
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЗАМОРОЖУВАННЯ КУРЯЧИХ СУБПРОДУКТІВ

Мольський О. С., Потапов В. О.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-17>

ВСТУП

Споживання м'яса стабільно зростає протягом декількох останніх десятиліть. За оцінками FAO та OECD причинами цього є збільшення населення та середніх доходів, що дозволило перейти від вживання переважно зернових продуктів харчування до збільшення м'яса в раціоні. Збільшилось виробництво всіх видів м'ясного білка, хоча курятини було більш помітним.

Згідно зі статистичними даними Міністерства сільського господарства США, у 2017 році виробництво курятини в США досягло 18,596 млн тон, що становить 20,62% світового виробництва курятини, виробництво курятини в Китаї досягло 11,600 млн тон, що становить 12,86% світового виробництва курятини. Споживання курятини у 2017 році у США, Китаї та Бразилії становить 18,667 млн тон, 12,050 млн тон і 13,252 млн тон відповідно, що становить 18,81%, 12,15% і 13,36% від загального світового споживання курятини у світі. Тенденція споживання відносно дешевого курячого м'яса зберігається на протязі останнього часу і буде мати сталий попит у майбутньому.

Основним видом охолодженої та замороженої продукції, яку реалізують вітчизняні виробники курятини, є м'ясо куряче у вигляді філе або часток тушки, у якості інгредієнтів складних страв або порційних напівфабрикатів.

В той же час курячі лапки є дуже специфічним продуктом харчування, який не є дуже популярним в Європі і зокрема в Україні. В основному на європейські і вітчизняні виробники переробляють такі курячі субпродукти, як курячі серця, шлуночки, шкіру на м'ясу сировину чи жир, а курячі лапки видають на виробництво кормів або навіть утилізують. В окремих випадках його відносять до так званих боєнських відходів які підлягають утилізації в випарних котлах. Цей

процес досі затратний (до 0.5 МВт/т). Переробка цього субпродукту у комерційних цілях не розглядається.

В той же час у країнах Азії, зокрема у Китаї існує культура вживання курячих лапок і існує багато рецептів їх приготуванню, що робить його дуже привабливим ринком збуту цього непопулярного в Україні та Європі субпродукту¹.

Саме ці обставини обумовлюють актуальність даної теми. Для того щоб продукція не зіпсувалась при перевезенні, куряче м'ясо та субпродукти потрібно заморозити до температури -25.....-35 °С. Заморожування м'яса до такої низької температури дуже енергоємний процес, в якому треба враховувати не тільки витрати електроенергії, а також вплив тривалості заморожування та якість готової продукції, яка може погіршитися при неправильному виборі режимів заморожування.

Обґрунтування раціональних режимів заморожування курячих субпродуктів дозволить підвищити економічну доцільність виробництва та реалізації цієї продукції. Ретельний підбір обладнання та режимів його роботи дозволить забезпечити енергоефективне виробництво та якісний продукт який можна експортувати у інші країни світу за розумних витрат.

1. Аналіз ситуації

1.1. Споживання курячих лапок в країнах Азії та Китаю

Згідно опублікованих даних², виробництво курятини в Китаї склало у 2017 році 11,6 млн тон при споживанні 12,05 млн тон. Тобто річне виробництво і споживання на душу населення становило 8,35 кг і 8,67 кг відповідно. Це показує, що виробництво курятини серйозно недооцінює фактичне споживання курятини в Китаї. У Китаї загалом споживають від 68,7 мільярда до 70,9 мільярда курячих ніжок, крил і ніжок. Великий попит на лапки призводить до підвищення цін. Ціна за порцію в середньому становить 2,92 дол. США.

