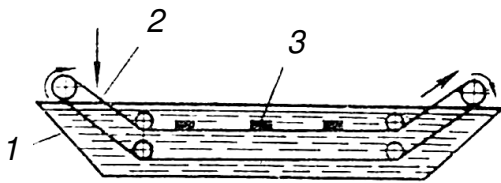


Рисунок 9.17 – Схема фритюрниці безперервної дії

Всередині ванни 1 рухається решітчастий транспортер 2, на який завантажують продукт 3. Нагрівання олії (жиру) здійснюється електронагрівачами, розташованими безпосередньо в олійній ванні. Більш досконала конструкція фритюрниці з виносним нагрівачем олії (жиру), фільтром і циркулюючим контуром. Циркуляція олії (жиру) при цьому значно інтенсифікує теплообмін між олією (жиром) і продуктом.

На рис. 9.18 наведено схему жарильного апарата безперервної дії на ІЧ-обігріванні. Решітчастий транспортер 2, що має привідний 6 і натяжний 1 барабани, рухається безперервно. На нього вкладається продукт 5, що підлягає смаженню.

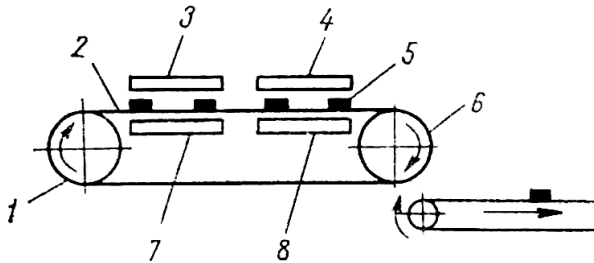


Рисунок 9.18 – Схема жарильного апарата безперервної дії на ІЧ-обігріванні

Швидкість руху транспортера регулюється; завдяки цьому змінюється продуктивність апарата і тривалість смаження. У ролі нагрівальних елементів використовують ІЧ-випромінювачі 3, 4, 7, 8, що розташовуються під та над сіткою транспортера. Незважаючи на велику різноманітність жарильних апаратів за видом, влаштуванням і принципом дії, призначення їх одне й те ж: передавання

теплоти від теплоносія до продукту, що термічно обробляється. Тому і основні положення теплового розрахунку для них залишаються загальними.

Рівняння теплового балансу показує рівність прибутку і витрати теплоти в апараті:

$$Q_{заг} = Q_{кор} + Q_{вт} ,$$

де $Q_{заг}$ – загальна кількість теплоти, підведеної до апарата; $Q_{кор}$ – корисно використувана теплота; $Q_{вт}$ – сумарні втрати теплоти в апараті.

Робота будь-якого жарильного апарата ділиться на два етапи: перший етап – приведення апарата в робочий стан, другий – обсмажування продукту. Перший етап закінчується, коли олія нагріта до температури обсмажування. Другий етап починається з моменту завантаження сировини і триває протягом усього часу роботи апарата. Тому тепловий баланс апарата складається для кожного з етапів окремо.

У режимі розігрівання корисно використувана теплота витрачається на нагрівання харчового жиру, який знаходиться в апараті й визначається за формулою (в кВт):

$$Q'_{кор} = \frac{G_{ж} c_{ж} (t_1 - t_0)}{\tau} , \quad (9.33)$$

де $G_{ж}$ – маса харчового жиру, який знаходиться в апараті, кг; $c_{ж}$ – питома теплоємність жиру, кДж/(кг·К); t_1 – температура нагрівання жиру (дорівнює

температурі смаження), °С; t_0 – початкова температура жиру, °С; τ – тривалість розігрівання апарата до стаціонарного режиму, с.

У стаціонарному режимі теплота, що корисно використовується, складається із статей витрати теплоти на нагрівання продукту, випаровування з нього вологи, утворення кірочки та нагрівання жиру, який доливається в процесі роботи:

$$Q''_{кор} = Gc(t_3 - t_2) + 0,01\omega Gr + 0,01\varepsilon Gc_k(t_4 - t_3) + 0,01m Gc_{жс}(t_1 - t_0), \quad (9.34)$$

де G – продуктивність апарата за сировиною, кг/с; c – питома теплоємність продукту, кДж/(кг·К); t_2, t_3, t_4 – відповідно початкова, кінцева центру виробу (приблизно 100° С) і температура утворення скоринки (130...140° С), °С; ω – істинний відсоток усмаження (його величина складає для м'яса, смаженого порційними і крупними шматками відповідно 20...30 та 30...38, овочів смажених 17...60, риби смаженої 18...25%); ε – вміст скоринки у % (приймається в межах 15...25%); c_k – питома теплоємність скоринки, кДж/(кг·К) (можна прийняти рівній питомій теплоємності сухої речовини 1,67кДж/(кг·К)); r – прихована теплота випаровування, кДж/кг; m – витрата харчового жиру на обсмажування продукту, %.

Для жарильних апаратів періодичної дії (сковорід, фритюрниця) G (у кг/с):

$$G = \frac{ab h \rho}{\tau}, \quad (9.35)$$

де a, b – довжина і ширина листа (ванни), м; h – висота шару продукту, м; ρ – насипна густина продукту, кг/м³; τ – тривалість циклу (завантаження, смаження, розвантаження), с.

Для шнекових апаратів:

$$G = S_0 v_0 \rho, \quad (9.36)$$

де S_0 – площа поперечного перетину внутрішньої порожнини жарильної камери у місці розташування першого витка шнека, зайнятої продуктом, м²;

$$S_0 = \frac{\pi(d_0^2 - d_1^2)}{4},$$

де d_0, d_1 – зовнішній і внутрішній діаметр шнека відповідно, м; φ – коефіцієнт заповнення (звичайно = 0,25...0,3); v_0 – швидкість поступального переміщення продукту вздовж шнека, м/с;

$$v_0 = n l_1,$$

де n – частота обертання шнека, с⁻¹; l_1 – крок першого витка шнека, м.

Для конвеєрних жарильних апаратів:

$$G = b h \varphi v \rho, \quad (9.37)$$

де b – ширина конвеєрної стрічки, м; φ – коефіцієнт заповнення конвеєра (може бути прийнятий рівним 0,6...0,7); $v = l/\tau$ – швидкість руху конвеєра, м/с; l – шлях переміщення продукту в олії (довжина ванни), м; τ – тривалість обсмажування, с.

Для жарильних апаратів роторного типу:

$$G = n z V \rho \varphi , \quad (9.38)$$

де n – частота обертання ротора (барабана), 1/с; z – кількість комірок або секцій в роторі (барабані), V – ємність однієї комірки або секції, м³; φ – коефіцієнт заповнення комірки ($\varphi = 0,75 \dots 0,8$).

Продуктивність жарильного апарата може бути визначено тепловим розрахунком, якщо відомі режими роботи апарата і його технічна характеристика. Слід звернути увагу на те, що визначати продуктивність апарата за продуктивністю транспортуючого пристрою не зовсім правомірно, тому, що обсмажування залежить від кількості переданої теплоти, а транспортуючий пристрій тільки регулює тривалість процесу.

Так як кількість теплоти, переданої поверхнею нагрівання апарата:

$$Q_{\text{заг}} = K S \Delta t ,$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, кВт/(м²·К); S – поверхня нагрівання, м²; Δt – температурний напір, °С, то:

$$G = \frac{K S \Delta t - Q_{\text{вт}}}{c (t_3 - t_2) + 0,01 r + 0,01 \varepsilon c_k (t_4 - t_3) + 0,01 m c_{\text{ж}} (t_1 - t_0)} . \quad (9.39)$$

Втрати теплоти в навколишнє середовище огорожами апарата і втрати теплоти на розігрівання апарата (в тому числі – транспортуючого пристрою) визначаються аналогічно, як і для варильної апаратури.

9.3. Пастеризація

Більшість харчових продуктів (молоко та молочні продукти, бульйони, фруктові та овочеві соки, овочеві та м'ясні консерви, вино, пиво та ін.) і напівпродуктів біохімічних виробництв є гарним живильним середовищем для розвитку багатьох мікроорганізмів, у тому числі й для хвороботворних, здатних викликати інфекційні захворювання.

Пастеризація – один із прийомів консервування продуктів, наукове обґрунтування якому дав Л. Пастер у 1860 р. Під пастеризацією мають на увазі термічну обробку продуктів за температури нижче 100°С з наступним охолодженням до температури 6...8°С. Пастеризація, як правило, вбиває неспорові хвороботворні мікроорганізми і скорочує загальну бактеріальну забрудненість продукту, що підвищує його стійкість. Швидке охолодження продукту після пастеризації необхідно для того, щоб відвернути розвиток остаточної мікрофлори, тобто проростання у вегетативні клітини спор, що зберігають життєздатність під час одноразового нагрівання.

Пастеризація не повинна призводити до зміни фізико-хімічного стану продукту і погіршення його якості.

Під час пастеризації дотримуються таких вимог: освітлений або ретельно очищений від сторонніх домішок продукт нагрівають рівномірно, за постійної температури, у тонкому шарі, уникаючи пригоряння; дію проводять у герметичних умовах; продукт виводять із пастеризатора максимально охолодженим. Теплообмінну апаратуру виготовляють із хімічно стійких матеріалів, що мають велику теплопровідність.

Теоретичні основи пастеризації

Ефективність пастеризації – ступінь придушення мікрофлори – залежить від температури та тривалості витримки продукту за цієї температури. Залежність необхідного часу пастеризації τ від температури t у більшості випадків висловлюється логарифмічною залежністю:

$$\ln \tau = \alpha_n - \beta_n t, \quad (9.40)$$

де α_n і β_n – коефіцієнти, що залежать від стійкості мікроорганізмів до теплових впливів і середовища, в якому вони знаходяться.

Коефіцієнти α_n та β_n визначають експериментально з урахуванням повного знищення хвороботворної мікрофлори, з одного боку, і запобігання фізико-хімічних змін у продукті, що викликаються тимчасовим температурним впливом – з іншого. Проте ці дані встановлено далеко не для всіх продуктів, що піддаються пастеризації.

Як конкретний приклад залежності (9.40) можна навести формулу Г.А. Кука для молока:

$$\ln \tau = 36,84 - 0,48 t. \quad (9.41)$$

Наведемо значення t і τ , обчислені за формулою 9.41.

Тривалість пастеризації молока в залежності від температури:

$t, ^\circ\text{C}$	76	74	72	70	68	66	64	62	61
$\tau, \text{с}$	1.4	3.7	9.8	25.6	67	174	455	1188	1930

За нижню межу пастеризації молока прийнято температуру 60°C , за якої досягається пастеризуючий бактерицидний ефект; це пов'язано з термостійкістю туберкульозної палички.

Тривалість пастеризації вина від температури виражається такими даними:

$t, ^\circ\text{C}$	65	60	57	55
$\tau, \text{с}$	240	1200	3600	6000

З наведених даних видно, що чим нижче температура пастеризації, тим більше часу необхідно для досягнення потрібного ефекту. Залежність між температурою нагрівання і тривалістю витримки пояснюється двома причинами. Одна з них пов'язана з тим, що денатурація, руйнування структури речовини, з якої складається мікробна клітина, відбуваються у часі. Цей час тим менший, чим вища температура. Інша причина викликана закономірностями теплообміну. Нагрівання мікроорганізмів за будь-якого вигляду пастеризації здійснюється не

безпосередньо, а через те середовище, в якому знаходяться бактерії. Тому для того, щоб температура клітини бактерії досягала тієї ж температури, що і середовище, вимагається певний час.

