

УДК 621.565

DOI: 10.31388/2078-0877-19-2-94-102

КАСКАДНИЙ МОРОЗИЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ

Стручаєв М. І., к. т. н.,

Олексієнко В. О., к. т. н.,

Петриченко С. В., к. т. н.,

Верхоланцева В. О., к. т. н.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Тел. (0619) 42-13-06

Анотація – стаття присвячена технології виробництва заморожених продуктів та наведено запропонований нами каскадний морозильний пристрій, як варіант удосконалення холодильного технологічного устаткування для заморожування дрібноштучних продуктів у щільному зваженому шарі з використанням швидкого заморожування і подальшого тривалого низькотемпературного зберігання фруктової та овочевої продукції.

Ключові слова – каскадний морозильний пристрій, холодильне технологічне устаткування, заморожування дрібноштучних продуктів у щільному зваженому шарі, швидке заморожування, фруктова та овочева продукції.

Постановка проблеми. В умовах економії енергоресурсів та підвищення екологічної безпеки, вирощена сезонно у відкритому ґрунті, плодоовочева продукція стає головним джерелом поживних речовин та вітамінів. Тривале зберігання плодоовочевої продукції в даний час є досить актуальною проблемою. Заморожування – один з ефективних способів продовження термінів використання плодів і овочів після періоду збирання, технологічні режими та умови якого постійно удосконалюються [1, 2, 3]. Один з прогресивних способів – це удосконалення технології швидкісного охолодження. Ефективним способом є заморожування дрібноштучних продуктів у щільному зваженому шарі з використанням швидкого заморожування. Цей спосіб дозволяє максимально прискорити процес у поєднанні з підвищеною простотою санітарно-гігієнічної обробки обладнання. [4, 5, 6].

Аналіз останніх досліджень. Значну увагу в дослідженнях приділено теплофізичним аспектам заморожування плодоовочевої продукції. Визначені коефіцієнти теплопровідності різних плодів при заморожуванні. Отримані емпіричні залежності для визначення

кількості теплоти при заморожуванні і розморожуванні та інші теплофізичні розрахунки [7, 8, 9]. Значний інтерес представляють роботи, присвячені вивченню питань запобігання змерзання шару плодів та ягід шляхом їх попереднього підморожування в шарі або з використанням флюїдизаційних пристроїв [10, 11]. Результати аналітичних та експериментальних досліджень представлені в роботах вітчизняних та зарубіжних авторів [12, 13, 14, 15, 16]. Проте, треба відзначити, що порівняльним дослідженням енерговитрат при використанні флюїдизаційних пристроїв та механічних або семіфлюїдизаційних швидко морозильних пристроїв приділено незначну увагу.

При флюїдизаційному заморожуванні змерзання плодів запобігають потоком холодного повітря, в той час, як в механічних або семіфлюїдизаційних швидко морозильних пристроях плоди постійно переміщують за рахунок коливань робочої поверхні транспортера [17, 18].

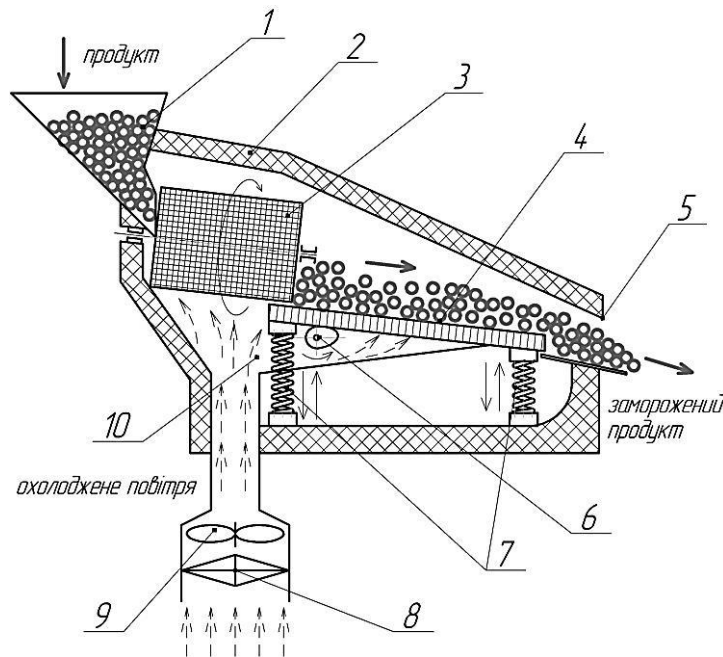
Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз процесу флюїдизаційного та семіфлюїдизаційного заморожування дрібноштучних продуктів у щільному зваженому з використанням швидкого заморожування і тривалого низькотемпературного зберігання фруктів та овочевої продукції.