Дані ФАО показують, що в 2016 році Гонконг імпортував 710000 тон курятини. В 2011 році у Тайвані згідно даних TVBS з'їдають 440 мільйонів курячих лап на рік. За останні роки споживання курячих ніжок може досягати приблизно 1,4 мільярда, а кількість курячих крилець – приблизно 700 мільйонів. Тобто приблизно щороку Тайвань споживає щонайменше 600 мільйонів курячих ніжок, крил і ніжок.

¹ Осадчук В. Китайський ринок курятини: перспективи для українського виробника. Україна–Китай, N2(20) 2020, 32-39.

² National Chicken Culture Promotion Alliance. 33 billion! How much do Chinese people love to eat chicken feet, chicken wings, and chicken legs. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/73307694>

У Китаї існує десятки рецептів приготування курячих лапок. Вони можуть значно відрізнятись в залежності від регіону і типу кухні, вони можуть бути подані як закуска до пива, як м'ясна страва, зварена в супі або як основна страва. Страви з них не тільки готуються вдома, а й часто подаються у ресторанах та кафе. Їх готують у фритюрі, на пару, тушкують та варять, подають у соусі, приправленому чорними бобами³.

У 2022 році продажі курячих ніжок у Китаї становили приблизно 564500 тон, що на 194500 тон більше, ніж у 2018 році⁴. Станом на червень 2020 року один кілограм сирих курячих лапок коштував від 1,67 до 2,22 дол. США у порівнянні з 1,53...1,67 дол. США за 1 кг заморожених курячих грудок.

У 2000 році через Гонконг, найбільший перевалочний пункт з доставки курячих лапок у більш ніж 30 країн, пройшло близько 420000 тон курячих ніг на суму \$230 мільйонів.

З початку 2018 року розпочалася двостороння торгова війна Китай – США. Її підсумком стала заборона на ввезення м'ясних продуктів із США. У результаті лівова частка ринку виявилася вільною, яку швидко заповнили нові країни-експортери: Таїланд, В'єтнам, Індонезія, Австралія, Канада, Ізраїль⁵. Перспективними напрямками за даними Мінагрополітики України є поставки в Іран та Індію⁶⁷.

1.2. Тепломасообмінні процеси під час заморожування.

Заморожування забезпечує запобігання розвитку мікробіологічних процесів і різко зменшує швидкість ферментативних і фізико-хімічних реакцій, в зв'язку з цим його використовують в основному при необхідності тривалого зберігання харчових продуктів. В результаті заморожування волога кристалізується. Кількість вільної вологи в клітинах зменшується, завдяки чому, по мірі вимерзання вологи життєдіяльність мікрофлори знижується, а потім і зупиняється. При

³. Apollo News Network. . Where do all the chicken feet in the vegetable market come from, and where do the rest of the chicken parts go? 2023-07-15. URL: <https://www.aboluowang.com/2023/0715/1927586.html>.

⁴ Guanyan Tianxia (Beijing) Information Consulting Co., Ltd. China Chicken Feet Market Development Trend Research and Future Prospect Forecast Report (2023-2030). URL: <https://www.chinabaogao.com/detail/631061.html>.

⁵ Асоціація «Союз птахівників України». Огляд ринку м'яса птиці, грудень 2020. URL: https://www.poultryukraine.com/ua/poultry/analytics/2022/02/analytics_8348.htm

⁶ Holiuk V. Ya. Holets N.I. Analysis chicken meat exports to Ukraine: state and development trends. ECONOMY AND ENTERPRISE MANAGEMENT. 2016 , 131-135

⁷ Agroportal. Підсумки року: Україна експортувала продовольства майже на \$22 млрд. URL: <https://agroportal.ua/ru/news/ukraina/pidsumki-roku-ukrajina-eksportovala-prodovolstva-mayzhe-na-22-mlrd>

нерівномірному рості кристалів льоду можливе руйнування клітин мікроорганізмів⁸.

На якість продукту суттєво впливає швидкість заморожування. При повільному, тривалому заморожуванні між м'язовими волокнами м'яса утворюється невелика кількість великих кристалів льоду, які з часом стають більш крупними і розривають м'язові волокна. Таке м'ясо після розморожування має дрябну консистенцію і втрачає багато м'язового соку.