Залежність (9.40) дозволяє визначити необхідну умову досягнення ефекту пастеризації. Вона полягає в рівності дійсного часу знаходження продукту за температури пастеризації та теоретично необхідного. Для оцінки ефекту пастеризації Г.А. Кук ввів критерій Пастера, який являє собою відношення дійсної тривалості перебування продукту за бактерицидної температури до теоретичної:

$$P_a = \frac{\theta}{\tau}, \quad (9.42)$$

де θ – дійсний час знаходження продукту за температури пастеризації, с.

Ідеальним варіантом проведення пастеризації є умова, за якої $P_a = 1$. При $P_a > 1$ продукт за температури пастеризації знаходиться більш тривалий період, ніж вимагається умовами пастеризації. При цьому можуть істотно змінюватися фізико-хімічні властивості продукту, що, звичайно, не бажано. При $P_a < 1$ ефект пастеризації не буде досягнутий.

Відповідно до сучасних переконань ефективність пастеризації залежить також від кількісного та якісного складу мікрофлори рідин, що піддаються пастеризації.

За заданих режимів залежність ефективності пастеризації від кількості мікроорганізмів оцінюють за коефіцієнтом швидкості їхньої загибелі.

$$C = \frac{(\ln N_0 - \ln N_k)}{\theta}, \quad (9.43)$$

де C – коефіцієнт швидкості загибелі бактерій, 1/с; N_0 – початкова кількість бактерій в 1 см³ продукту; N_k – кінцева кількість бактерій в 1 см³.

Режими та способи пастеризації. Існують три режими пастеризації: тривала – за температури 63...65° С протягом 20...30 хв., короткочасна (швидка) – за 75° С експозиція від декількох секунд до 5 хв., миттєва (або високотемпературна) – за 90...93° С без витримки.

Вибір режимів пастеризації визначається технологічними умовами і властивостями продукту. У переважній більшості випадків пастеризацію слід проводити в короткочасному або миттєвому режимі. Проте, якщо продукт містить компоненти, що відрізняються низькою термостійкістю (під дією високих температур швидко руйнуються), то слід застосовувати тривалу пастеризацію.

Теплова пастеризація продуктів передбачає декілька способів її здійснення: поточний, пароструминний, гарячим розливом, класичний (пляшковий), у електромагнітному полі та ін.

Поточна пастеризація застосовується для обробки молока, пива, соків, вин, бульйонів та інших продуктів. У даному випадку теплообмін відбувається між закритими потоками продукту і теплоносія, розділеними поверхнею теплопередачі. Процес здійснюється у теплообмінній апаратурі безперервної дії –

кожухотрубному та пластинчатому пастеризаторах і пастеризаційно-охолоджувальних установках.

Знаходить застосування (наприклад, у молочній промисловості) пастеризація з безпосереднім паровим обігріванням. У даному випадку теплота гріючої пари використовується повністю на нагрівання продукту. Під час пастеризації за рахунок введення пари в продукт спостерігається деяке його розрідження, внаслідок чого зменшується вміст сухих речовин у одиниці об'єму продукту.

Пастеризація гарячим розливом передбачає нагрівання продукту до певної температури (для вина – 43...55° С, для томат-пюре – 95...98° С) з наступним його розливом у простерилізовану тару (пляшки), герметичним закупорюванням і охолодженням. Спосіб має застосування, в основному, для продуктів із високою кислотністю.

Класична пастеризація в тарі (названа пляшковою) проводиться після розливу і герметизації фруктових соків та вин у пляшках, бутелях і жерстяній тарі. Нагрівання продукту в тарі здійснюється потоком гарячого повітря або води. Класична пастеризація припускає фасування продукту за температури пастеризації (наприклад, 95° С – для соків з м'якоттю, 85° С – для натуральних фруктових соків, 60° С – для вина) у бутелі або банки (пляшки), герметизацію тари (закупорювання або закатування), термостатування, а після цього інтенсивне охолодження.

На практиці знаходять застосування установки пастеризації в електромагнітному полі високої частоти (ВЧ). Такий спосіб проводять за більш низької температури. Порівняно зі звичайною пастеризацією процес менш тривалий (1...2 хв., інколи декілька секунд). Теплота середовища, що передається клітині (теплопровідність), швидше переборює тепловий бар'єр (оболонку клітини). Під час обробки продуктів у ВЧ-полі теплота виділяється безпосередньо в обсязі клітини. Струмами ВЧ пастеризують компоти та соки у скляній тарі.

Пастеризаційна апаратура. Пастеризація здійснюється в установках або апаратах, що називаються пастеризаторами. У харчових виробництвах використовуються найрізноманітніші пастеризаційні установки періодичної та безперервної дії.

Апарати періодичної дії використовують для пастеризації невеликої кількості продуктів. До них належать ванни тривалої пастеризації ВТП, універсальні танки, камерні пастеризатори, автоклави.

Ванна тривалої пастеризації ВТП (рис. 9.19) являє собою теплообмінний апарат із оболонкою 2 і кришкою 5. Оболонка 2 ванни 3 заповнюється водою, що підігрівається парою, яка надходить через безшумний пароструминний нагрівач 1. Усередині резервуару розміщено мішалку 4, що має привід 6. Спочатку ванну заповнюють продуктом, після цього включають мішалку, в оболонку пускають воду і подають пару. Продукт перемішується мішалкою, нагрівається від внутрішньої поверхні стінки резервуару до температури пастеризації та піддається витримці. По закінченні витримки закривається паровий вентиль, а в оболонку подають холодну воду по трубі та охолоджують продукт до необхідної

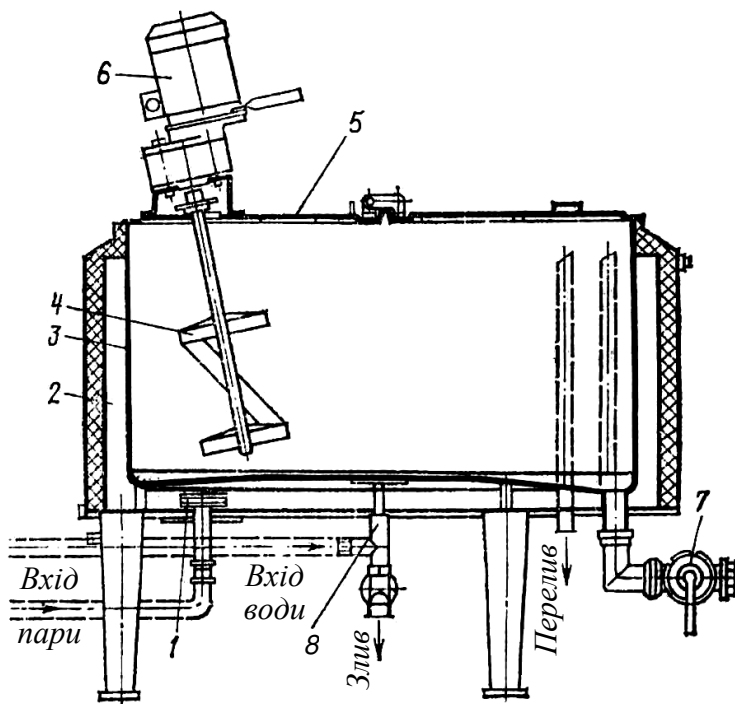


Рисунок 9.19 – Ванна тривалої пастеризації

температури. З ванни продукт зливається через кран 7. Аналогічне влаштування мають універсальні танки.

Камерні пастеризатори періодичної дії застосовуються для пастеризації рідких продуктів (наприклад, вина) в пляшках. Пляшки встановлюються у гнізда металевих ящиків, що поміщуються на вагонетку. Вагонетка закочується у камеру, герметично зачиняються дверцята і в батареї, які розташовані всередині камери, подається гаряча вода. Температура і кількість води регулюються. Перед

пастеризацією пляшки з вином закупорюються, на горловину пляшок надіваються спеціальні скоби. Вино, нагріте до температури пастеризації (біля 60°C), витримується протягом 2 хв., а після цього температура його знижується до $15...20^{\circ}\text{C}$ і вагонетки викочуються з камери. Недолік камерних пастеризаторів – періодичність дії та необхідність застосування ручної праці.

Більш перспективним обладнанням для пастеризації рідких харчових продуктів (вина, томатного і фруктових соків, компоту) в скляній і жерстяній тарі є пастеризатори-охолоджувачі безперервної дії, що обігріваються паром, гарячою водою або гарячим повітрям.

Конструктивно пастеризатори цього типу складаються з секції власно пастеризації та секцій охолодження, через які проходить транспортер, що несе банки (пляшки) з продуктом. Швидкість руху транспортера регулюють таким чином, щоб забезпечити перебування продукту в зоні пастеризації протягом заданого часу, а після цього – поступове охолодження. Температура в пастеризаторах регулюється автоматично відповідно заданого режиму.

Схему безперервно діючого пастеризатора для фруктових соків наведено на рис. 9.20. Цей повітряно-водяний пастеризатор-охолоджувач для соків являє собою теплоізолюваний короб, всередині якого рухається транспортер (сітчаста стрічка) 4.

Апарат поділений на декілька зон: пастеризаційну 5, в якій здійснюється витримка на транспортері банок (пляшок) із продуктом у потоці гарячого повітря, яке нагнітається в короб за допомогою вентиляторів через парові калорифери, і охолоджувальну, в якій здійснюється комбіноване охолодження обдуванням зовнішнім повітрям 3 і зрошенням проточною водою 2. У останній зоні – висушувальній 1 – охолоджений продукт знову обдувається зовнішнім повітрям.

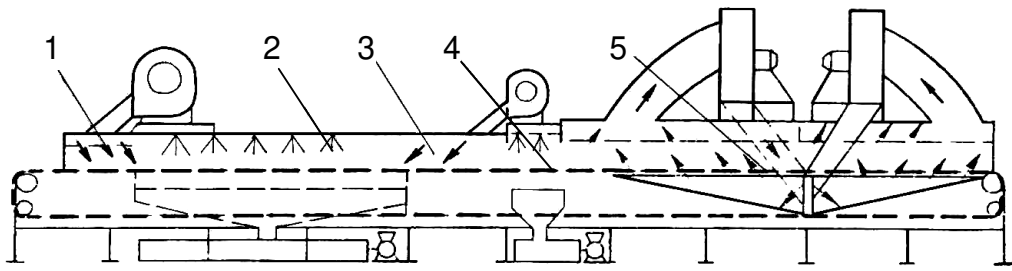


Рисунок 9.20 – Схема пастеризатора безперервної дії

Широке розповсюдження в харчовій технології має пастеризація в безперервному потоці, за якої продукт подається насосами в теплообмінні апарати пластинчатого або трубчатого типів.

Найбільш досконалими апаратами для пастеризації є пластинчаті. У них пастеризують молоко та молочні продукти, фруктові та овочеві соки, вино, пиво та інші рідини. У пластинчатих пастеризаторах по ходу руху рідини, що обробляється (по секціях), здійснюються такі процеси (рис. 9.21): часткове нагрівання продукту, що надходить, теплотою виходячого (пастеризованого) продукту (секція рекуперації теплоти); нагрівання продукту гарячою водою або паром до заданої температури (секція пастеризації); витримка протягом деякого часу нагрітого продукту за температури пастеризації (секція витримки); охолодження виходячого продукту з передачею теплоти продукту, що надходить, на нагрівання (секція рекуперації теплоти); охолодження продукту холодною водою (секція охолодження водою); охолодження продукту розсолем (секція охолодження розсолем).