Задачі статті: порівняти запропонований нами каскадний морозильний пристрій з існуючими флюїдизаційними пристроями. При цьому необхідно спростити конструкцію, зменшити енерговитрати, покращити стійкість зваженого шару продукту, який заморожується, підвищити інтенсивність теплообміну у псевдозрідженому шарі та продуктивність процесу заморожування в цілому.

Основна частина. Запропонований нами каскадний морозильний пристрій містить завантажувальний вузол, теплоізольовану камеру для заморожування продуктів з сітчастим транспортуючим засобом, з'єднану з випарником холодильного агрегату через канали розподілення низькотемпературного повітря, вентилятор, вивантажувальне вікно, перед сітчастим транспортуючим засобом похило встановлено сітчастий порожнистий обертовий барабан, а сітчастий транспортуючий засіб виконано у вигляді вібротранспортера з ексцентриковим механізмом та пружинами (рис. 1).

Застосування каскадного морозильного пристрою запропонованої конструкції полягає в наступному. В цеху заморожування продукції монтується теплоізольована камера 2, на вході в камеру встановлюють завантажувальний вузол 1, в камері 2 похило встановлюють сітчастий порожнистий обертовий барабан 3, сітчастий транспортуючий засіб 4 з ексцентриковим механізмом 6, пружини 7, а на виході з камери 2 вивантажувальне вікно 5. Камеру 2

з'єднують з випарником 8 холодильного агрегату з каналами 10 розподілення низькотемпературного повітря та вентилятором 9 для подачі в камеру 2 низькотемпературного повітря.



1 – завантажувальний вузол; 2 – теплоізольована камера; 3 – барабан обертовий, сітчастий порожнистий, встановлений похило; 4 – сітчастий транспортуючий засіб, 5 – вивантажувальне вікно, 6 – ексцентриковий механізм, 7 – пружини, 8 – випарник холодильного агрегату, 9 – вентилятор, 10 – канали розподілення низькотемпературного повітря.

Рис. 1. Функціональна схема каскадного морозильного пристрою.

Продукт, який підлягає заморожуванню, безперервно подають завантажувальним вузлом 1 у сітчастий порожнистий обертовий барабан 3, одночасно включають вентилятор 9. Починається обертовий рух та вільне падіння продукту і енергійний теплообмін з низькотемпературним повітрям, що призводить до підмерзання зовнішнього шару. Далі продукт зсипається на сітчастий транспортуючий засіб 4, де під дією ексцентрикового механізму 6 та пружин 7 починається його вертикальне і горизонтальне переміщення та формується псевдозріджений шар. Вентилятор 9 через випарник 8 холодильного агрегату з каналами 10 повітрярозподілення подає охоложене низькотемпературне повітря в камеру 2. Потік повітря проходить через сітчастий транспортуючий засіб 4 і остаточне заморожування продукту безперервно відбувається в псевдозрідженому шарі. З сітчастого транспортуючого засобу 4 продукт зсипається через вивантажувальне вікно 5, звідки подається у пакувальну машину (не показано).

Визначимо витрати енергії на псевдозрідження та на механічне підкидання:

$$E_{n.zp} = V \cdot \Delta P \cdot F, \quad (1)$$

де $E_{n.zp}$ – витрати енергії на псевдозрідження, Вт;

V – швидкість повітря, м/с,

ΔP – перепад тиску при просуванні повітря через шар плодів, Па;

F – площа поперечного перетину, м².

Перепад тиску в шарі:

$$\Delta P = (\rho_{пл} - \rho_{нов}) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot H, \quad (2)$$

де $\rho_{пл}$ – густина шару плодів, кг/м³;

$\rho_{нов}$ – густина повітря, кг/м³;

ε – порозність псевдозрідженого шару.

H – висота шару, м.

