

Лекція 4

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОХОЛОДЖЕННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Питання:

1. Сутність процесу охолодження харчових продуктів
2. Граничні умови при охолодженні
3. Тривалість охолодження продуктів
4. Параметри охолодження продуктів
5. Способи охолодження продуктів

1. Сутність процесу охолодження харчових продуктів

- **ОХОЛОДЖЕННЯ** – це зниження температури об'єкта до кінцевої температури, але не нижче криоскопічної.

З фізичної точки зору охолодження це комплексний процес переносу теплоти та речовини в об'ємі продукту та з його поверхні, або, як його називають процес тепло- та масо- переносу

Охолодженим вважається продукт, в товщі якого підтримується температура $0...4^{\circ}\text{C}$.

Основна задача охолодження полягає в створенні несприятливих умов для розвитку мікробіологічних і ферментативних процесів у харчових продуктах.

Метою охолодження є збереження початкової якості продукту протягом певного часу, за допомогою максимального гальмування тих явищ, які протікають в продукті та можуть стати причиною його псування:

- мікробіологічних процесів;
- біохімічних перетворень, обумовлених дією тканинних ферментів;
- фізико-хімічних процесів в результаті контакту продукту з навколишнім середовищем.

У кондитерському і молочному виробництві охолодження можуть застосовувати для формування структури компонентів виробів (наприклад, глазури на цукерках, вафлях і сирках).

Визначальним фактором впливу на продукт є температура. Зі зниженням температури зменшується швидкість протікання усіх (фізіологічних, біохімічних, мікробіологічних та ін.) процесів

Під час вирішення аналітичних задач про охолодження продуктів доводиться вдаватися до спрощень при представленні форми реального продукту. При цьому приймається, що форма більшості харчових продуктів може бути уподібненою до форми простих тіл – пластини, кулі, циліндру.

Крім того вважається, що структура продукту однорідна, та він рівномірно охолоджується середовищем.

Все це свідчить про те, що реальна тривалість охолодження відрізняється від розрахункової.

2. Граничні умови при охолодженні

Процеси переносу тепла і вологи, протікають у просторі і в часі.

Сукупність миттєвих значень температури у всіх точках об'єму продукту називають **температурним полем** $t=f(x, y, z, \tau)$.

Температурне поле може бути **стаціонарним і нестаціонарним**.

Стаціонарним полем називають поле, в обсязі якого температура в будь-якій точці незмінна. Якщо температурне поле змінюється в часі, воно є **нестаціонарним**.

Якщо температура є функцією однієї або двох координат, поле називається одно- або двовірним.

При описанні одновимірного температурного поля продукту використовують диференціальне рівняння теплопровідності, що зв'язує температуру, тривалість процесу і координату точки об'єму:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{d^2t}{dx^2},$$

де a - коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Рішення диференціального рівняння теплопровідності передбачає знання геометричної форми продукту, розподілу температури в продукті на початку охолодження (початкові умови) і закону взаємодії тепловідводячого середовища і поверхні продукту (граничні умови).

Сукупність початкових і граничних умов називають **крайовими умовами**.

Для практичних розрахунків початковий розподіл температури в об'ємі продукту приймається постійним: $tn = \text{const}$.

Характер граничних умов визначається особливостями теплообміну на поверхні продукту. Найбільш часто виконують завдання граничних умов у вигляді граничних умов першого, другого і третього роду.

Граничні умови першого роду припускають завдання температури поверхні продукту як функції часу $tn = f(\tau)$.

В окремому випадку ця умова виконується при інтенсивному тепловідведенні від поверхні продукту, наприклад, при охолодженні продукту в рідкому середовищі. У цьому випадку коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту α є досить великою величиною

$$\text{Відповідно } \alpha \rightarrow \infty \quad Bi \rightarrow \infty$$

а температура поверхні продукту протягом процесу охолодження залишається постійною ($tn = \text{const}$).