При швидкому заморожуванні між м'язовими волокнами та усередині волокон утворюється велика кількість дрібних кристалів, які врівноважують тиск на волокно зовні і зсередини і не розривають його. Таке м'ясо після розморожування за консистенцією наближається до охолодженого^{9 10}.

Утворення кристалів льоду відбувається в результаті теплових флуктуацій. При охолодженні системи процес кристалізації починається за наявності в середовищі зародків кристалів. Вони можуть з'явитися в результаті спонтанної агрегації молекул води. В такому випадку процес утворення зародків називається гомогенним. Якщо ж агрегація молекул води проходить за участі твердих компонентів, наприклад білків, пектинових речовин тощо, процес зародження кристалів називається гетерогенним. Швидкість утворення центрів кристалізації залежить від: ймовірності утворення здатних до росту зародків кристалів; рухливості молекул води; ступеню переохолодження, котрий має певний температурний максимум для того чи іншого розчину^{11, 12}.

Внаслідок вимерзання частини води у поверхневому шарі концентрація рідкої фази у ньому зростає, виникає обмінна дифузія. Вода переміщується з внутрішніх незамерзлих шарів у поверхневі замерзлі шари, а розчинені речовини – у протилежному напрямку, і це послідовно повторюється на більшій глибині. Таким чином, у продукті відбувається перерозподіл води за обсягом.¹³

⁸Мнацаканов Г.К. Холодильна техніка і технологія. Навчальний посібник. (2008) . ОДАХ, Одеса, 2008 р., 128

⁹ Лозовський А.П. Основи холодильних технологій: навч. посібник. – Суми: Університетська книга, 2015.– 149 с.

¹⁰ Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів : навч. посіб. / М. М. Масліков – К. : НУХТ, 2007. – 335 с.

¹¹ Белоус А.М. Кріобіологія: монографія / А.М. Белоус, В.І. Грищенко. – Київ: Наукова думка, 1994. – 432 с.

¹² Основи кріобіології та кріомедицини: підручник / Г.Ф. Жегунов, О.А. Нардид, Б.Т. Стегній . Х.: Інститут проблем кріобіології і кріомедицини НАН України, 2019. – 616 с.

¹³ Roy J. Dossat. PRINCIPLES OF REFRIGERATION, University of Houston, Houston, Texas, 1961. 144 с

Як відомо рівноважну енергію зв'язку (E) вологи у замороженому продукті залежно від температури замороженого продукту визначають згідно рівняння Д. Г. Рютова ¹⁴:

$$E = \Delta H_{кр} \frac{-t}{273.15} \quad (1)$$

где $\Delta H_{кр}$ – питома теплота перетворення води в лід, кДж/кг;

t – кінцева (рівноважна) температура продукту для даної енергії зв'язку, °С.

Як впливає з цього рівняння на характер зв'язку вологи можна впливати величиною $\Delta H_{кр}$ – питомаю. теплотою перетворення води в лід, яка в харчовому продукті змінюється завдяки наявності розчинених речовин. Таким чином, якщо зменшити теплоту перетворення води в продукту за рахунок, наприклад додавання кріопротекторних речовин, то це буде призводити до зменшення температури, за якої настає повне виморожування вологи.

Також відомо, що згідно другого закону Рауля збільшення концентрації розчинених речовин знижує кріоскопічну температуру прямо пропорційно моляльній концентрації

$$\Delta t_{кр} = Kn_{\mu} \quad (2)$$

де n_{μ} моляльна концентрація, моль/кг,

K – кріоскопічна стала, К/(моль/кг).

