

УДК 641.437.075.8

## ТЕПЛООБМІН ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ТА ЗАМОРОЖУВАННІ ОБ'ЄКТІВЗ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Ялпачик В.Ф., д.т.н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. (0619) 42-13-06

**Анотація**– наведені співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при зовнішньому обтіканні об'єктів плодоовочевої сировини можуть бути застосовані для усіх об'єктів заморожування, причому ці розрахунки треба виконувати в режимі «прогноз-корекція».

**Ключові слова**–коефіцієнт тепловіддачі, тепловий потік, теплообмін, процес заморожування, вільна конвекція, температура повітря, швидкість руху.

*Постановка проблеми.* Охолодження, заморожування та розморожування найдоцільніше проводити в потоці повітря, що виступає в ролі або холодоносія, або теплоносія. Це найкраще аргументується не тільки з технологічних, енергетичних, а й мікробіологічних та екологічних міркувань. Відповідно, ця технологія холодильної обробки харчової сировини достатньо забезпечена технічними засобами багатьох фірм-виробників – компресорно-конденсаторними агрегатами, вентиляторами, повітроохолоджувачами, конвеєрними лініями та швидкоморозильними апаратами на їх основі.

*Аналіз останніх досліджень.* Відносно специфіки та значень коефіцієнтів тепловіддачі, накопичено велику кількість як експериментальних, так і статистичних, узагальнюючих даних [1-11]. Якщо не розвивати тезу про «нефізичність» поняття коефіцієнту тепловіддачі, то для задач даної роботи необхідно вибрати відомі емпіричні співвідношення з розрахунку безрозмірного числа Нусельта  $Nu$ , які достатньо точно узагальнюють експериментальні дані різних авторів та аргументовано можуть бути застосовані для об'єктів заморожування.

В цьому плані необхідно звернути увагу на різноманітність рекомендацій авторів розрахункових співвідношень з вибору величини характерного розміру  $\delta$  об'єкту охолодження чи нагрівання для розрахунку чисел  $Re$ ,  $Nu$  та інших. В публікаціях німецької школи В. Гнєлінського [3] проведена робота з обробки великого масиву експериме-

нтальних даних різних авторів для тіл різної геометричної форми по коефіцієнту тепловіддачі при їх зовнішньому обтіканні потоком газу або рідини. При цьому ця обробка експериментальних даних для тіл різної геометричної форми проведена з вибором єдиної для усіх тіл (для розрахунку чисел  $Re$ ,  $Nu$ ) характерної довжини  $\delta$ , як довжини обтікання. Вона визначається, як відношення загальної площі поверхні тіла до максимального периметру в площині, перпендикулярній до омиваючого потоку газу чи рідини. В основу розрахункових співвідношень покладено напівемпіричні формули для коефіцієнтів тепловіддачі при натіканні потоку на плоску пластину:

$$Nu_{\delta} = Nu_{min} + \sqrt{Nu_{\delta,lam}^2 + Nu_{\delta,turb}^2} \quad (1)$$

$$Nu_{\delta,lam} = 0,664 \sqrt{Re_{\delta}} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (2)$$

$$Nu_{\delta,turb} = \frac{0,037 \cdot Re_{\delta}^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_{\delta}^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3)$$

Тут  $Nu_{\delta,lam}$ ,  $Nu_{\delta,turb}$  - відповідно числа Нусельта для ламінарного та турбулентного пограничного прошарку газу чи рідини;  $Re_{\delta}$  - число Рейнольдса для потоку газу чи рідини;  $Pr$  - число Прандтля при температурі газу чи рідини. Індекс  $\delta$  в формулах (1 - 3) підкреслює значення характерного розміру при розрахунках чисел  $Re$ ,  $Nu$ , як довжини обтікання.

Напрямок теплового потоку (охолодження або нагрівання тіла) дещо впливає на значення числа  $Nu_{\delta}$ , що можна врахувати поправочним коефіцієнтом  $K = (T_C/T_S)^{0,12}$ . Але абсолютні значення температур охолоджуючого повітря  $T_C$  та поверхні об'єкту заморожування  $T_S$  відрізняються настільки, що цей коефіцієнт близький до одиниці, і відповідні поправки лежать (ще і завдяки значенню 0,12 показника степеню) в границях похибки розрахованих чисел Нусельта. Зокрема, більш важливо аргументовано вибрати значення  $Nu_{min}$ , яке визначає граничні значення  $Nu_{\delta}$  при малих числах Рейнольдса  $Re \rightarrow 0$ . Для сфери і в разі досліджуваних об'єктів заморожування доцільно вибрати  $Nu_{min} = 2$ .