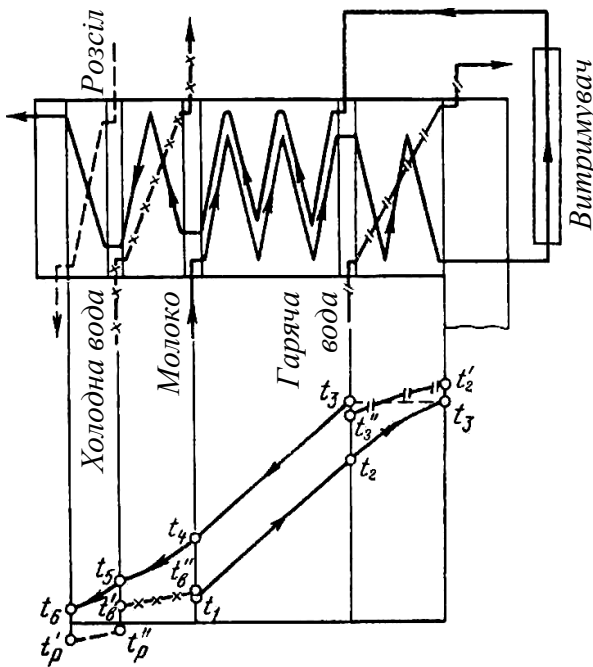


Рисунок 9.21 – Схема роботи і температурний графік пластинчатого пастеризатора

Кожну секцію пластинчатого пастеризатора утворено пакетами з декількох пластин. Як правило, пастеризація і охолодження здійснюються при автоматичному регулюванні технологічного процесу.

Пластинчатий пастеризатор, схему якого надано на рис. 9.22, складається з групи сталевих теплообмінних штампованих пластин 6, підвішених на горизонтальних штангах 7, кінці яких закріплено у стійки 3 і 9. За допомогою натискної плити 8 та гвинта 10 пластини в зібраному стані стиснуті в один пакет. На схемі для більш чіткого зображення потоку рідини показано лише 5 пластин у розімкненому положенні. У дійсності пластини в робочому положенні щільно

притиснуті одна до одної на гумових прокладках 4 і 5. Пластини мають однакові габарити, але відрізняються розташуванням вхідних і вихідних каналів 11 та 12. Під час збирання пластини чергуються та утворюють низку замкнених камер, по один бік яких проходить продукт, що пастеризується, а по інший – охолоджуюча або гріюча рідина. У зібраному апараті теплообмінні пластини групуються у секції (рекуперації, пастеризації, охолодження). Кожна секція складається з пакетів, через які продукт рухається також послідовно.

Паралельна розстановка плоских пластин із малими проміжками між ними дозволяє розмістити в просторі робочу поверхню теплообмінника найбільш компактно, що дозволяє значно зменшити габарити пластинчатого апарата порівняно з іншими типами рідинних теплообмінників. Наприклад, коефіцієнт компактності пластинчатих апаратів (відношення робочої поверхні до об'єму робочої зони) досягає $200 \text{ м}^2/\text{м}^3$, що у 5...10 разів більше, ніж для трубчатих.

Основним конструктивним елементом пластинчатого апарата є теплопередаюча пластина (рис. 9.23), являє собою деталь, особливістю якої є складна форма поверхні теплообміну. Від форми поверхні у великій мірі залежить інтенсивність тепловіддачі та, отже, ефективність роботи апарата.

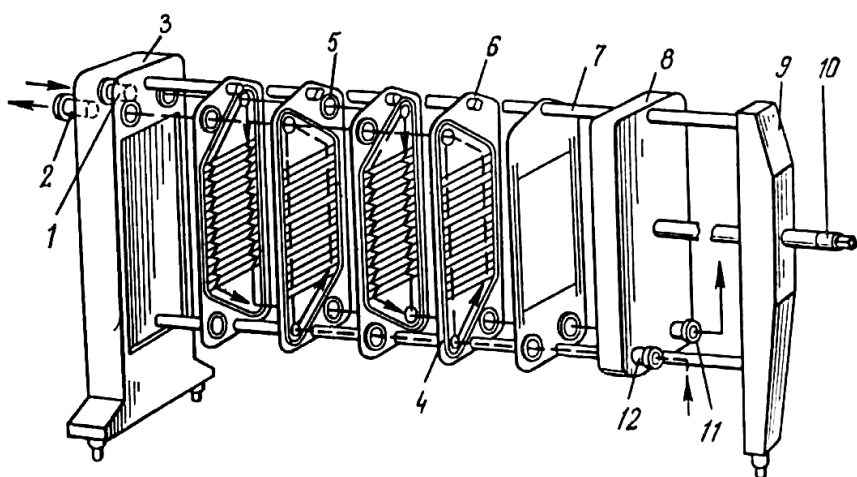


Рисунок 9.22 – Схема пластинчатого пастеризатора

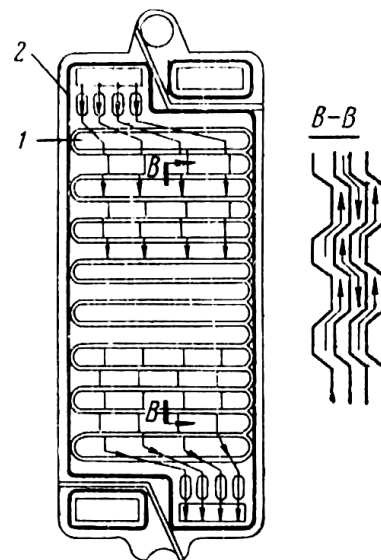


Рисунок 9.23 – Пластина розбірного пластинчатого теплообмінника

Для збільшення поверхні теплообміну та інтенсифікації процесу пластини роблять рифленими. Рифлі 1 бувають найрізноманітнішого профілю, але обов'язково повинні забезпечувати турбулізацію потоку. Проміжок між пластинами залежить від висоти гумових прокладок 2, у більшості випадків він дорівнює 3...10 мм. Пластини виготовляють штампуванням із листової нержавіючої сталі 1Х18Н9Т товщиною 0,7...1 мм.

Відзначимо, що пластинчатий теплообмінник надає конструктору і виробникові великі можливості щодо здійснення різноманітних компонуючих варіантів і легко припускає збільшення (або зменшення) робочої поверхні апарата, який знаходиться в експлуатації. Він припускає вільне внесення

різноманітних коригувань у схемі руху потоків і дозволяє зосереджувати на одній станині теплообмінні секції різноманітного призначення для виконання в одному апараті усього комплексу операцій теплової обробки продуктів, що є надзвичайно важливим чинником.

Використання теплоти у секції рекуперації, яку запас оброблюваний продукт після секції пастеризації, для підігрівання матеріалу, що надходить, значно скорочує витрати теплоти на пастеризацію і витрату охолоджуючої води. Показником, що характеризує економічність роботи такого апарата, є коефіцієнт регенерації теплоти

$$E = \frac{Q_p}{Q} = \frac{Gc(t_2 - t_1)}{Gc(t_3 - t_1)} = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}, \quad (9.44)$$

де Q_p – кількість теплоти, використаної в секції рекуперації, Вт; Q – загальна кількість теплоти, яку витрачено на підігрівання продукту від початкової температури до температури пастеризації, Вт; G – маса продукту, що нагрівається

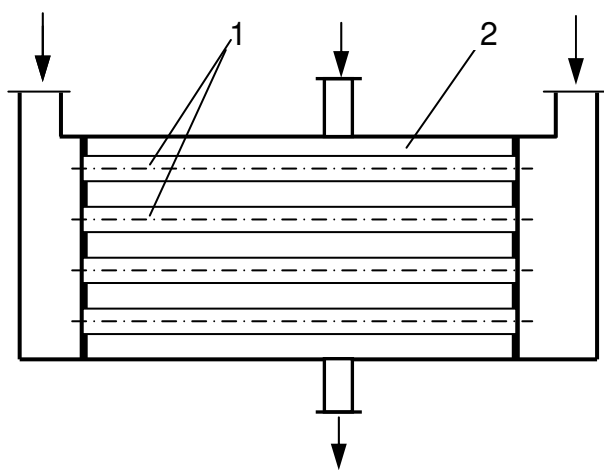


Рисунок 9.24 – Схема трубчатого пастеризатора

високотемпературної пастеризації.

Нетеплові способи пастеризації. До нетеплових способів пастеризації належать: ультразвукова, з ультрафіолетовим опроміненням, з радіо-активним опроміненням і механічна.

Ультразвукова пастеризація заснована на тому, що продукт озвучується ультразвуком із частотою коливань більше 25 кГц. Бактерицидний ефект досягається за рахунок того, що під дією ультразвуку в рідині виникає кавітація (тобто закипання), пов'язана з виникненням гідравлічних ударів величезної сили, під дією яких клітини мікроорганізмів розриваються. Обробка молока ультразвуком затримує його скисання до 5 діб при повному збереженні вітамінів, кольору, запаху та смаку. У 1 см³ молока, обробленого ультразвуком, міститься в середньому 18 бактерій, в той час як після звичайної пастеризації протягом години – 30000 бактерій. Ультразвукову пастеризацію застосовують для обробки виноградного та інших соків. При цьому регенераційна спроможність

кг/с; c – питома теплоємність продукту, Дж/(кг·К); t_1 – початкова температура продукту, °С; t_2 – температура продукту після підігрівання в секції рекуперації, °С; t_3 – температура пастеризації, °С.

Коефіцієнт регенерації протитечійних пластинчатих пастеризаторів $E = 0,7 \dots 0,8$.

У трубчатому апараті (рис. 9.24) продукт рухається по колектору труб 1, а у міжтрубний простір 2 надходить гріючий агент, в ролі якого можуть бути використані гаряча вода або пара. У останній час трубчаті пастеризатори застосовуються, головним чином, для

мікрофлори, що залишилася, зменшується приблизно в 4 рази. Летальна дія УЗ-хвиль на бактерії та віруси починає виявлятися при частоті коливань біля 100 кГц.

9.4. Стерилізація

Стерилізація, або знепліднення (*sterilis* – безплідний), – обробка продукту з метою припинення життєдіяльності клітин сировини і мікроорганізмів, у тому числі й їхніх спор. Спосіб консервування стерилізацією у харчовій промисловості та підприємствах ресторанного господарства є основним і найбільш надійним серед усіх методів збереження харчових продуктів. При цьому ставиться завдання, що стерилізація не повинна призводити до зміни білкових і екстрактивних речовин, вітамінів, органолептичних властивостей, зниження харчової та біологічної цінності продукту. Залежно від фізичних властивостей продуктів, які стерилізуються, та мети стерилізації, застосовують різні методи знепліднення мікроорганізмів: гарячий (волога, дробова, суха стерилізація) і холодний (механічна стерилізація, іонізація, стерилізація ультразвуком та ультрафіолетовим випромінюванням). Основним із них є теплова стерилізація за рахунок нагрівання продукту до високих температур.

Інколи застосовують низькотемпературну дробову стерилізацію, що полягає у багаторазовому нагріванні та охолодженні продукту. Дробова стерилізація, яка запропонована Тиндалем і тому називається тиндалізацією, здійснюється за низьких температур для продуктів, які не переносять температури 100°С. Принцип, покладений у мікробіологічну основу способу консервування тиндалізацією полягає у наступному. Під час першого нагрівання, яке для досягнення потрібного ступеня стерильності недостатнє за тривалістю або температурним рівнем, гине більшість вегетативних клітин бактерій. Частина ж із них, в порядку самозахисту від умов, зовнішнього середовища, які змінилися в несприятливий бік, встигає перетворитися в спорову форму і завдяки цьому «рятується» від дії високої температури. Протягом міжварильного добового вистоювання за кімнатної температури спори проростають, утворюючи вегетативні клітини, що гинуть під час повторних нагрівань.

Так, наприклад, консервують компоти у великій консервній тарі. Їх тричі стерилізують при 100°С усього по 5 хвилин із інтервалами між варками 24 години, замість звичайної 40...50-ти хвилинної високотемпературної теплової обробки. Це дозволяє отримати високоякісний продукт.