Таким чином збільшення концентрації розчинених речовин у харчовому продукті також призводить до підвищення його кріопротекторних властивостей за рахунок зменшення кріоскопічної температури, яка відповідає за початок процесу кристалізації та розмір кристалів. Чим менша ця температура, тим менші кристали льоду та менший коефіцієнт дифузії через мембрани клітин, що є позитивним фактором з точки зору збереження споживних властивостей сировини, що заморожується.

Характер криалоутворення при заморожуванні харчових тканинних продуктів, як це доведено дослідженнями Г. Б. Чижова ¹⁵, знаходиться у прямій залежності від швидкості тепловідведення. Чим швидше буде затвердіння води, тим менше буде її переміщення.

Відповідно до існуючих теорій процес кристалізації у складних термодинамічних системах, до яких належать і харчові продукти, слід

¹⁴ *Оніщенко В.П. Наукові основи процесів та апаратів холодильної технології харчових продуктів. Дис... д-ра техн. наук: 05.18.14. Одеса, 2000.– 415 с.*

¹⁵ *Чижов Г.Б. Теплофізичні процеси в холодильній технології харчових продуктів/ Г.Б. Чижов. – М.: Харчова промисловість, 1979. 271 с.*

розглядати як накладення кількох конкуруючих процесів. Причому ці два процеси по-різному залежать від температури, якщо швидкість основного процесу (виморожування вільної вологи) із зменшенням температури знижується, то швидкість конкуруючого процесу (збільшення енергії зв'язку) зростає. Виходячи з цієї фізичної моделі процесу заморожування у роботі ¹⁶ запропоновано математичну модель для швидкості кристалізації у вигляді добутку двох експонент:

$$\frac{d\omega}{dt} = A \cdot e^{-k_1 t} \cdot e^{-\frac{1}{k_2 t}} \quad (3)$$

де A , k_1 , k_2 – емпіричні константи;
 t – температура (за модулем), °С.

Величина k_1 задає швидкість основного процесу (швидкість виморожування вільної вологи), величина k_2 – швидкість конкуруючого процесу (швидкість зростання зв'язування вологи).

З урахуванням виразу (3) для швидкості кристалізації, ефективна питома теплоємність при заморожуванні запишеться в наступному вигляді:

$$c_e(t) = c_0 - (c_w - c_i)w_0(1 - e^{-k_1 t}) + L_w w_0 A \cdot e^{-k_1 t} \cdot e^{-\frac{1}{k_2 t}}, \quad (\text{при } t < t_{kp}) \quad (4)$$

де c_0 – питома теплоємність при температурах (t) вище криоскопічної (t_{kp}), Дж/(кг·К); c_w – питома теплоємність води; $c_w = 4190$ Дж/(кг·К); c_i – питома теплоємність льоду, $c_i = 2100$ Дж/(кг·К); w_0 – початкова вологість у частках від загальної маси; L_w – питома теплота фазового переходу вода-лід, $L_w = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг; τ – поточний час, с.

У рівнянні (4) враховано, що ефективна питома теплоємність при виморожуванні вільної вологи також змінюється за законом експоненти. Характер температурної залежності ефективної питомої теплоємності деяких м'ясних продуктів, що описується рівнянням (4), наведено на рис. 1.

¹⁶ Potapov V, O. Development of a physical-mathematical model for the process of crystallization of meat systems. V. Yancheva, O. Dromenko, Potapov V, O. Grinchenko, T. Zhelieva. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018. – № 1/11 (91). – С. 50-55.

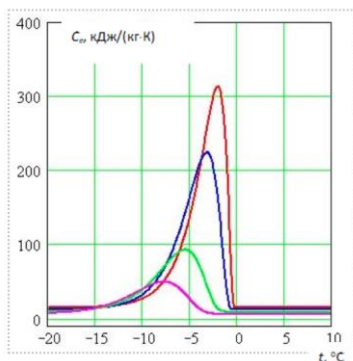


Рис. 1. Характер теоретичної температурної залежності ефективного питомої теплоємності м'ясних харчових продуктів, що описується рівнянням (4)

Також процес заморожування м'язової тканини м'яса супроводжується зміною низки його фізико-хімічних показників. При заморожуванні м'яса збільшується електропровідність, щільність, в'язкість та зменшується поверхневий натяг¹⁷.