Перепад тиску в шарі по рівнянню Ергана:

$$\Delta P = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot V}{d_a^2} \cdot H + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} \cdot \frac{\rho_i \cdot V^2}{d_a} \cdot H, \quad (3)$$

де μ – в'язкість рідини або газоподібної фази, Па·с;

d_e – еквівалентний діаметр плоду, м;

ρ – густина плоду, кг/м³.

Критеріальна залежність О. М. Годеса:

$$Re = \frac{Ay}{1400 + 5.22\sqrt{Ar}}, \quad (4)$$

$$Ar = g \frac{d_e^3 \cdot (\rho_n - \rho_e)}{v^2 \cdot \rho_e}, \quad (5)$$

де v – кінематична в'язкість повітря, Па·с;

ρ – густина повітря, кг/м³;

Ar – критерій Архимеда.

Швидкість повітря на початку псевдо зрідження, м/с:

$$V_0 = \frac{Re \cdot \mu}{d_e \cdot \rho_e}. \quad (6)$$

Робоча швидкість повітря, м/с:

$$V = 2 \cdot V_0, \quad (7)$$

Визначимо витрати енергії на механічне підкидання

$E_{м.п\delta}$ – витрати енергії на механічне підкидання сітчастим транспортуючим засобом визначаємо за формулою:

$$E_{м.п\delta} = \frac{4 \cdot (M_{с.мп} + M_{пл}) \cdot \pi^2 \cdot n^3 \cdot A^2}{10,2 \cdot g}, \quad (8)$$

де $E_{м.п\delta}$ – витрати енергії на механічне підкидання сітчастим транспортуючим засобом, Вт;

$M_{с.мп}$ – маса сітчастого транспортуючого засобу, кг;

$M_{пл}$ – маса плодів, які заморожують, кг;

n – частота коливань, 1/с;

A – амплітуда коливань, м.

Масу сітчастого транспортуючого засобу $M_{с.мп}$, кг, визначаємо по формулі:

$$M_{с.мп} = 10 \cdot m_c \cdot z_{к.с.}, \quad (9)$$

де m_c – маса однієї сітки, кг;

$z_{к.с.}$ – кількість сіток у сітчастому транспортуючому засобі, шт.

Масу плодів, які заморожують, кг, визначаємо по формулі:

$$M_{пл} = \rho_{пл} \cdot W, \quad (10)$$

де ρ – густина плоду, кг/м³.

Частоту коливань сітчастого транспортуючого засобу n , 1/с, визначаємо по формулі:

$$n = \frac{1}{20} \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot j_0}{A}}, \quad (11)$$

де j_0 – оптимальне прискорення сітчастого транспортуючого засобу, м/с²;

A – амплітуда коливань, м.

Амплітуда коливань сітчастого транспортуючого засобу A , м, визначається по формулі

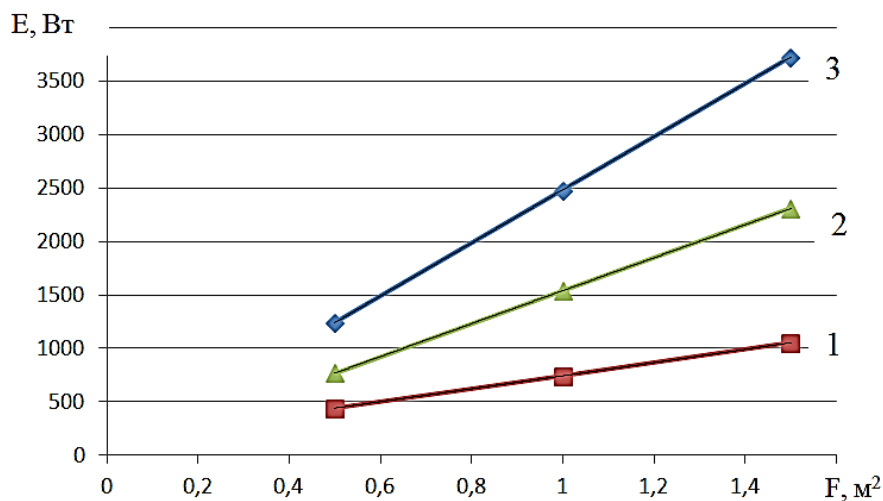
$$A = e \cdot k, \quad (12)$$

де e – ексцентриситет, м ($e = (5...10) \cdot 10^{-3}$ м);

k – коефіцієнт, що враховує коливання рами машини, що залежить від оптимального прискорення решета.