На основі рішення диференціальних рівнянь теплопровідності Фур'є для тіл стереометричних форми (пластини, кулі, циліндра), отримано аналітичні залежності. Рішення завдання для пластини представлено виразом

$$\frac{t_{(r,\tau)} - t_c}{t_n - t_c} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(\mu_k \frac{r}{R}) \cdot e^{-\mu_k^2 Fo},$$

для кулі

$$\frac{t_{(r,\tau)} - t_c}{t_n - t_c} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \frac{R \sin(\mu_k \frac{r}{R})}{r \mu_k} e^{-\mu_k^2 Fo},$$

- для циліндра

$$\frac{t_{(r,\tau)} - t_c}{t_n - t_c} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k I_0(\mu_k \frac{r}{R}) e^{-\mu_k^2 Fo}$$

де $t_{(r,\tau)}$, °С - температура в будь-якій точці продукту на відрізьку r , за час τ ,

r - поточна координата точки,

R - характерний геометричний розмір продукту (половина товщини - для пластини, радіус - для кулі, циліндра.)

Для поверхні продукту значення $t(r, \tau)$ перетворюється в $t(R, \tau)$. Для центру $r=0$;

t_c - температура тепловідводячого середовища, °C,

$I_0(x)$ - модифікована функція Беселя нульового порядку першого роду;

A_k та μ_k – коефіцієнти ряду Фур'є (Fo) та корні відповідних характеристичних рівнянь. Їх значення знаходять за критерієм Bi у довідковій літературі.

Критерій подібності Bi (Біо) є одним з найважливіших параметрів теорії теплопровідності і їм визначається інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем.

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$$

Критерій подібності Біо є кількісною мірою інтенсивності теплообміну, який оцінюється по середній теплопровідності стінки

Будь-яка задача теорії теплопровідності починається з аналізу величини критерію подібності Біо.

1. Якщо критерій подібності $Bi \leq 1$ в результаті малих значень коефіцієнта тепловіддачі α і великих значень теплопровідності, то перепадом температури всередині тіла можна знехтувати, а врахувати тільки температурний напір.
2. Якщо критерій подібності $Bi = 1$, то знехтувати ні температурним перепадом, ні температурним напором не можна.

Якщо критерій подібності $Bi \geq 1$, то в наслідок великої відносної інтенсивності теплообміну температура поверхні тіла може вважатися рівною температурі рідини. Таке завдання може розглядатися як внутрішнє

У виразі для кулі при $r \rightarrow 0$

$$\frac{R \sin(\mu_k \frac{r}{R})}{\mu_k \cdot r} = 1$$

Fo – критерій Фур'є, що ураховує нестационарність охолодження продукту.

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$$

де τ - тривалість охолодження, с.

Коефіцієнт теплопровідності знаходиться з виразу:

$$a = \frac{\lambda_{np}}{c \cdot \rho}$$

α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні продукту до середовища.

Приблизно коефіцієнт тепловіддачі знаходиться з виразу:

$$\alpha = (5,3 + 3,6 \cdot v) \cdot 1,16 \left(\frac{Bm}{m^2 K} \right)$$

v – швидкість руху повітря, м/с

Більш коректно та точно коефіцієнт тепловіддачі α розраховується на основі критеріїв, що описують умови теплообміну продукту з тепловідводячим середовищем.