1.3. Колоїдно-хімічні та біохімічні зміни під час заморожування

М'ясний сік є складною системою істинних і колоїдних розчинів. Поведінка колоїдних розчинів при заморожуванні дещо відмінна від процесу замерзання молекулярних розчинів. При замерзанні чистий сольовий розчин розпадається на дві фази (вода та сіль) і при відтаванні сіль знову рівномірно розподіляється у воді, тобто виходить повна оборотність процесу.

У міру вимержання води з м'ясного соку в залишку рідкого колоїдного розчину збільшується концентрація солей з чим посилюється їх коагулююча дія на колоїди. Кількість води, що вимерзає з колоїдного тканинного розчину, має, таким чином, велике значення для оборотності процесу заморожування м'язової тканини. Відомо, що при заморожування тканин певну кількість вологи можна виморозити без порушення оборотності процесу. Але якщо кількість вимороженої вологи переходить через певну межу, спостерігаються ушкодження тканини і вода при розморожуванні не повністю поглинається нею.

¹⁷ Dielectric properties of human cord blood serum after long-term low temperature storage. Lipina O. V., Gorobchenko O. A., Nardid O. A., Yasunova O. S., Nikolov O. T. Biophysical Bulletin, 2013, 2(30).

Частина води, яка при відтаванні легко сприймається клітиною назад, може розглядатися як вільна вода, а решта – як пов'язана¹⁸.

У роботі¹⁹ отримано формулу для температурної залежності частки вимороженої води $\omega(T)$

$$\omega(T) = 1 - \frac{v_{s0}}{\gamma_w - e^{\frac{\mu_w \Delta h}{RT_0} \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) + \frac{\mu_w \Delta C}{R_0} \left[\ln \left(\frac{T_0}{T} \right) + 1 - \frac{T_0}{T} \right]}} \quad (5)$$

У цьому рівнянні показник експоненти містить фізичні константи та теплофізичні характеристики води та, таким чином, є відомою функцією абсолютної температури. Величинами, що характеризують індивідуальні фізико-хімічні властивості продукту, є мольна частка розчинних речовин у воді v_{s0} та коефіцієнт активності розчинника γ_w . Як відомо, коефіцієнт активності є мірою відхилення поведінки компонентів розчину від ідеального. Ці відхилення можуть бути зумовлені різними хімічними та фізичними причинами. Запропоноване рівняння може бути використане для розрахунку ефективної питомої теплоємності, а також для аналізу впливу хімічного складу харчових продуктів на процеси холодильної обробки, зокрема для пошуку оптимальних технологічних режимів та вибору кріопротекторів.

На колір курячого м'яса після заморожування впливає ряд факторів: властивості сировини, технологічні фактори, явища рекристалізації при зберіганні у замороженому стані. Найбільше вплив надає швидкість заморожування. Для повільного заморожування грубо кристалічна структура льоду викликає проникнення більшої частини світлових променів у глибші шари м'язів. При цьому створюється враження темного забарвлення шкіри курки. Як правило, більш високу оцінку отримують тушки світлого забарвлення з матовим відтінком поверхні, що типово при швидкому заморожуванні дрібнокристалічної структури льоду. У практиці спостерігається широка шкала коливань світлого забарвлення заморожених тушок від більш світлої, ніж натуральне забарвлення охолодженої птиці (за надшвидких методах заморожування), до близької до натуральної – світло-бежевої²⁰.

¹⁸ Almásy E., Erdeli L., Sharoy T. *Élelmiszerek gyorsfagyasztása* /. – M.: Könyű- és élelmiszeripar, Budapest 1977. – 408 p.