Для прикладу виконаємо розрахунки енерговитрат на створення псевдозрідженого шару та на механічне підкидання при заморожування ягід малини. Приймаємо швидкість повітря $V = d^{1/2} = 2,7 \dots 3,9$ м/с, перепад тиску при просуванні повітря через шар плодів $\Delta P = 919$ Па, площа поперечного перетину $F = a \cdot b = 1 \cdot 0,5 = 0,5$ м²; густина шару плодів $\rho = 580$ кг/м³; порозність псевдозрідженого шару $\varepsilon = 0,4 \dots 0,55$; густина повітря $\rho_{нов} = 1,42$ кг/м³ (при -25 °С); висота шару $H = 0,1 - 0,27$ м.

З графіку (рис. 2) видно, що енерговитрати на створення псевдозрідженого шару в порівнянні з механічним підкиданням при заморожування ягід малини в 1,5...3,5 рази більші.



1 – механічне підкидання, 2 – псевдозріджений шар при $V = 2,7$ м/с, 3 – псевдозріджений шар при $V = 3,9$ м/с.

Рис. 2. Графік залежності енерговитрат від площі поперечного перетину на створення псевдозрідженого шару та на механічне підкидання при заморожування ягід малини.

Висновки. Застосування каскадного морозильного пристрою запропонованої конструкції за рахунок встановлення сітчастого порожнистого обертового барабану та виконання сітчастого транспортуючого засобу у вигляді вібротранспортера з ексцентриковим механізмом та пружинами, дозволяє спростити конструкцію, зменшити енерговитрати в 1,5...3,5 рази, покращити стійкість зваженого шару продукту, який заморожується, підвищити інтенсивність теплообміну у псевдозрідженому шарі та продуктивність процесу заморожування в цілому.

Методика критеріїв визначення енерговитрат та головних конструктивних параметрів каскадного морозильного пристрою може бути використана при проектуванні холодильного обладнання, а запропонована конструкція може бути застосована у виробництві.

Література:

1. The Research of Heat Transfer Process During Freezing of Berries / *I. A. Skrupskis, U. Gross, M. Rucins, A. Aboltins* // *Foodbalt-Proceedings-2008*. P. 79-83.
2. *Стручаєв М. І., Загорко Н. П., Тарасенко В. Г.* Формування заморожених соків // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2018. Вип. 18, т. 1. С. 246-252.*
3. Heat-Mass Transfer in Layer of Berries During Freezing Process. Refrigeration for Sustainable Development / *A. Aboltins, S. Boca, R. Galoburda, U. Gross, I. Skrupskis*. Book of Abstracts, Czech Republic, Prague, 2011. 342 p.
4. Пристрій для зберігання охолоджених продуктів: пат. 129068 Україна: МПК (2006.01) F25D 13/00, A01F 25/00. № у 2018 02457; заявл. 12.03.2018; опубл. 25.10.2018. Бюл. № 20.
5. Пристрій для виробництва аерованих заморожених продуктів: пат. 129278 Україна: МПК (2006.01) F25D 3/12 (2006.01), A23G 9/46(2006.01), A23G 9/26 (2006.01). № у 2018 04708; заявл. 27.04.2018; опубл. 25.10.2018. Бюл. № 20.
6. Пристрій для визначення криоскопічної температури харчових продуктів: пат. 129352 Україна: МПК G01N 33/02 (2006.01), G01K 7/02(2006.01). № у 2018 05100; заявл. 08.05.2018; опубл. 25.10.2018. Бюл. № 20.
7. *Ялчак В. Ф., Стручаєв М. І., Тарасенко В. Г.* Експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності при заморожуванні // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2017. Вип. 17, т. 1. С. 113-118.*
8. *Стручаєв Н. И.* Определение количества теплоты при замораживании и размораживании // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Вип. 165, т. 2. Харків, 2015. С. 130-131.*
9. *Ялчак В. Ф., Ялчак Ф. Е., Стручаєв Н. И.* Теплофизические расчеты при замораживании и дефростации плодоовощной продукции // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2013. Вип. 13, т. 1. С. 196-204.*
10. Флюїдизаційний пристрій: пат. 131546 Україна: МПК F25D 13/06 (2006.01). № у 2018 06110; заявл. 01.06.2018; опубл. 25.01.2019. Бюл. № 2.
11. *Ялчак В., Стручаєв Н., Тарасенко В.* Обоснование толщины подмороженного слоя кусочков кабачков и тыквы в процессе подготовки к длительному хранению в замороженном виде // *MOTROL. 2008. Т. 10 А. С. 187-190.*
12. *Дідур В. А., Стручаєв М. І.* Теплотехніка, теплопостачання