Відзначимо основні чинники, що впливають на вибір режимів стерилізації. Так, як і під час пастеризації, в стерилізації існує залежність між двома основними чинниками – температурою нагрівання продукту і тривалістю її впливу. Летальний (смертельний) час для мікроорганізмів із підвищенням температури обробки різко знижується і, наприклад, для бактерій «ботулінус» характеризується такими даними:

Температура, °С	100	105	110	115	120
Летальний час, хв	330	100	32	10	4

Природно виникне питання, що краще: довше стерилізувати за помірних температур, або ж стерилізувати швидко за високих температур? Для відповіді на

це запитання необхідно прийняти до уваги міркування, які відносяться до якості стерилізованої продукції та до характеристики процесу стерилізації з технічної сторони. Встановлено, що для уповільнення хімічних реакцій, що викликають погіршення якості стерилізованої продукції (наприклад, меланоїдинові реакції), слід використовувати режим експрес-стерилізації, тобто вести термообробку за можливо більш високих температур протягом дуже короткого проміжку часу.

Проте, таку обробку не завжди можна реалізувати в існуючих стерилізаційних апаратах за даних теплофізичних характеристик продукту (неможливо, наприклад, за декілька секунд розігріти автоклав до 140° С, прогріти на всю глибину або після цього охолодити вміст консервної банки). Друга обставина пов'язана з тим, що під час високотемпературної короткочасної стерилізації встигають загинути мікроорганізми, але можуть не встигнути інактивуватися ферменти, і, отже, незважаючи на стерильність, такі консерви під час зберігання можуть піддатися ферментативному псуванню.

Ефективність стерилізації характеризують коефіцієнтом стерилізуючої дії, що являє собою логарифм відношення початкової та кінцевої кількості бактерій у одиниці об'єму продукту:

$$C = \lg \left(\frac{N_0}{N_k} \right). \quad (9.45)$$

Між максимальною температурою стерилізації та коефіцієнтом стерилізуючої дії існує пряmolінійна залежність.

Способи стерилізації. Стерилізацію харчових продуктів, як обробку, згубно діючу на мікрофлору, можна здійснювати трьома основними способами: тепловим, механічним і опромінюючим (рис. 9.25).

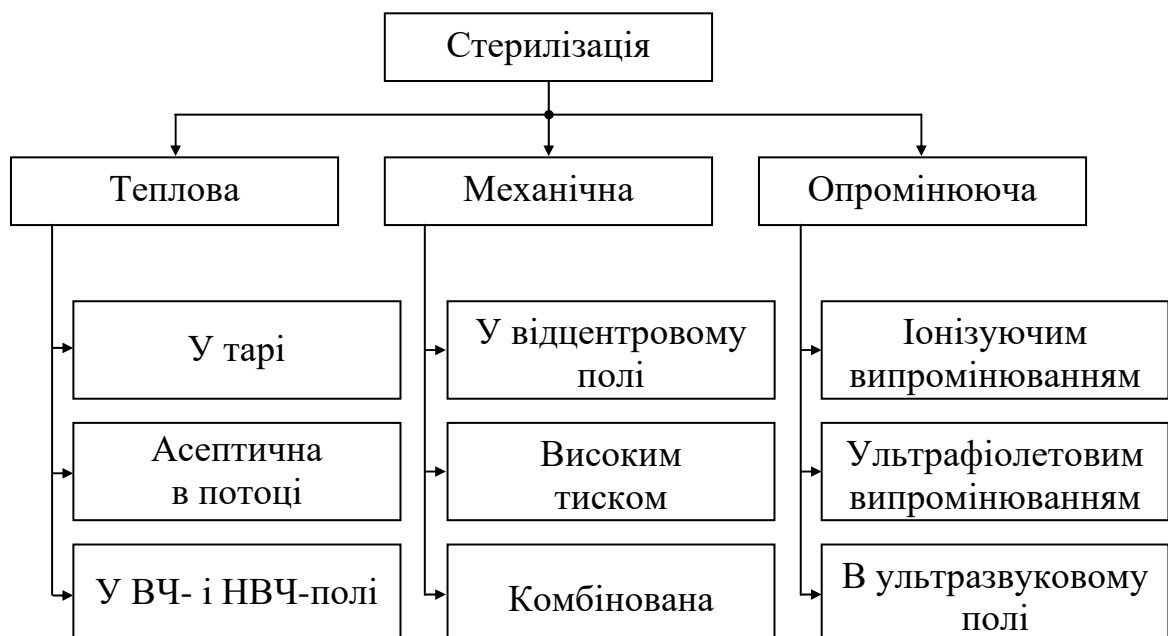


Рисунок 9.25 – Класифікація способів стерилізації

Теплова стерилізація в тарі припускає такі основні операції: підготовка сировини, закладання і порціонування її у банки, герметизація (закатування)

банок та стерилізація. Для кожного продукту існує свій оптимум режиму стерилізації, який визначається формулою стерилізації, що враховує особливості продукту і тари та має такий вигляд:

$$\frac{A - B - C}{t} \quad \text{або} \quad \frac{A - B - C}{t} P, \quad (9.46)$$

де A – тривалість прогрівання автоклаву і банки до температури стерилізації, хв; B – тривалість власно стерилізації, хв; C – тривалість охолодження, хв; t – температура стерилізації, °С; P – максимальна величина сумарного тиску, який створюється в стерилізаторі для компенсації внутрішнього тиску, що виникає в банках під час стерилізації, кПа.

Стерилізацію продукту, розфасованого та упакованого у тару, здійснюють за температурою до 120° С, при цьому витримка складає від 20 до 200 хв (залежно від місткості тари та виду продукту). Для прикладу наведемо формулу стерилізації за обідніми консервами, фасованими у банки місткістю 1000 см³ (1 л):

$$\frac{35 - 30 - 50}{120 \text{ } ^\circ\text{C}} \times 200 .$$

Харчові продукти, піддані тепловій стерилізації у герметичній тарі, можуть зберігатися у доброму стані протягом декількох років. Тому такий спосіб консервування є на сьогодні найрозповсюдженішим. Але йому властивий серйозний недолік, а саме значна тривалість теплової обробки, що негативно впливає на збереження низки цінних складників харчової продукції (окремих амінокислот, вітамінів та ін.), а також на її органолептичні властивості. Особливо це відчутно під час стерилізації продуктів, які мають низьку теплопровідність, і використанні тари великого об'єму (більше 1 л). Означена обставина не дозволяє широко використовувати консерви для цілей ресторанного господарства і знижує ефективність застосування заздалегідь заготовлених консервованих напівфабрикатів.

Особливий вид теплової стерилізації – гаряче розливання, що застосовується для соків і томатопродуктів. Продукт нагрівають до кипіння, негайно розливають у стерильну тару і закупорюють. Якщо використовують тару місткістю не менше 3 л, то запас теплоти в продукті виявляється достатнім для стерилізуючого ефекту.

Знизити шкідливий вплив теплоти на якість консервів у тарі будь-якого об'єму дозволяє метод асептичного консервування. Сутність його полягає у тому, що продукт і тара стерилізуються окремо, а після цього в умовах, що виключають можливість потрапляння мікроорганізмів (асептичні умови), стерильний попередньо охолоджений продукт розміщують у стерильну тару і герметично закупорюють її стерильними кришками. При цьому способом продукт можна миттєво нагріти (простерилізувати в потоці) і також швидко охолодити. На сьогодні найбільш завершеною в апаратурному оформленні є стерилізація у потоці різноманітних соків, пюре, молока і розфасування їх в одноразову упаковку з паперових, полімерних матеріалів та алюмінієвих туб.

Процес стерилізації у потоці харчових продуктів здійснюється двома шляхами. Перший із них заснований на нагріванні продукту через теплопередаючу поверхню. Для його здійснення використовують трубчаті та пластинчаті теплообмінники. Стерилізація через теплопередаючу поверхню здійснюється у цілому за порівняно тривалий проміжок часу (декілька секунд) і під впливом високої температури (140...160° С) складові елементи продукту встигають денатуруватися.

Другий шлях стерилізації продукту в потоці – це безпосередній контакт і змішування з теплоносієм. Основний теплоносій на харчових підприємствах – водяна пара. Безпосередня стерилізація здійснюється або шляхом введення пари у продукт, або шляхом введення продукту в пару. Стерилізація шляхом безпосереднього нагрівання паром має низку переваг:

- мінімальна витрата теплоти, бо вся ентальпія пари повністю використовується на нагрівання продукту;

- нагрівання здійснюється практично миттєво (за десяти частки секунди) і незважаючи на високу температуру (140...160° С) складові елементи продукту не встигають денатуруватися.

У сучасних стерилізаційних установках одразу ж після нагрівання продукту до температури стерилізації він потрапляє у вакуум-камери, де за рахунок самовипаровування дуже швидко охолоджується. При цьому з продукту частково видаляється волога, що потрапила під час конденсації пари. Слід, однак, мати на увазі, що пара, конденсуючись, залишається у продукті, що нагрівається; це тягне за собою необхідність застосування «чистої» пари, конденсат якої задовольняв би вимоги, що ставляться до питної води.

Відзначимо, що після завершення процесу стерилізації продукт необхідно швидко охолодити в асептичних умовах до температури, що не впливає негативно на його якість під час зберігання. Для цієї мети, як було вже відзначено, дуже ефективно застосування вакуумного охолодження. Використовуються і поверхневі апарати, описані вище. Проте при їхньому використанні необхідно вирішити низку проблем, пов'язаних зі збільшенням в'язкості холодного продукту.

Застосування струмів високої та надвисокої частоти (ВЧ і НВЧ) є одним із особливих варіантів теплової стерилізації продуктів. Харчовий продукт у електромагнітному полі поглинає електричну енергію, перетворюючи її в теплову. Швидкість нагрівання харчового продукту в полі ВЧ або НВЧ значно вища, тривалість процесу обчислюється секундами. Це дозволяє значною мірою зберегти якість продукту. Окрім теплового відомі інші методи стерилізації. Перспективні напрямки – застосування для цієї мети лазерів, ГЧ-променів, іонізуючого випромінювання, ультразвуку та різноманітних комбінацій традиційних і нових методів.

Останніми роками значно підвищився інтерес до технологій впливу надвисокого (до 1000 МПа) тиску (НВТ) на різноманітні біологічні об'єкти та їх композиції (в основному на харчові продукти) із метою консервування та поліпшення їх споживчих властивостей. Це пов'язано зі згубною дією НВТ на клітинні структури живих мікроорганізмів та їх спори, що призводить до їх депресії та наступної загибелі.

Короткочасне оброблення харчових продуктів у камері НВТ (рис. 9.26) дозволяє відмовитися від термічного оброблення продуктів під час їх консервування, зберегти вітаміни (наприклад, вітамін С), збільшити термін зберігання продуктів, підвищити харчову цінність та смакові якості. Наприклад, якісні властивості (аромат, консистенція, смак) сиру «Чеддер», що виготовлений із молока після оброблення НВТ протягом 10 хвилин, значно вищі, ніж сиру, що виготовлений із пастеризованого молока; він має більший термін зберігання.