Ще більш важливо при розрахунках коефіцієнтів тепловіддачі врахувати теплообмін випромінюванням між поверхнею об'єктів охолодження або заморожування та поверхнею обгороджуваних, найчастіше металічних, конструкцій камер заморожування чи швидкоморозильних апаратів. При цьому можливо припустити, що температура поверхні обгороджуваних конструкцій співпадає з температурою охолоджуючого повітря  $T_C$ , а степені чорноти обгороджуваних конструкцій та об'єктів охолодження або заморожування дорівнюють одиниці. Тоді значення ефективного коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_{iRR}$  за рахунок випромінювання можна розрахувати за формулою:

$$\alpha_{iRR} = \frac{\sigma \cdot [T_S^4(\tau) - T_C^4(\tau)]}{T_S(\tau) - T_C(\tau)}, \quad (4)$$

де  $\sigma$  є постійною Стефана – Больцмана; підкреслено, що температури  $T_S(\tau)$  поверхні об'єкту охолодження або заморожування та  $T_C(\tau)$  охолоджуючого повітря є величинами, змінними в часі.

Якщо за формулами (1 - 3) розрахувати значення коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_{conv}(\tau) = Nu_\delta \cdot \lambda_{AIR} / \delta$ , що відповідає конвективному механізму теплообміну (де  $\lambda_{AIR}(T_C)$  – теплопровідність повітря), то приведений (ефективний) коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha(\tau)$  буде дорівнювати:

$$\alpha(\tau) = \alpha_{conv}(\tau) + \alpha_{iRR}(\tau). \quad (5)$$

Відмітимо, що поправка  $\alpha_{iRR}$  є суттєвою величиною, вона протягом значної частини тривалості всього процесу заморожування сягає 30–40% від значення  $\alpha(\tau)$ . До значення ефективного коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha(\tau)$  необхідно додати поправку, яка має враховувати теплообмін за рахунок випаровування вологи з поверхні об'єктів охолодження або заморожування, який залежить від температури та відносної вологості охолоджуючого повітря, проникливості для водяної пари шкірки плодів та овочів, температури поверхні плодів та овочів або ж об'єктів заморожування з них, теплового потоку з поверхні та інших факторів. Розрахунок цієї складової з необхідною точністю можливий, але вона становить всього 2...3 % від значення  $\alpha(\tau)$  за формулою (5).

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* При розрахунках теплообміну в процесах заморожування одиноких об'єктів доцільно обмежитись значеннями коефіцієнтів тепловіддачі за формулою (5). Необхідність при розрахунках за формулами (4,5) знання температури поверхні  $T_S(\tau)$  об'єктів охолодження або заморожування означає, що такі розрахунки можуть проводитися в рамках розглянутого вище алгоритму «прогноз – корекція».

*Основна частина.* Процес охолодження та заморожування плодоовочевої сировини може здійснюватись в промислових камерах, які оснащені батарейними системами охолодження повітря, або камерах зберігання замороженої харчової продукції з малою питомою поверхнею повітроохолоджувачів. В таких камерах суттєве значення має радіаційний теплообмін, а конвективний відбувається як вільна конвекція. Швидкості руху охолоджуючого повітря при цьому визначаються різницею температур  $T_S(\tau)$  та  $T_C(\tau)$ , а точніше, відповідним градієнтом густини охолоджуючого повітря.

Відносно поверхні об'єктів охолодження або заморожування швидкості руху повітря складають близько 0,1...0,2 м/с, їх значення та напрям змінюються в часі. На інтенсивність теплообміну за механізмом вільної конвекції впливає процес випаровування води з поверхні

плодів та овочів, наявність магнітних чи електростатичних полів тощо.

Теоретичні результати щодо інтенсивності такого теплообміну достатньо розроблені, але в практичному плані, зокрема, для задач даної роботи, інформаційна база суттєво бідна. В теорії пограничного прошарку вільна конвекція біля тіл з мінливим контуром є однією з найскладніших задач.

Експериментальні результати для теплообміну за механізмом вільної конвекції менш точні, ніж для вимушеної конвекції за причини меншої точності вимірювань при малих інтенсивностях теплообміну та малих швидкостях руху охолоджуючого середовища.