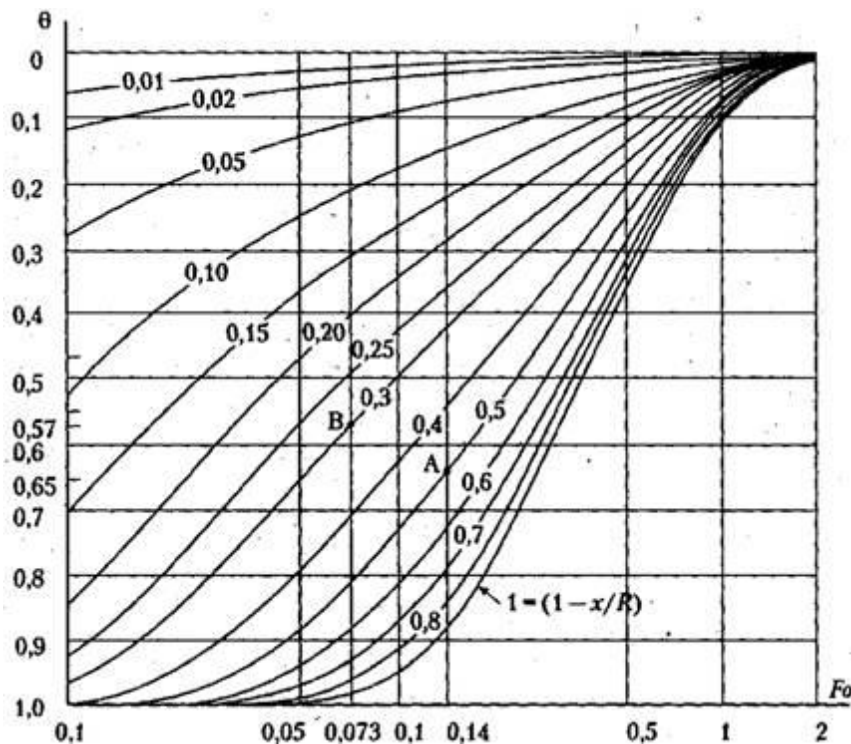
$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_B}$$

Nu – число Нусельта (критерій подібності);

λ_B -теплопровідність повітря, Вт/(мК).

Внаслідок застосування різних наближень визначення швидкості заморожування є складною задачею, вирішити яку більш точно можна тільки на основі оцінки температурного поля продукту, тобто задаючи тривалість охолодження та порівнюючи отриману температуру в розрахунковій точці об'єму продукту з технологічно заданою.

Для приблизної оцінки тривалості охолодження тіла будь-якої форми використовують номограми. На рисунку наведена номограма для тіла у вигляді пластини. Аналогічні існують і для тіл іншої форми.



Існує багато запропонованих рішень, які дозволяють оцінити тривалість охолодження продуктів. Одним із вдалих рішень є рішення А. Фікііна:

$$\tau = -A \frac{R^2}{a} \left[\left(\frac{2,3}{Bi} + 0,8 \right) \cdot \lg \frac{t_{\text{ц}} - t_c}{t_H - t_c} - 0,12 \right]$$

Де τ – тривалість охолодження,

A – коефіцієнт для пластини $A=1$, циліндру – $A=1/2$, кулі – $A=1/3$.

$t_{\text{ц}}$ – температура в центрі продукту, °C

Похибка при розрахунках за цією формулою не перевищує 3%.

4. Параметри охолодження продуктів

Незважаючи на індивідуальні властивості сировини і кулінарних виробів, процес охолодження повинен здійснюватися в обмежені за часом терміни і при мінімальних змінах вихідних властивостей.

Вибір способу охолодження базується на оцінці параметрів, які впливають на тривалість процесу. Ці параметри включають **температуру тепловідводного середовища, визначаючий розмір продукту, і коефіцієнт тепловіддачі від поверхні до тепловідводного середовища.**

Температуру тепловідводячого середовища при охолодженні приймають з урахуванням індивідуальних властивостей продуктів і обмежень технології виробництва.

Зменшити тривалість охолодження можна зниженням температури тепловідводячого середовища нижче криоскопічної температури аж до $-12 \dots -10$ °С. Цей метод використовують при охолодженні м'яса.

Застосування тепловідводячого середовища негативної температури можливо, якщо встановлена тривалість досягнення поверхнею продукту криоскопічної температури. Після закінчення цього часу продукт повинен бути переміщений в холодильну камеру, де здійснюється вирівнювання температури за об'ємом і подальше його доохолодження.

Подібний метод охолодження називають двоступеневим. Цей метод забезпечує суттєве зменшення тривалості процесу і скорочення втрат вологи продуктом, тобто його усихання.