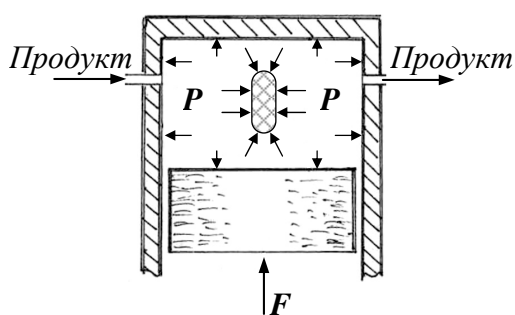


Рисунок 9.26 – Схема роботи камери НВТ

Різде зменшення мікроорганізмів і бактерій, зокрема *Salmonella typhimurium*, спостерігалось в рибі, що оброблена НВТ, а термін зберігання охолодженого м'яса після обробки НВТ досягає 60 діб. В основі цих явищ лежать глибокі структурні, якісні та кількісні хімічні зміни в органічній масі речовини, які відбуваються як у рідкій, так і твердій фазах. Серед методів у сфері нетрадиційних харчових технологій викликає інтерес технологія з використанням НВТ у поєднанні з дією електромагнітного поля надвисокої частоти

(НВЧ). Отримані результати під час комплексного оброблення НВЧ і НВТ фруктових та ягідних соків показують підвищення інтенсивності їх якісних змін.

Апарати для стерилізації продуктів. Апаратурне оформлення стерилізації продуктів у тарі може бути періодичним і безперервнодіючим. До першої групи стерилізаторів належать різноманітного виду автоклави, до другої – роторні, гідростатичні та конвексрні стерилізатори.

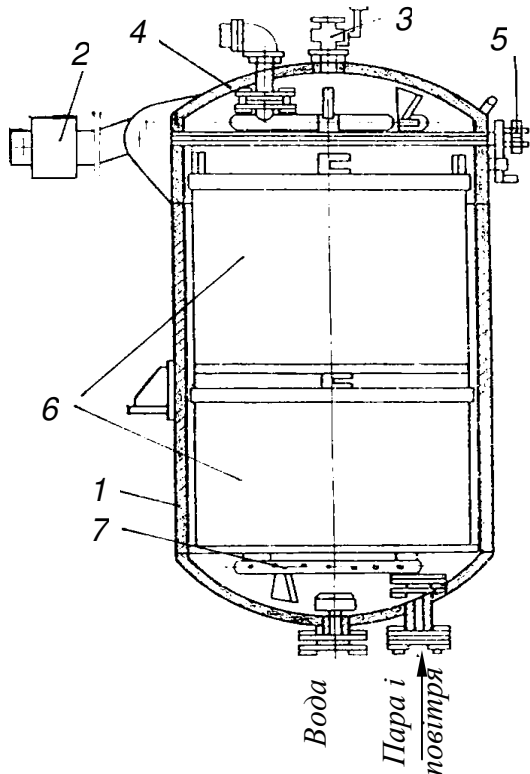


Рисунок 9.27 – Схема вертикального автоклава

У консервному виробництві частіше за все застосовують вертикальні автоклави-стерилізатори на 2 або 4 корзини, які мають автоматичні прилади для реєстрації та програмного регулювання температури і тиску робочого середовища.

Вертикальний автоклав (рис. 9.27) являє собою циліндричний корпус 1 зі сферичним дном і сферичною кришкою 4, яка відкидається та кріпиться на петлях і притискається до корпусу барашковими гайками або спеціальним кільцевим зажимом 5. Для герметизації апарата між корпусом і кришкою є кільцева гумова прокладка. Кришка має протипаду 2, що полегшує її підйом та закривання автоклава. Усередині автоклава розміщуються перфоровані корзини

б. Над днищем розміщено барботер 7 для подавання пари. Є запорні пристрої для продування 3, подавання і спускання води, впускання пари, відведення конденсату. Контроль температури та тиску – за термометром і манометром.

Після закупорювання банки вкладають у автоклавні корзини, які в свою чергу встановлюють в апарат, заповнений водою. Герметично закривають кришку. Подаванням пари починається процес стерилізації за формулою, встановленою для даного виду продукту і банок у технологічній інструкції.

Крім вертикальних в експлуатації знаходяться також горизонтальні та безсіткові автоклави.

Цикл роботи автоклава:

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4, \quad (9.47)$$

де τ_0 – тривалість завантаження, с; τ_1 – тривалість підвищення температури, с; τ_2 – тривалість витримки за температури стерилізації, с; τ_3 – тривалість зниження температури і тиску в автоклаві та охолодження продукції, с; τ_4 – тривалість розвантаження, с.

Тепловий баланс процесу стерилізації може бути наведений таким рівнянням:

$$Q_{заг} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (9.48)$$

де $Q_{заг}$ – загальна витрата теплоти, кДж; Q_1 – витрата теплоти на нагрівання автоклава, кДж; Q_2 – витрата теплоти на нагрівання сіток, кДж; Q_3 – витрата теплоти на нагрівання тари (банок, пляшок), кДж; Q_4 – витрата теплоти на нагрівання продукту, кДж; Q_5 – витрата теплоти на нагрівання води в автоклаві, кДж; Q_6 – витрата теплоти в навколишнє середовище, кДж.

Виражаючи тепловитрати через ККД автоклава η тепловий баланс може бути наданий у розгорнутому вигляді таким чином:

$$D (i - c_k t_k) \eta = (G_1 c_1 + G_2 c_2 + G_3 c_3 + G_4 c_4 + G_5 c_5) (t_c - t_n), \quad (9.49)$$

де G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – відповідно маса автоклава, сіток, тари, продукту і води, кг; c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 – відповідно питома теплоємність матеріалу автоклава, матеріалу сіток, матеріалу тари, продукту і води, кДж/(кг·К); t_c – температура стерилізації, °С; t_n – початкова температура автоклава, сіток, тари, продукту і води (прийнята нами однаковою і рівною температурі повітря в цеху), °С; t_k – температура конденсату, °С; D – кількість пари, кг; i – ентальпія грючої пари, кДж/кг.

Витрата пари складе (в кг):

$$D = \frac{Q_{заг}}{i - c_k t_k}. \quad (9.50)$$

Секундна витрата пари (в кг/с) на стерилізацію:

$$D' = \frac{D}{(\tau_1 + \tau_2)}. \quad (9.51)$$

Безперервнодіючі стерилізатори мають низку переваг перед періодично діючими: більш висока продуктивність, більш інтенсивний теплообмін. Безперервнодіючі стерилізатори бувають роторні (барабанні), з гідростатичним протитиском і горизонтальні конвеєрного типу.

У стерилізаторах з гідростатичним протитиском процес здійснюється в паровій камері, температура й тиск у якій залежать від висоти водяного стовпа, що відокремлює парову стерилізаційну камеру від усієї системи установки.

Так, за температури в паровій камері 120°C (надлишковий тиск $0,1\text{ МПа}$) висота водяного стовпа повинна складати 10 м , за температури 127°C (тиск $0,15\text{ МПа}$) – 15 м , за 133°C (тиск $0,2\text{ МПа}$) – 20 м і т. ін. відповідно до таблиці сухої насиченої водяної пари та виходячи з того, що кожен 10 м водяного стовпа створюють надлишковий тиск $0,1\text{ МПа}$.

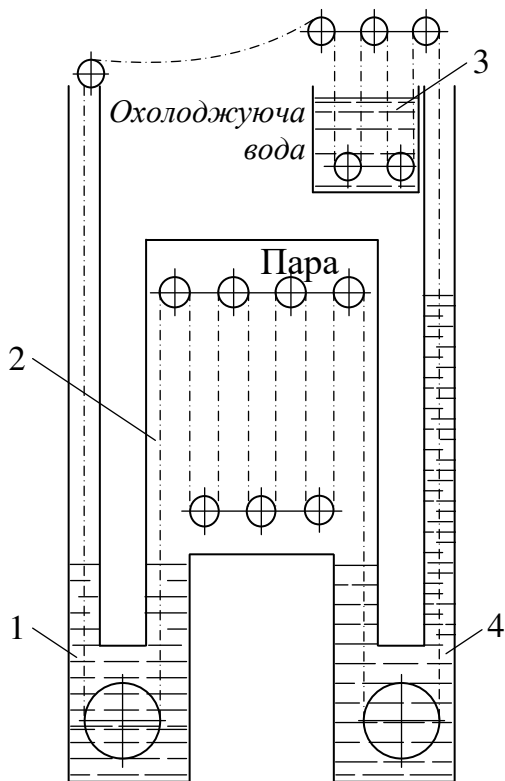


Рисунок 9.28 – Схема стерилізатора з гідростатичним протитиском

Принцип роботи стерилізаторів такого типу пояснює рис. 9.28. Нескінченний ланцюг із прикріпленими на ньому трубчатими перфорованими носіями банок (пляшок) проходить через башту 1, наповнену гарячою водою, температура якої поступово зростає згори вниз, і потрапляє у парову стерилізаційну камеру 2, де здійснює шлях у декілька витків за постійної температури. Далі ланцюг із носіями проходить у башту 4, заповнену водою, температура якої зменшується знизу вгору.

Таким чином, у башті 1 здійснюється етап підігрівання, у камері 2 – власне стерилізація, в башті 4 – охолодження. Після виходу з башти 4 носії з банками потрапляють у басейн 3 з холодною водою, де остаточно охолоджуються і далі надходять на розвантаження.

Конструктивно гідростатичні стерилізатори оформлені не так, як це представлено на принциповій схемі; наприклад, охолоджуючий басейн розміщено внизу під баштами, місце завантаження і вивантаження розташоване

звичайно також знизу з одного боку і т. ін.

Роторний стерилізатор безперервної дії являє собою горизонтально розташований нерухомий корпус-циліндр, всередині якого обертається барабан із поздовжніми ребрами – смугами з куткової сталі. Між ребрами розміщуються банки. Під час обертання барабана банки обертаються навколо його осі, навколо своєї осі та водночас переміщуються від одного кінця барабана до іншого завдяки спіральній напрямній, яку розташовано на внутрішній поверхні нерухомого корпусу.

Залежно від продуктивності застосовують роторні стерилізатори, що складаються з двох, трьох або чотирьох корпусів. Кожний корпус має своє призначення: підігрівач, стерилізатор, охолоджувач. Корпуси заповнюються

водою (гарячою або холодною) або парою, завдяки чому відбувається підігрівання, стерилізація та охолодження консервів.

Для виведення банок із одного корпусу і введення в інший є розвантажувальні та завантажувальні пристрої типу шлюзового затвору. Підлягаючий стерилізації продукт у металевій тарі надходить у перший циліндр, де він підігрівається гарячою водою до 80°C , у другому циліндрі продукт нагрівається також гарячою водою до $90\dots95^{\circ}\text{C}$. Нагрітий продукт переходить у третій корпус-стерилізатор, всередину якого подається пара потрібного тиску. Зі стерилізатора продукт переходить в охолоджувач (з протитиском), де охолоджується холодною водою.

Тривалість стерилізації регулюється частотою обертання барабана.

На завершення зупинимося на деяких пристроях, що використовуються для стерилізації продуктів у потоці під час асептичного консервування. Стерилізаційно-охолоджувальні установки бувають пластинчатого і трубчатого типів, а також пароконтактні. Пластинчаті установки часто застосовуються для стерилізації соків, молока, плодovих і овочевих пюре, бульйонів у желатиновому виробництві. Вони базуються на тих же принципах, що і пастеризаційно-охолоджуючі установки, та складаються, як мінімум, із трьох секцій: рекуперації, стерилізації та охолодження.