В принципі, для достатньо точних оцінок значень конвективного члена в (5) можна користуватись формулами (1 - 3) при малих значеннях  $Re$  або швидкості руху охолоджуючого повітря. З іншого боку, якщо в рамках алгоритму «прогноз–корекція» проводити уточнюючу оцінку значення температури охолоджуючого повітря після теплообміну з поверхнею об'єкту холодильної обробки, то оцінку усереднених значень коефіцієнту тепловіддачі можна [3] провести за формулою:

$$Nu_{\delta} = 0,5 \cdot Ra^{0,25}, \quad (6)$$

де  $Ra = Gr \cdot Pr = g \cdot \rho^2 \cdot C_p \cdot \zeta \cdot (T_s(\tau) - T_c(\tau))$  - число Релея;

$g$  - прискорення вільного падіння;

$\rho = \rho(T_c) / (1 + \zeta \cdot (T_s(\tau) - T_c(\tau)))$  - відносна зміна густини повітря;

$C_p$  - ізобарна теплоємність повітря при температурі  $T_s(\tau)$ ;

$\zeta$  - температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря.

Формула (6) забезпечує обґрунтоване зменшення конвективного внеску в загальний теплообмін (5), по мірі того, як температура поверхні об'єкту холодильної обробки наближається до температури охолоджуючого повітря.

Також для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі за умов вільної конвекції біля окремих тіл (якщо вони за геометрією близькі до сферичних) можна скористатись формулою:

$$Nu = \pi + \left( \frac{Ra \cdot f(Pr)}{5} \right)^{1/4}. \quad (7)$$

При цьому характерним розміром об'єкту охолодження також є довжина обтікання, а функція  $f(Pr)$  числа Прандтля визначається за формулою:

$$f(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,5}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}.$$

Наведені вище співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при зовнішньому обтіканні об'єктів плодоовочевої сирови-

ни можуть бути застосовані для усіх об'єктів заморожування в даній роботі, крім грон винограду та окремих зерен кукурудзи молочної стиглості.

Грона винограду, викладені на сітчастому конвеєрі швидкоомрозильного апарату в 1-3 шари, представляють собою «густий прошарок», «нерухомий шар», як систему із специфічно упакованих ягід – куль, який продувається охолоджуючим повітрям. При цьому охолоджуюче повітря рухається знизу догори впродовж повітряних звивистих каналів між окремими ягодами – кулями. Однією з задач тут зразу ж виступає задача визначення аеродинамічного опору «густого прошарку» та підбору відповідного обладнання у системі з повітророзподільовача, теплообмінника - повітроохолоджувача та вентилятора, що забезпечить рух охолоджуючого повітря через конкретний «густий прошарок» з необхідними значеннями швидкості руху  $v_c(\tau)$  та температури  $T_c(\tau)$  перед входом в прошарок.

«Нерухомі шари», як просторова упаковка тіл тієї чи іншої геометрії, характеризуються величинами питомої внутрішньої поверхні  $A_{вн}$  та пористості  $\varepsilon$ . Остання визначається як відношення значення вільного об'єму шару до значення повного об'єму шару. Розглядаючи питому площу поверхні  $A$  окремої частинки (ягоди) шару, отримаємо  $A_{вн} = A(1-\varepsilon)$ . Для сфер з діаметром  $d$ , якими можна моделювати ягоди ряду сортів винограду,  $A = 6/d$ . В разі тіл, що дещо відхиляються за геометричною формою від сфери, значенням  $d$  вважають еквівалентний діаметр тіла.

При інтерпретації та обробці експериментальних даних за емпіричними формулами, найчастіше висуваються такі дві гіпотези:

а) «нерухомий шар» складається із великої множини звивистих каналів змінного перерізу;

б) «нерухомий шар» складається із великої множини частинок, що знаходяться в потоці газу чи рідини, і на кожній з цих частинок формується свій власний пограничний шар газу чи рідини (з відповідним коефіцієнтом тепловіддачі).

Виходячи з необхідності розв'язку задачі організації руху охолоджуючого повітря через «нерухомий шар» із грон винограду або зерен кукурудзи, треба вибрати формули для розрахунку величини втрат напору  $\Delta P$  потоком повітря, якщо «нерухомий шар» має висоту  $H$ . Теоретичні дослідження та статистична обробка різними авторами експериментальних даних для «нерухомого шару» зі сфер [4] привела до співвідношення:

$$\frac{\Delta P}{L} = f \cdot \frac{\mu \cdot u \cdot (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \cdot \varepsilon^2}; \quad f = m + n \cdot \frac{Re}{1 - \varepsilon}, \quad (8)$$

яке справедливе в достатньо широкому діапазоні чисел Рейнольдса від 0,1 до 10000. При цьому  $Re = \rho_{нов} \cdot u \cdot d / \mu$ , де  $\rho_{нов}$  - густина,  $u$  - швидкість

руху в звивистих каналах «нерухомого шару»,  $\mu$  - динамічна в'язкість охолоджуючого повітря.