і використання теплоти в сільському господарстві : навч. посібник. Київ : Аграрна освіта, 2008. 233 с.

13. Стручаєв М. І., Постол Ю. О. Підвищення енергоефективності охолоджувача молока // Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь, 2017. Вип. 7, т. 1. С. 243-247.

14. Ялпачик В. Ф., Стручаєв М. І., Верхованцева В. О. Планування експериментальних досліджень процесу охолодження зерна // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2015. Вип. 15, т. 1: Технічні науки. С. 3-8.

15. Temperature dynamics during thawing of raspberry layer / U. Iljins, S. Kampuse, A. Aboltins, I. Skrupskis // Third Nordic-Baltic agrometrics conference. Latvia, 2001. P. 70-75.

16. Heat Transfer Process Investigation in Frozen Berries with Changing Storage Temperature / S. Boca, A. Aboltins, I. Skrupskis, U. Gross, R. Ziedins // Journal of Agricultural Engineering. 2010. Vol. XLVII. P. 3-8.

17. Cheung L., Nienow A.W., Rowe P. N. Minimum fluidization velocity of a binary mixture of different sized particles // Chemical Engineering Science. 1974. Vol. 29, № 5. P. 1301 – 1303.

18. Predicting the Minimum Fluidization Velocity of Multicomponent Systems / J. Rincon, J. Guardiola, A. Romero, G. Ramos // Journal of Chemical Engineering of Japan. 1994. Vol. 27, № 2. P. 177 – 181.

КАСКАДНОЕ МОРОЗИЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Стручаев Н. И., Алексеенко В. А., Петриченко С. В.,
Верхованцева В. А.

Аннотация – статья посвящена технологии и оборудованию для производства замороженных фруктов. Предложена конструкция каскадного морозильного устройства, как вариант усовершенствования холодильного технологического оборудования для замораживания мелкоштучных продуктов в плотном взвешенном слое с использованием быстрого замораживания и дальнейшего длительного низкотемпературного хранения фруктовой и овощной продукции.

CASCADE FREEZER

N. Struchaev, V. Oleksiienko, S. Petrychenko, V. Verkholantseva

Summary

The article is devoted to the technology of frozen food production and presents the cascade freezer offered by us as an option for improving refrigeration equipment for freezing fine-grained products in a dense weighed layer using rapid freezing and subsequent long-term low-temperature storage of fruit and vegetable products. The purpose of this work is to analyze the process of fluidization and semifluidization freezing of fine-grained products.

The cascade freezer offered by us includes a download unit, a heat-insulated chamber for freezing products with a mesh conveyor, connected to the evaporator of the refrigeration unit through the low-temperature air distribution channels, the fan, the discharge window, a mesh hollow rotating drum sloping in front of the mesh conveyor. The transportation means is made in the form of a vibrotransporter with an eccentric mechanism and springs. The product to be frozen is continuously supplied by the boot knot to the mesh hollow rotary drum, simultaneously including the fan. A rotating motion and free fall of the product begins and a vigorous heat exchange with low-temperature air, which leads to the frosting of the outer layer. Then the product is poured onto the net vehicle where, under the action of the eccentric mechanism and the springs, its vertical and horizontal displacement begins and a fluidized bed is formed.

The use of a cascade freezer due to the installation of a mesh hollow rotating drum, and a mesh conveyor in the form of a vibrotransporter with eccentric mechanism and springs, simplifies the design, reduces energy costs, improves the stability of the suspended product layer that is frozen, increases the heat transfer rate in the fluidized bed and productivity of the freezing process as a whole. Energy costs for the creation of a fluidized bed in comparison with mechanical throwing at the freezing of raspberries in 1,5 ... 3,5 times bigger.