Конструктивні особливості стерилізаційних установок визначаються умовами їх роботи. Передусім, стерилізація продукту відбувається за високих температур нагрівання – $135\dots150^{\circ}\text{C}$. Для того, щоб продукт не скипав за цих температур, його прокачують через апарат під підвищеним тиском. Це накладає низку вимог до міцності апарата, його з'єднувальних вузлів, застосування

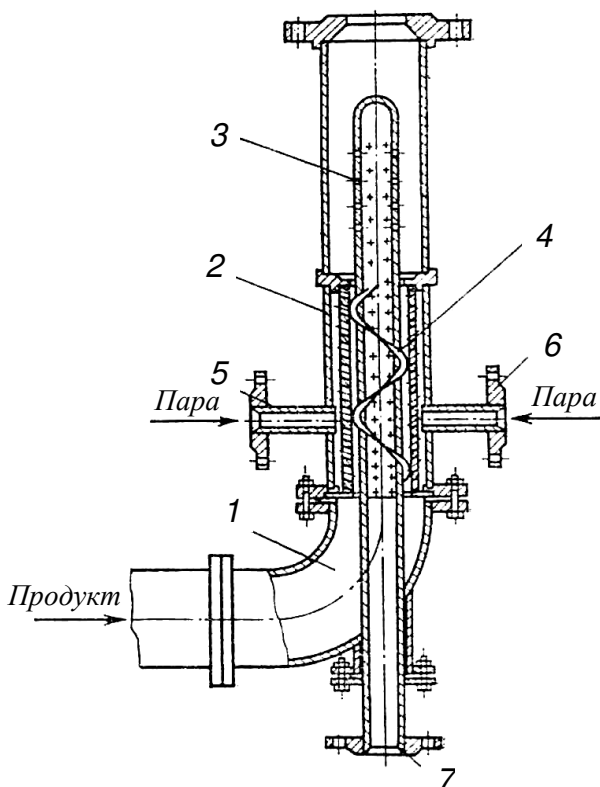


Рисунок 9.29 – Схема пароконтактного теплообмінника

прокладок із термічно стійких марок гуми, ізоляційного покриття. Відмінною особливістю цих апаратів є й необхідність забезпечення високої швидкості пересування продукту, що повинно звести до мінімуму можливість його пригорання до поверхні теплопередачі. Особливо це стосується таких харчових продуктів, як, наприклад, томатна паста, яка в силу своїх фізичних властивостей і хімічного складу схильна до утворення пригару й зміни якості за тривалого впливу високих температур. Усунути означений недолік можна шляхом примусової очистки поверхні нагрівання й перемішування пристінного шару з основним потоком продукту. Для цього застосовуються поточні теплообмінні апарати типу «труба у трубі», у внутрішній трубі яких з частотою обертання біля 400 об/хв обертається вал-витіскувач зі скребковими лопатками.

Найбільш ефективний засіб швидкого нагрівання продукту реалізується у пароконтактних теплообмінних апаратах. Вони мають невеликий гідравлічний опір, дешеві та порівняно прості у виготовленні, застосування їх виключає можливість пригорання продукту. Пароконтактний теплообмінник (рис. 9.29) складається з циліндричного корпусу 1 і концентрично розташованих у ньому зовнішнього та внутрішнього паророзподільвачів, виконаних відповідно у вигляді перфорованих циліндра 2 і трубки 3, між якими є порожнина для проходження продукту. На трубці 3 прикріплено гвинтову спрямовуючу 4 для перемішування продукту.

Пара надходить через патрубки 5, 6 і 7. Під час роботи апарата продукт подається в нижню частину корпусу 1 і спрямовується у порожнину, утворену циліндром 2 і трубкою 3. У цій порожнині відбувається інтенсивне нагрівання тонкого шару продукту гострою парою з перемішуванням.

Кількість пари, необхідної для нагрівання продукту від початкової температури t_n до температури стерилізації t_c , визначається з рівняння теплового балансу. При цьому вважаємо, що вся кількість пари конденсується в продукті.

$$Q = Gc(t_c - t_n) = D(i - c_k t_c), \quad (9.52)$$

Звідси:

$$D = \frac{Gc(t_c - t_n)}{i - c_k t_c}, \quad (9.53)$$

де Q – кількість теплоти, що передається, кВт; G – масова витрата продукту, кг/с; D – витрата пари, кг/с; c – питома теплоємність продукту, кДж/(кг·К); c_k – питома теплоємність конденсата, кДж/(кг·К); i – ентальпія пари, кДж/кг.

9.5. Інтенсифікація теплових процесів. Регенерація теплоти

Інтенсифікація теплових процесів дає можливість збільшити продуктивність апаратів у разі зменшення їх габаритів, металоємності, вартості та відповідному зменшенні експлуатаційних витрат. Крім того, інтенсифікація теплових процесів часто дозволяє отримати нові ефекти, порівняні і навіть переважаючі за значенням основні цільові ефекти – нові технології, покращення якості продукції, зменшення енергетичних витрат. Так, наприклад, інтенсифікація процесу пасерування борошна і овочів за допомогою ІЧ-нагріву та вібрацій дозволила організувати цей процес безперервним із гарантованою високою якістю готового продукту і значним зниженням питомих енерговитрат, що, в свою чергу, призвело до створення принципово нової конструкції апарата для реалізації цього процесу.

У цілому слід відзначити, що інтенсифікація теплообміну – це, передусім, збільшення кількості теплоти, що передається, та інтенсивності апарата.

Стосовно теплообмінних апаратів, розрізняють дві групи методів інтенсифікації: конструктивні та режимні. Це розмежування умовне, бо, використовуючи конструктивні засоби, наприклад оребріння, фактично впливають на процес теплообміну. У той же час режимні засоби пов'язані з тими

або іншими конструктивними особливостями апаратів (наприклад, введення джерела коливальних коливань).

Вирішення питання інтенсифікації теплообміну різноманітними фізичними впливами вимагає передусім глибокого теоретичного аналізу процесу, виявлення умов, сприятливих збільшенню кількості теплоти, що передається. Крім того, необхідним є проведення аналізу різноманітних методів інтенсифікації з метою вибору найбільш оптимального варіанта.

Під інтенсивністю будь-якого теплообмінного апарата мають на увазі відношення кількості теплоти Q , переданої в одиницю часу τ , до його основної геометричної характеристики – поверхні теплообміну S . Інтенсифікацію теплообміну можна розглядати як діяльність, спрямовану на підвищення показника інтенсивності апарата. У зв'язку з цим замість узвичаєного виразу «Інтенсифікація технологічного процесу» слід було б говорити про інтенсифікацію обладнання, мірою якої є його чітка кількісна характеристика – інтенсивність I . Для теплообмінного апарата можна записати:

$$I = \frac{Q}{S\tau} = \frac{K S \tau \Delta t_{сер.}}{S\tau} = K \Delta t_{сер.} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot 2,3 \lg \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}}, \quad (9.54)$$

Дійсно, необхідно збільшувати рушійну силу на початку процесу Δt_n , коефіцієнти тепловіддачі α_1 і α_2 для обох теплоносіїв, теплопровідність матеріалу апарата λ_i ; потрібно зменшити рушійну силу в кінці процесу Δt_k і товщину стінки поверхонь теплопередавання та забруднень δ .

Розглянемо три шляхи, що дозволяють інтенсифікувати теплопередачу, які впливають з аналізу основного рівняння теплопередачі.

1. Збільшення коефіцієнта теплопередачі або зниження загального термічного опору теплопередачі за рахунок зменшення його складових (поодиноких термічних опорів).

Проте необхідно знати, як на загальний термічний опір теплопередачі впливають його поодинокі складові. Коефіцієнт теплопередачі визначається найменшим із значень α_1 ; λ/δ ; α_2 .

Значення коефіцієнта K буде меншим меншого зі значень α_1 і α_2 . Наприклад, $\alpha_1 = 10$ Вт/(м²·К), $\alpha_2 = 100$ Вт/(м²·К), тоді:

$$K = \frac{10 \cdot 100}{10 + 100} \approx 9,01 < 10 ;$$

$$\alpha_1 = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad \alpha_2 = 1000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \text{ тоді}$$

$$K = \frac{10 \cdot 1000}{10 + 1000} \approx 9,9 < 10 ;$$

$$\alpha_1 = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad \alpha_2 = 100 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \text{ тоді}$$

$$K = \frac{20 \cdot 100}{20 + 100} \approx 16,7 < 20 .$$

Як видно, якщо один коефіцієнт тепловіддачі значно більший за інший ($\alpha_1 \ll \alpha_2$), збільшення більшого з них (α_2) не виявляє істотного впливу на значення K , а збільшення меншого з них (у наведеному прикладі – в 2 рази) дозволяє збільшити K в 1,67 рази.

Отже, інтенсифікації теплопередачі можна добитися шляхом створення умов, що сприяють зростанню найменшого зі значень α . Якщо $\alpha_1 \approx \alpha_2$, то інтенсифікувати теплопередачу можна збільшенням будь-якого з них.

На коефіцієнт теплопередачі також впливає термічний опір стінки $\lambda \delta$, котрий можна зменшити, виготовивши її тоншою (це щоправда пов'язано з надійністю стінки) або замінивши матеріал на більш теплопровідний (наприклад, сталь на латунь). Термічний опір стінки стає особливо помітним під час інтенсивної тепловіддачі з боку гарячого і холодного теплоносіїв.

У процесі експлуатації теплообмінних апаратів на поверхнях нагріву виникають відклади жиру, накипу, пригару і сажі. Навіть незначна товщина цих відкладень, що мають низькі коефіцієнти теплопровідності, створює великий термічний опір (шар накипу товщиною в 1 мм створює термічний опір, що дорівнює опору сталевій стінки товщиною 40 мм, а 1 мм сажі створює опір, еквівалентний товщині сталевій стінки 400 мм). У окремих випадках (наприклад, під час електрообігрівання) відкладання накипу призводить до значного підвищення температури стінки, що може стати причиною аварії. Тому під час експлуатації теплообмінних апаратів необхідно запобігати поверхні нагріву від усілякого виду відкладень, передбачати їх регулярне очищення.

2. Збільшення площі поверхні теплообміну в першу чергу з боку теплоносія з меншим коефіцієнтом тепловіддачі. З цією метою поверхню нагріву з боку цього теплоносія роблять ребристою (наприклад, в радіаторах систем опалення, в конденсаторах холодильних агрегатів та ін.), за рахунок чого досягається вирівнювання термічних опорів, а в результаті і збільшення кількості переданої теплоти.

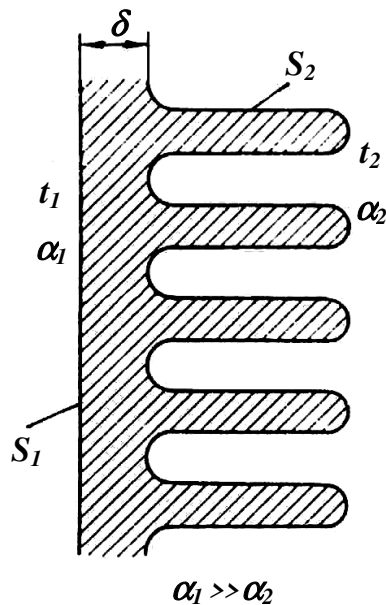


Рисунок 9.30 – Ребриста стінка

Кількість переданої теплоти через плоску ребристу стінку товщиною δ (рис. 9.30) визначається рівнянням:

$$Q = K_p (t_1 - t_2) \tau \text{ Дж}, \quad (9.55)$$

де K_p – коефіцієнт теплопередачі ребристої стінки в Вт/(К).

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 S_1} + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{1}{S_1} + \frac{1}{\alpha_2 S_2}}. \quad (9.56)$$

Відношення площі ребристої поверхні S_2 до площі гладкої S_1 називається коефіцієнтом оребрення. Якщо вимагається зменшити розміри теплообмінника, ребристими роблять обидва боки стінки.

3. Збільшення різниці температур теплоносіїв (середнього температурного напору).

Величина температурного напору в першу чергу залежить від температур теплоносіїв та напрямку їх руху вздовж поверхні теплообміну. Оскільки температури теплоносіїв зумовлені вимогами технологічних процесів, змінювати їх не завжди можна.

Розглянемо найбільш розповсюджені випадки теплообміну і можливі шляхи збільшення середньої різниці температур.