Емпіричні коефіцієнти при упакуванні «нерухомого шару» сферами діаметром  $d \ll L$  (в 10 разів) та з великим горизонтальним розміром (віддаленість стінок) мають значення  $m = 180$ ;  $n = 1,8$ . В разі суттєвої шершавості сфер рекомендується значення  $n = 1,4$ . Рівняння (8) враховує втрати напору як за рахунок в'язкого тертя, так і втрат кінетичної енергії (опір форми). Оскільки в «нерухомому шарі» окремі ягоди винограду чи кукурудзи екранують одна одну від теплообміну радіацією, то будемо вважати, що її внеском в загальне значення коефіцієнту тепловіддачі можна знехтувати. Аналогічно знехтуємо внеском за рахунок контактного теплообміну ягід з конструкційним матеріалом транспортної сітки, якщо площа контакту відносно мала.

За другою з вище наведених гіпотез витікає, що середні числа Нусельта при проходженні охолоджуючого повітря через «нерухомий шар» з довільною пористістю визначаються формулами, що характерні для одиноких тіл, з поправкою на контактний теплообмін між цими тілами (сферами):

$$Nu = f \cdot Nu_{сфера}; f = 1 + 1,5(1 - \varepsilon), \quad (9)$$

де  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$ ,  $Re_\varepsilon = u \cdot d / (\nu \cdot \varepsilon)$ ;  $Nu_{сфера}$  розраховується за формулами (1 - 3) або (6, 7); визначальною температурою в (9) є середнє значення

$$T_m = \frac{T_{вхид} + T_{вихид}}{2} \quad (10)$$

температур повітря на виході та вході у «нерухомий шар», а питомиє значення теплового потоку розраховується, як добуток  $\alpha$  на середньо-логіарифмічне значення температурного напору.

Нарешті, звернемо увагу на можливість заморожування зерен кукурудзи молочної стиглості у псевдозрідженому стані (шарі).

Псевдозріджений шар висотою  $H$  та пористістю  $\varepsilon$  одержують за допомогою потоку повітря, що за рахунок аеродинамічних сил «підіймає» нерухомий шар частинок відповідно висотою  $H_0$  та пористістю  $\varepsilon_0$ . При цьому баланс маси твердих частинок

$$H \cdot (1 - \varepsilon) = H_0 \cdot (1 - \varepsilon_0). \quad (11)$$

При великих значеннях пористості ( $\varepsilon_0 > 0,48$ ) початкового нерухомого шару рекомендується розрахункова формула:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{710 + 4\sqrt{Ar}}, \quad (12)$$

де  $Ar$  – число Архимеда.

При швидкості руху зріджуючого повітря, більшій за  $u_{кр}$  і при якій можливе унесення твердої частинки за межі псевдозрідженого шару, слід використовувати співвідношення:

$$Re_t \cong \sqrt{\frac{4}{3}} Ar \quad (13)$$

В границях між  $Re_{кр}$  та  $Re_t$  псевдозріджений шар характеризується, як правило, такими значеннями пористості, що теплообмін між зріджуючим повітрям та твердими частинками наближається до теплообміну між повітрям та окремими частинками [3]. Тому відповідні значення коефіцієнтів конвективної тепловіддачі можливо розраховувати за формулами (9, 1-3), враховуючи зміну характерних розмірів при обчисленнях чисел  $Re$  та  $Nu$ .

Коефіцієнт тепловіддачі при зовнішньому омиванні об'єктів потоком пари азоту може бути розрахованим за вище наведеними співвідношеннями для випадків примусової чи вільної конвекції пари. Але випадок теплообміну при кипінні азоту на поверхні зануреного в нього об'єкту (плодів, овочів) вимагає вибору формул та методів розрахунку, що не розглянуті вище. При зануренні плодів та овочів у рідкий азот буде мати місце велике початкове значення перепаду температур між поверхнею об'єктів та нормальною температурою кипіння рідкого азоту. Тому що температура поверхні вельми швидко зменшиться, сам перепад наблизиться до нуля, відповідний теплообмін і сама температура поверхні об'єкту будуть змінюватися в часі залежно від змінних значень теплового навантаження та тиску рідини. Таке кипіння називають кипінням з недонагріванням, кипінням у великому об'ємі при вільній конвекції пазирів парової фази (в середньому за процес).