Визначальний розмір продукту пов'язаний з видом охолодженої продукції або виробу і самостійно не може бути змінений. Однак при виборі технічного пристрою для охолодження продукту розмір продукту є одним з найбільш значущих компонентів.

Збільшення коефіцієнту тепловіддачі від продукту до тепловідводячого середовища досягається збільшенням швидкості його руху.

Практика і техніко-економічні розрахунки систем охолодження свідчать, що швидкість руху повітря поблизу поверхні продукту більше $5 \dots 7$ м/с технічно і економічно не виправдана.

У ряду інтенсивності тепловідводу від поверхні продукту можна вибудувати наступний порядок:

- охолодження повітрям, яке рухається конвективно, $\alpha = 3 \dots 5$ Вт/(м²К),
- повітрям, рухомим примусово, за допомогою вентилятора $\alpha = 20 \dots 30$ Вт/(м²К), .
- при охолодженні продукту рідким середовищем, коефіцієнт тепловіддачі становить $\alpha = 300 \dots 600$ Вт/(м²К),
- при охолодженні продукту за допомогою контакту з твердим тепловідводячим середовищем коефіцієнт тепловіддачі теоретично прагне до нескінченності .

Збільшення коефіцієнту тепловіддачі від продукту до тепловідводного середовища більш ефективно при заміні самого середовища.

Однак, збільшення коефіцієнту тепловіддачі не призводить до пропорційного зменшення тривалості охолодження.

При малих абсолютних значеннях коефіцієнта тепловіддачі його збільшення помітно прискорює процес охолодження, при великих значеннях цього коефіцієнта його зміна виявляється менш помітною.

Коефіцієнт тепловіддачі зростає, коли теплообмін на поверхні доповнюється випаровуванням вологи з поверхні продукту або коли радіаційна складова теплообміну стає помітною або визначальною. Системи, що використовують радіоційний теплообмін, застосовуються в основному для заморожування продуктів.

5.Способи охолодження продуктів

Усі відомі *способи охолодження* харчових продуктів поділяють на три основні групи:

- охолодження в повітрі
- охолодження в рідкому середовищі
- охолодження шляхом контактування з твердим тілом.

Існує ще охолодження інертними газами, але у харчовій промисловості воно не застосовується.

Усі ці способи можуть поєднуватися між собою.

ОХОЛОДЖЕННЯ В ПОВІТРІ – це універсальний спосіб охолодження для усіх продуктів.

Теплота при даному методі охолодження передається конвекцією.

Охолоджуючим середовищем є повітря, яке рухається з різною швидкістю. Рух повітря створюється примусово за допомогою вентиляторів, або виникає природно в результаті різниці парціальних тисків в середині і на зовні камери.

Повітря, як тепловідводне середовище, описується наступними параметрами:

- температурою

- швидкістю руху,
- відотною вологістю повітря,
- вологовмістом,
- тепловмістом,
- барометричним тиском.

Для інтенсифікації охолодження найчастіше застосовують перші два.

При охолодженні більшості продуктів ВВП не регулюється. Вона є параметром, який вільно встановлюється. Це обумовлено відсутністю приладів для контролю та регулювання вологості.

Найчастіше охолодження виконують у холодильних камерах, які забезпечені пристроєм для розподілу охолодженого повітря (вентилятори, повітроохолоджувачі). Продукти розміщуються в камері в різній тарі (вершкове масло, жири, птиця, яйця та ін.) Або без тари в підвішеному вертикальному положенні (м'ясні напівтуші і туши худоби, ковбасні вироби та ін.). Охолодження повітрям застосовується також для широкого асортименту плодоовочевої продукції.

Кращий технологічний ефект охолодження досягається в камерах тунельного типу з поздовжньої або поперечною примусовою циркуляцією охолоджувального повітряного середовища. При цьому вдається створити більш рівномірний розподіл температури і швидкості руху повітря і тим самим рівномірно охолодити продукцію по всьому об'єму.