3.1. Якщо температура теплоносія постійна, що має місце під час конденсації пари, а температура рідини, що підігрівається, збільшується, то збільшити середню різницю температур в цьому випадку можна збільшенням температури гріючої пари, тобто використанням пари більш високого тиску.

3.2. Температура теплоносія змінна, що має місце у краплинному або газовому середовищі, і в процесі теплообміну зменшується; температура середовища, що приймає теплоту, залишається постійною, наприклад, під час випарювання рідини.

Збільшити середню різницю температур між теплоносіями можна, знижуючи температуру середовища, що приймає теплоту, наприклад, знижуючи тиск під час випарювання.

3.3. Температури обох теплоносіїв постійні; це також один із розповсюджених процесів теплообміну – випарювання рідини за рахунок теплоти конденсації пари. Збільшити середню різницю температур можна, збільшуючи тиск гріючої пари або зменшуючи тиск пари, що утворюється під час кипіння (збільшенням вакууму під час випаровування), або одним й другим шляхом.

3.4. Температури обох теплоносіїв змінні; при цьому напрямлення потоків по обидва боки поверхні теплообміну може бути паралельне – прототечія зустрічне – протитечія і перпендикулярне – перехресна течія.

З метою збільшення середньої різниці температур теплоносіїв треба замінити існуючий прототік протитечією, якщо така операція можлива за технологічними умовами; збільшити до раціонально можливих меж меншу різницю температур між теплоносіями.

Таким чином, нами встановлено і проаналізовано три шляхи інтенсифікації теплообміну – збільшення коефіцієнта теплопередачі K , поверхні теплопередачі S і середнього температурного напору $\Delta t_{сер}$.

Як вже відзначалося вище, ефективність теплообміну визначається величиною коефіцієнтів тепловіддачі α_1 і α_2 . Для визначення подальшого напрямку інтенсифікації необхідно звернутися до рівнянь теплоперенесення і використати відомі конкретні вирази для визначення α_1 і α_2 .

Аналіз критеріальних залежностей дозволяє встановити основні способи та практичні заходи зі збільшення коефіцієнтів тепловіддачі.

Основний опір теплообміну за однофазного теплоносія зосереджений у пограничному шарі. Товщина шару тим більша, а тепловіддача тим гірша, чим більша в'язкість і концентрація рідини і чим менша її швидкість руху. Тому для

інтенсифікації теплообміну необхідно так впливати на пограничний шар, щоб він виявився можливо більш тонким або повністю зруйнованим. Загальний принцип інтенсифікації конвективного теплообміну вказує, що найбільш вигідним є турбулентний режим руху рідини під час омивання теплопередаючої поверхні або під час зовнішнього обтікання тіл. Шлях інтенсифікації тепловіддачі у турбулентному режимі руху – підвищення середньої швидкості руху рідини. При заданій витраті рідини швидкість підвищується зі зменшенням площі проходу. Вибір труби меншого діаметра інтенсифікує тепловіддачу за двома причинами: збільшується швидкість руху і зменшується шлях теплового потоку, бо величина діаметра входить у знаменник рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі з критерію Нуссельта. Зменшити площу проходу рідини в трубі можна, встановивши в трубі по центру металеві стрижні та завдяки цьому створивши кільцевий потік руху. Для кращої турбулізації по довжині стрижня на деякій відстані один від іншого роблять кульові виступи. Між стінкою труби і виступом утвориться щілина, минаючи яку, потік інтенсивно переміщується і теплота більш енергійно і рівномірно розподіляється в масі рідини. Таке конструктивне рішення значно інтенсифікує тепловіддачу газових середовищ. У трубчатих теплообмінниках, окрім означених заходів, влаштування ходів також приводить до збільшення швидкості руху рідини і, отже, до інтенсифікації процесів тепловіддачі.

На основі аналізу дослідних даних за теплопередачею встановлено, що в турбулентній області величина Nu для труб зі вставками в окремих випадках в 4 рази вища, ніж для гладких труб.

Примусову конвекцію можна створювати за рахунок встановлення різноманітного виду мішалок і вентиляторів, що особливо важливо для інтенсифікації теплообміну в апаратурі підприємств ресторанного господарства.

Циркуляцію рідини у варочних апаратах можна прискорити за рахунок раціонального розташування гріючих поверхонь. У зв'язку з цим доцільно застосовувати кільцеподібні гріючі поверхні, розташовані в днищах і на бокових стінках апаратів. У цьому відношенні надто перспективні гнучкі нагрівальні системи, що дозволяють розташовувати гріючі поверхні на будь-яких ділянках апарата.

Коефіцієнт тепловіддачі під час конденсації пари залежить від теплопровідності конденсату, від товщини плівки стікаючого конденсату і режиму його руху, що, в свою чергу, залежить від в'язкості та густини конденсату, тобто фізичних властивостей рідини, а також від висоти стінки, по якій стікає конденсат. Шляхи інтенсифікації тепловіддачі в цьому випадку – зменшення товщини плівки конденсату на поверхні стінки, що досягається шляхом зменшення висоти вертикальної стінки, заміною вертикального розташування труб горизонтальним під час конденсації пари на їх зовнішній поверхні. Інтенсифікація тепловіддачі досягається також встановленням спеціальних пристроїв (конденсатовідводників) для своєчасного та повного відведення конденсату. Інтенсифікації тепловіддачі в апаратах, працюючих на паровому обігріві, сприяє своєчасне вилучення повітря і неконденсуючих газів із гріючих камер, бо їхня наявність різко знижує коефіцієнт тепловіддачі від пари до стінки.

Істотно інтенсифікувати теплообмін можливо застосуванням різноманітного виду коливань як самої теплообмінної поверхні, так і коливань середовища, що є теплоносієм. Коливаннями можуть бути вібрації, пульсації в рідині, ультразвук. Вплив вібрацій і пульсацій на конвективний теплообмін вивчався багатьма дослідниками. Наприклад, визначені коефіцієнти тепловіддачі у разі пульсаційного руху води по трубі за умов турбулентного режиму для значень $Re = 30000...85000$. Коефіцієнти тепловіддачі під час пульсацій підвищуються на 60...70%. Сприяють інтенсифікації теплообміну і вібрації нагрівальних трубок, що викликаються пульсаціями рідини.

Пошук можливих шляхів інтенсифікації теплообміну триває. Так, наприклад, проведено низку досліджень із застосування для інтенсифікації процесів кипіння і конденсації змінного електричного поля частотою 50 Гц; виявлено значне збільшення коефіцієнтів тепловіддачі в усіх режимах кипіння і конденсації, причому це збільшення було тим більше, чим більше електропровідність рідини. Інтенсивність теплообміну під час кипіння дозволяють збільшити й інші фізичні впливи – високочастотне електромагнітне поле, іонізуюче випромінювання. Проте задовільні теоретичні описи цих процесів відсутні із-за їхньої складності.

Проте використання в теплообмінниках для інтенсифікації тепловіддачі різноманітних додаткових елементів і пристроїв, тим або іншим чином впливаючих на процес, але не приймаючих участь у теплообміні, призводить до ускладнення і дорожчання конструкцій теплообмінників, а також різкого підвищення гідравлічного опору і збільшення потужності, потрібної на подолання цього опору. Тому дуже важливо мати критерії, що оцінюють доцільність засобів інтенсифікації тепловіддачі. Практично прийнятні лише ті інтенсифікуючі пристрої та швидкості потоку, що приводять до економії наведених витрат. Наприклад, інтенсифікація тепловіддачі за рахунок збільшення швидкості руху теплоносіїв приводить до зростання гідравлічних опорів і потужності на їх подолання. Оптимальне значення швидкості руху теплоносія може бути знайдене за мінімумом функції:

$$P = \frac{C}{N} + P_1, \quad (9.57)$$

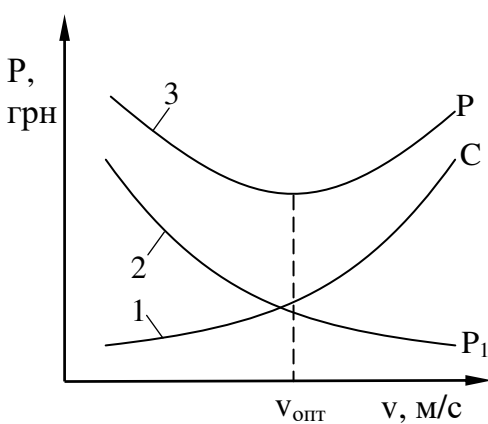


Рисунок 9.31 – Криві витрат

де P – сумарні витрати на виготовлення і експлуатацію апарата, віднесені до одного року роботи, грн/рік; C – капітальні витрати на виготовлення і монтаж апарата, грн; N – термін окупності капіталовкладень, рік; P_1 – річні експлуатаційні витрати, грн/рік.

Мінімум функції (9.57) легко знайти побудовою графіку в координатах із горизонтальною оссю «швидкість теплоносія в м/с» і вертикальною оссю, на якій відкладені річні витрати: експлуатаційні 1, амортизаційні 2 і сумарні 3 (рис. 9.31)

Регенерація (рекуперація) теплоти. Одним з основних напрямів економії теплоти в харчовій промисловості є використання вторинних енергетичних ресурсів, тобто їхня регенерація. У більш широкому понятті регенерація теплоти – утилізація (практичне застосування) тієї частини теплоти, яку було вироблено для конкретного процесу, але не було спожито в ньому, залишаючись при цьому корисною теплотою. Регенерація теплоти можлива як від продукту до продукту, так і через проміжний агент, наприклад, воду.

Вторинні енергоресурси – енергетичний потенціал відходів, готової продукції, побічних і проміжних продуктів, що утворюються в технологічних установках, що не використовуються в самій установці, але може бути частково або повністю використаний в інших апаратах або для допоміжних потреб підприємств.

Вторинні енергоресурси харчових виробництв можна поділити на наступні групи:

- паро-конденсатна суміш пари, що використовує гріючий теплоносій у 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, хлібопекарних), копильних установках, термоагрегатах (наприклад, для обжарювання і варення ковбасних виробів), обжарочних апаратах (наприклад, для зерен кави), сушильних установках та ін.;
- скидані гарячі води температурою понад 60° С;
- фізична теплота готової продукції (наприклад, гарячого молока після пастеризації) або відходів.

Використання вторинних енергоресурсів здійснюється частіше за все у спеціальних теплообмінних апаратах – рекуператорах і регенераторах. Вони забезпечують передавання теплоти між двома (або більшою кількістю) потоками теплоносіїв, що проходять через апарат. Якщо обидва потоки теплоносіїв проходять через теплообмінник водночас, то такі теплообмінники називаються рекуператорами.

Теплообмінники, в яких два потоки теплоносіїв проходять через один і той же простір поперемінно, називаються регенераторами. У регенераторах теплота, яку передано від одного з теплоносіїв поверхні нагріву, акумулюється нею, а після цього віддається другому теплоносію, коли настає його черга руху через апарат. Регенератори є апаратами періодичної дії.

Оскільки регенеративні теплообмінники у промисловості використовуються порівняно рідко, то говорячи про теплообмінні апарати, як правило, мають на увазі рекуперативні теплообмінники.

Найбільш простий і доступний спосіб регенерації (рекуперації) може бути продемонстрований на прикладі пастеризаційно-охолоджувальної установки пластинчатого типу, широко застосовуваної у молочній та інших галузях промисловості. Регенерація (рекуперація) у даному випадку зв'язує два

протилежні теплові процеси: пастеризацію і охолодження. В апараті здійснюються послідовно попереднє нагрівання молока (шляхом рекуперації), нагрівання до температури пастеризації, попереднє охолодження (шляхом рекуперації) і остаточне охолодження.