Найбільш прийнятною розрахунковою моделлю [3] є формула для розрахунку значень коефіцієнту тепловіддачі

$$\alpha = A \cdot q^{0,7} \cdot F(p^*), \quad (14)$$

де постійна  $A = 0,10111 \cdot p_{cr}^{0,69}$ ;

$p_{cr}$  - критичний тиск фазової рівноваги рідина – пара (для азоту  $p_{cr} = 3,4$  МПа, відповідно  $A = 1,1512$ );

$F(p^*)$  є функцією приведенного тиску кипіння рідини  $p^* = p/p_{cr}$  і розраховується за формулою (в умовах вільної конвекції)

$$F(p^*) = 1,8 \cdot (p^*)^{0,17}.$$

При значенні тиску кипіння азоту  $p = 0,1013$  МПа маємо  $p^* = 0,02984$ ;  $F(p^*) = 0,99079$ . Тоді, для умов кипіння азоту при заморожуванні плодів та овочів в наших експериментальних дослідженнях, маємо за формулою (14)

$$\alpha = 1,1406 \cdot q^{0,7}, \quad (15)$$

де значення  $q$  задаються в Вт/м<sup>2</sup>, а результат має розмірність Вт/(м<sup>2</sup>·К).

*Висновки.* Наближену величину  $q$  теплового потоку на поверхні об'єкту заморожування можна розрахувати за формулою односторонньої

похідної температури по координаті через значення температур в трьох вузлах температурного поля. Ці розрахунки треба проводити, як і розраховувати самі температурні поля, в режимі «прогноз – корекція».

Література:

1. *Войтко В. А.* Гидродинамика при замораживании плодов и овощей в псевдосжиженном и плотных слоях / *В. А. Войтко, С. И. Глебов, Л. А. Горбунов* // Тр. ин-та МолдНИИПП / МолдНИИПП. – 1970. – № 9. – С. 41–48.
2. *Рогов И.А.* Консервирование пищевых продуктов холодом (теплофизические основы) / *И. А. Рогов* [и др.]. – М.: Колос, 1999. – 176 с.
3. Справочник по теплообменникам. В 2 томах. Т.1: пер. с англ. / под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 560 с.
4. Тепло- и массообмен, теплотехнический эксперимент : справочник / под ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.
5. *Фролов С.В.* Тепло-массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов / *С. В. Фролов, В. Е. Куцакова, В. Л. Кипнис.* – М.: Колос-пресс, 2001. – 143 с.
6. *Чумак И.Г.* Холодильные установки. Проектирование : учебное пособие / *И.Г. Чумак* [и др.]; под ред. И.Г. Чумака. –3–е изд., перераб. и доп.- Одесса: Друк, 2007.- 480 с.
7. *Чижев Г.Б.* Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов / *Г. Б. Чижев.* – М.: Пищепромиздат, 1979. – 272 с.
8. *Чумак И.Г.* Контактное замораживание растительных продуктов в рассоле / *И. Г. Чумак, Л. Д. Гольберг, А. А. Чуркин.* – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 29 с.
9. *Awonorin S. O.* Analysis of the heat transfer coefficient for liquid nitrogen droplets in cryogenic freezing of foods / *S. O. Awonorin* // Int. J. Refrig. – 1993.- Vol. 16, № 2. – P. 143–151.
10. *Levy F.L.* Measuring the convective heat transfer coefficient while chilling carcasses / *F.L. Levy* // Int. J. Refrig. - 1986. - Vol. 9, No. 2. - P. 84-88.
11. 2002 ASHRAE Refrigeration Handbook (Si). Fundamentals. – Atlanta : ASHRAE, 2002 // Chapter 8. Thermal Properties of Foods. - P. 8.1-8.30; Chapter 9. Cooling and Freezing Times of Foods. - P. 9.1-9.15.

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И ЗАМОРАЖИВАНИИ  
ОБЪЕКТОВ ИЗ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ В  
ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Ялпачик В.Ф.

*Аннотация*—приведенные соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи при внешнем обтекании объектов плодово-овощного сырья могут быть использованы для всех объектов замораживания, причём эти расчеты нужно выполнять в режиме «прогноз-коррекция».

**HEAT TRANSFER DURING INDUSTRIAL COOLING AND  
FREEZING OF OBJECTS MADE OF FRUIT AND VEGETABLE  
RAW MATERIALS**

V. Yalparchyk

*Summary*

Presented correlations for calculating heat transfer coefficients at the external flow around objects of fruit and vegetable raw materials can be applied to all frozen items. These calculations should be done in the "prediction-correction" mode.