У тунелі, що має меншу площу поперечного перетину, ніж камери зального типу, при однакових витратах повітря досягаються велика швидкість його руху і, отже, більший коефіцієнт тепловіддачі.

У тунелі з'являється додаткова радіаційна складова теплообміну за рахунок відводу теплоти від продукту холодними огороджувальними конструкціями, що сприяє зменшенню усушки харчових продуктів.

Відносно новим способом охолодження є охолодження м'яса в повітрі, перенасиченому вологою.

У камерах для охолодження є можливість змінювати ступінь перенасичення, швидкість і температуру повітря. Через високу тепловіддачу тривалість охолодження м'ясних напівтуш скорочується.

Умовно вважають, що повітря є інертним середовищем по відношенню до продуктів і в цьому *переваги* даного способу.

Недоліки:

- кисень повітря в деякій ступені діє як окислювач на органічні речовини продуктів
- при існуванні нестачі вологи в повітрі (при відносній вологості менш 100%) волога с поверхні продуктів випаровується (усушка)
- недостатня швидкість процесу охолодження, завдяки низькому значенню коефіцієнта тепловіддачі від продукту до повітря

ОХОЛОДЖЕННЯ В РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ – це охолодження у воді в присутності льоду та у розчині кухонної солі.

При охолодженні в рідкому середовищі продукти занурюють у нього або зрошують їм.

У ряді випадків перед охолодженням продукт укладають у вологонепроникну оболонку. Таке охолодження називають *безконтактним*.

Відповідно охолодження в рідкому середовищі без оболонки називають *контактним*.

Переваги: охолодження в рідких середовищах відбувається інтенсивніше, ніж у повітрі, так як коефіцієнт тепловіддачі до рідини набагато більше, ніж до повітря.

Недоліки:

- при охолодженні в рідині продукт втрачає свій зовнішній вигляд, просолюється, набухає;
- при безконтактному ж охолодженні в цьому середовищі знижується тепловіддача і ускладнюється технологічний процес.

Тому, практичне застосування рідких охолоджувачів обмежено.

Охолодження **ЛЬОДОМ** або льодосоляною сумішшю використовують для рослинних продуктів у тих випадках, коли відсутнє машинне охолодження. Для охолодження використовують лускатий лід.

Недоліки: травмування поверхневих тканин.

З метою усунення цих недоліків останнім часом застосовують так званий «рідкий лід»

Терміном «рідкий лід» іменується субстанція, яка складається з переохолодженої солоної води і дуже дрібних (не більше 0,01 мм) кристаликів звичайного льоду.

Найбільшого поширення льодогенератори рідкого льоду отримали в рибній галузі. Завдяки своїй гелеподібній консистенції рідкий лід повністю обволакує занурену в нього рибу і закриває до неї доступ атмосферного повітря. Оскільки коефіцієнт теплообміну цієї субстанції дуже великий (близько 80 Ккал / кг), то продукт охолоджується до нульової температури дуже швидко.

Вакуумне охолодження

Дуже швидкий спосіб охолодження, вважається найбільш ефективним для плодів з високим співвідношенням поверхні до об'єму.

Метод заснований на принципі: при зниженні атмосферного тиску знижується і температура кипіння води.

Флодоовочева продукція, упакована і підготовлена до охолодження, ретельно змочується і поміщається у вакуумну камеру (трубу). Тиск в камері знижується, поки вода не випарується з поверхні продукту і створить необхідну температуру, для попереднього охолодження. Будь-яка волога, яка випаровується з рослинних тканин плодів, виділяється рівномірно з усієї продукції. Тому цей метод, в більшості випадків, не призводить до в'янення флодоовочевої продукції.

Необхідно стежити, щоб температура охолодження овочів, фруктів і ягід не опускалася нижче температури криоскопічної.

Вакуумні кулери коштують дорого, і їх експлуатують, як правило, тільки для великих об'ємів флодоовочевої продукції.

Найбільш придатними для вакуумного охолодження - це листові агрокультури, такі як шпинат, салат-латук, капуста та ін.