Теплота, що виходить з установки разом із потоком молока, використовується в регенераторі для підігрівання холодного молока, що надходить в апарат. При цьому досягається дві мети: холодне молоко підігрівається до певної температури, в результаті чого буде досягнуто надто істотну економію у витраті теплоти, а гаряче молоко після пастеризації охолотиться, внаслідок чого буде досягнуто економію у витраті охолоджуючого агента (води, розсолу).

Баланс теплоти рекуператора висловлюється рівнянням:

$$Gc(t_2 - t_1) = Gc(t_3 - t_4), \quad (9.58)$$

де G – кількість продукту, що пастеризується, кг/с; c – питома теплоємність продукту, що нагрівається, Дж/(к·К); t_1 – початкова температура продукту, що нагрівається, °С; t_2 – температура рекуперації, °С; t_3 – температура пастеризації продукту, °С; t_4 – температура продукту на вході у секцію охолодження, °С.

Економічний ефект використання рекуперації (регенерації) в апараті визначається наступним чином. Без рекуперації витрата теплоти на пастеризацію складає:

$$Q = Gc(t_3 - t_1).$$

У секції рекуперації холодному продукту, що надходить, передається теплота від пастеризованого:

$$Q_p = Gc(t_2 - t_1).$$

Відношення поверненої, використаної рекуператором теплоти до загальної її витрати на пастеризацію називається коефіцієнтом рекуперації:

$$E = \frac{Q_p}{Q} = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}.$$

Величина E безрозмірна і являє собою критерій економічного ефекту рекуператора. За необхідності коефіцієнт рекуперації висловлюють у відсотках.

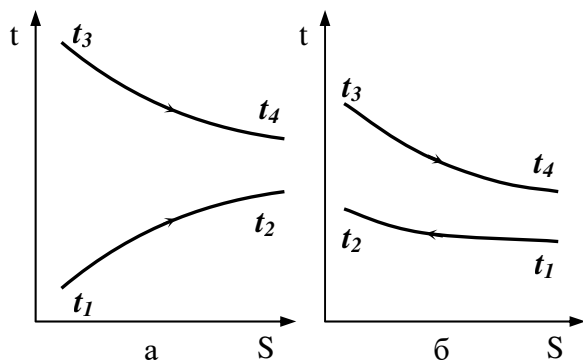


Рисунок 9.32 – Температурні криві рекуператора: а) прямиотечійного; б) протитечійного

Рекуперацію можна проводити за принципами прямиотечії та протитечії (рис. 9.32).

Для прямиотечійного рекуператора межею температури рекуперації t_2 є:

$$\lim t_2 = 0,5(t_1 + t_3).$$

Підставимо це межеве значення t_2 і отримаємо:

$$\lim E = 0,5 \text{ або } 50\%.$$

Таким чином, теоретично можливе значення коефіцієнта рекуперації під час прямиотечії – 50%.

Аналогічні міркування дозволяють прийти до висновку, що у випадку протитечійного руху теплообмінних середовищ:

$$\lim t_2 \rightarrow t_3.$$

Отже, $\lim E = 1$ або 100%.

Це означає, що під час протитечії теоретично можливе значення коефіцієнта рекуперації складає 100%, для прямотечійного апарата ця межа у два рази менша. Теоретичну межу $E = 1$ ніколи не може бути досягнуто, бо $E = 1$ означає, що вся теплота, витрачена на пастеризацію, вертається повністю, і пастеризацію, отже, можна

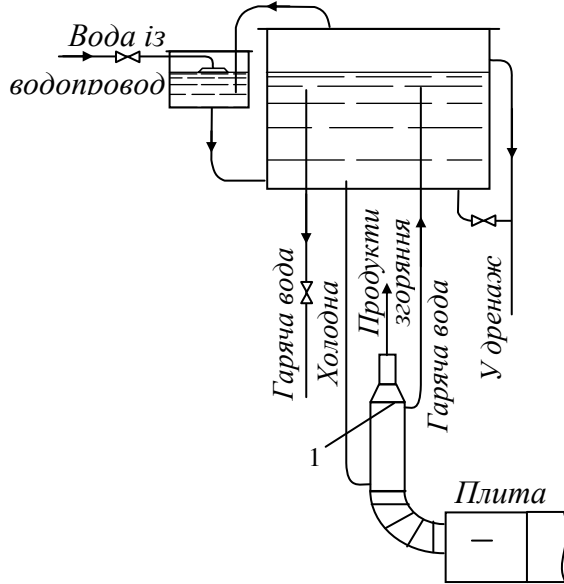


Рисунок 9.33 – Виносний водонагрівач для утилізації теплоти вихідних продуктів згоряння

вести до нескінченності, не витрачаючи цілком теплоти, окрім один раз витраченої на нагрів рідини до температури пастеризації t_3 . На практиці у харчових виробництвах широко застосовуються рекуператори, у яких E досягає 85...90%.

Широкі можливості для застосування регенерації (рекуперації) є і у підприємствах ресторанного господарства. Достатньо відзначити, що твердопаливна плита ПСТ-2,5 для утилізації теплоти газів, що відходять, обладнана водогріючим пристроєм продуктивністю 150...200 л/г води за температури 70° С.

У вертикальному газоході газових плит (рис. 9.33) монтується виносний нагрівач 1 для утилізації теплоти продуктів згоряння, які відходять. Для інтенсифікації теплообміну і підвищення ефективності роботи таких водонагрівачів у газоході монтуються турбулізуючі вставки.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

до лекції № 6

1. Які існують засоби передачі теплоти? Їх визначення.
2. Сформулюйте закон Фур'є.
3. Що називають коефіцієнтом теплопровідності?
4. У якому разі теплопровідність циліндричної стінки розраховують за допомогою формули плоскої стінки?
5. Наведіть приклади багатошарової стінки.
6. У чому полягає сутність конвективного теплообміну?
7. Що таке критеріальні рівняння і як ними користуватися для обчислення коефіцієнта тепловіддачі?
8. Які значення має критерій Рейнольдса для ламінарного і турбулентного режимів?
9. Як відбувається тепловіддача під час вільного руху рідини?
10. Що таке плівкова конденсація пари?
11. Від чого залежить передача теплоти випромінюванням?
12. Сформулюйте закон Стефана-Больцмана.
13. Що таке ступінь чорноти?
14. Які тіла називають абсолютно чорними?
15. У чому сутність процесу теплопередачі?
16. Що таке складний теплообмін?
17. Що таке коефіцієнт теплопередачі, його визначення?
18. Як обчислити коефіцієнт теплопередачі для одношарової та багатошарової стінок?
19. Як визначається рушійна сила теплових процесів?
20. У чому переваги нагрівання водяною парою?
21. Як визначається витрата пари на процес?
22. Наведіть приклади використання топкових газів.
23. У чому сутність омичного, індукційного та високочастотного нагрівів?
24. Що таке проміжний теплоносій?
25. Назвіть фізичні основи плавлення і твердіння.
26. Які електрофізичні методи оброблення харчових продуктів вам відомі?
27. У чому особливість процесу нагрівання в полі НВЧ?
28. На яку глибину продукту проникають інфрачервоні промені?

до лекції № 7

29. На які групи можна розділити теплообмінні апарати?
30. Наведіть приклади використання кожухотрубних апаратів для теплообміну між двома рідинами.
31. Назвіть найбільш компактні теплообмінні апарати.
32. Що таке калорифери? Де їх застосовують?
33. З яких розділів складається проектний розрахунок теплообмінного апарата?
34. З якою метою виконують повірочний розрахунок теплообмінника?

35. Складіть рівняння теплового балансу теплообмінного апарата.

36. Яка мета гідравлічного розрахунку теплообмінника?

до лекції № 8

37. Чим розрізняються випарювання і випаровування?

38. Що називають питомою витратою пари, що гріє?

39. У якому випадку питома витрата пари, що гріє, менша: у разі випарювання у вакуумі, під атмосферним тиском, чи під надлишковим тиском?

40. Чим відрізняється багатокорпусна випарна установка від однокорпусної?

41. Чим викликане явище самовипаровування? Коли воно спостерігається?

42. У якій схемі роботи багатокорпусної випарної установки витрата енергії менше: під час прямиотечії чи протитечії?

43. У яких випадках доцільно застосовувати апарати з примусовою циркуляцією розчину?

44. Для випарювання яких розчинів рекомендується використовувати роторно-плівкові апарати?

45. Назвіть відомі вам типи конденсаторів.

46. Як улаштовані конденсатори змішування?

47. Чому вторинну пару останнього корпусу багатокорпусної випарної установки направляють на конденсацію?

48. Яку мету переслідують процеси конденсації в різних виробництвах?

49. Які основні цілі процесу заморожування харчових продуктів?

50. Що мають на увазі під криоскопічною температурою?

51. Які баланси лежать в основі розрахунків процесів охолодження і заморожування?

52. Як визначається тривалість охолодження і заморожування продукту?

53. Як здійснюється процес фризеравання морозива?

54. У чому сутність процесу розморожування продуктів?

до лекції № 9

55. Як можна класифікувати способи варення?

56. З якою метою застосовують процес бланшування продуктів?

57. Чому процес нагрівання продукту в киплячій рідині є нестационарним?

58. Як визначається теплота, яка корисно використовується під час варення?

59. У чому сутність процесів смаження та їх класифікація?

60. Що таке істинний та видимий відсотки усмаження?

61. Напишіть рівняння теплового балансу жарильного апарата.

62. Яка залежність між тривалістю і температурою під час пастеризації та стерилізації харчових продуктів?

63. Які ви знаєте нетеплові засоби пастеризації?

64. Що характеризує коефіцієнт регенерації теплоти теплообмінника?

65. Наведіть приклад формули стерилізації.

66. Опишіть конструктивний устрій вертикального автоклава-стерилізатора.

67. Як можна підвищити коефіцієнт теплопередачі?

68. Які можливі шляхи збільшення температурного напору?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Процеси і апарати харчових виробництв. У 2 ч. Ч.1. Основи курсу. Гідравлічні, гідромеханічні та механічні процеси : конспект лекцій для студентів, що навчаються за спеціальністю 181 «Харчові технології» (освітній ступінь – «бакалавр»). / укладачі : О. І. Черевко [та ін.]. Х. : ХДУХТ, 2020. 93 с.
2. Процеси і апарати харчових виробництв : підруч. (рек. МОН України) / О. І. Черевко, А. М. Поперечний ; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. 2-ге вид. доп. та випр. Х. : Світ Книг, 2014. 495 с.
3. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум : навч. Посібник / О.І. Черевко [та ін.]; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х. : Світ Книг, 2013. 168 с.
4. Механіка рідин і газів в галузі : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» / А. О. Шевченко, В. М. Михайлов, С. В. Прасол. Харків: ДБТУ, 2024. 92 с.
5. Гідравліка та гідропневмопривід : опорний конспект лекцій для студентів, що навчаються за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» (освітній ступінь – «бакалавр») / уклад.: О.А. Маяк, А.О. Шевченко; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х.: ХДУХТ, 2016. 65с.
6. Поперечний А. М. Моделиювання процесів та обладнання харчових виробництв : підручник / А. М. Поперечний, В. О. Потапов, В. Г. Корнійчук. – К. : Центр учбової літератури, 2012. 312 с.

Навчальне електронне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимах

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Частина 2. ТЕПЛООБМІННІ ПРОЦЕСИ

Конспект лекцій

Укладачі:

МИХАЙЛОВ Валерій Михайлович
ШЕВЧЕНКО Андрій Олександрович
ПРАСОЛ Світлана Володимирівна
МАЯК Ольга Анатоліївна

Підп. до друку 30.04.2024 р. Один електронний оптичний диск (CD-ROM);
супровідна документація. Об'єм даних 3,5 Мб. Тираж 10 прим.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44