¹⁹ Potapov V.A. Analytical model of the share of frozen water in food products / Potapov V.A., Semenyuk D.P., Romanov O.O. *Kazakhstan-Cold 2018: Sat. report int.sci.tech. conf.* (March 15-16, 2018) – Almaty: ATU, 2018, pp. 132-137.

²⁰ J. Postolski, Z. Gruda. *Zamrażanie żywności*, Opiniodawca prof. dr hab. ANDRZEJ JARCZYK, Warszawa, 1974. – 606 c.

1.4. Технологія та техніка швидкого заморожування

При однофазному заморожуванні тушки птиці одразу після первинної обробки заморожують в морозильних камерах с температурою $-30\dots-35^{\circ}\text{C}$ протягом 23-27 годин. При такому заморожуванні утворюються дрібні кристали льоду, а втрати м'ясного соку при розморожуванні менші, як при двофазному заморожуванні. Білки м'яса краще зберігають набряклість і вологоутримуючу здатність, що покращує цінність м'яса для промислової переробки і кулінарії. Однофазне заморожування являється економічно корисним, термін термічної обробки м'яса скорочується майже. При двофазному заморожуванні м'ясо спочатку охолоджують в камерах охолодження, а потім заморожують.

Тушки птиці заморожують в ящиках при температурі -18°C протягом 48–72 годин (циркуляція повітря природна) або при температурі -23°C протягом 36 годин (циркуляція повітря – вимушена). Субпродукти заморожують поштучно або у вигляді блоку при температурі $-30\dots-35^{\circ}\text{C}$ і швидкості руху повітря 1–2 м/с. Субпродукти можуть заморожувати після попереднього упакування в плівку.

Якщо за традиційної технології загальний час заморожування становить 24–36 годин, то при швидкому заморожуванні він дорівнює 1–3 години, що дає значну перевагу шоківому заморожуванню²¹.

Серед обладнання для шоківой заморозки існує декілька типів устаткування: морозильні камери для зберігання (для шоківой заморожування невеликої кількості продуктів); морозильні камери з візками (найбільш оптимальний варіант при обсязі продуктів від 200 до 1000 кг / год); тунельний шоківой морозильник з горизонтальним конвеєром; багатоярусні і спіральні конвеєрні системи шоківой заморозки продуктів, напівфабрикатів²².

Флоїдизаційні швидкоморозильні апарати призначені в основному для заморожування дрібноштучної або подрібненої плодоовочевої сировини. Цей клас обладнання забезпечує найвищу (серед повітряних камер) швидкість шоківой заморожування, мінімальне усихання і зберігає високу якість продуктів.

Конвеєрні швидкоморозильні апарати призначені для шоківой заморожування м'яса, риби, молочних, борошняних напівфабрикатів та готових страв. Товщина виробів, що заморожуються, може становити до 25 мм, а довжина і ширина до 100 x 100 мм. Ці апарати дозволяють

²¹ Alan R. Sams. Poultry meat processing / Edited by Alan R. Sams, Ph.D. Department of Poultry Science Texas A&M University, 2001 – 432 с.

²² Холодильні установки. Проектування. Навчальний посібник (2008) / Чумак І.Г., Чепурненко В.П., Ларяновський С.Ю. та ін. Під ред. докт. техн. наук і проф. І.Г. Чумака. 4-е вид. переробл. і доп. – Одеса: Друк, 2008. – том 1. – 145 с.

заморожувати до 80% асортименту продуктів, які традиційно заморожуються на спіральних швидкоморозильних апаратах.

Люлечне швидкоморозильне обладнання призначене для шокового заморожування фасованих напівфабрикатів з птиці, м'яса та риби а також різних гарнірів та готових других страв. Товщина виробів, що заморожуються, може становити до 80 мм, а довжина і ширина до 200 x 150 мм. Маса одного виробу (порції) може досягати 1 кг, а час заморожування 2,5 годин.

Спіральне швидкоморозильне обладнання призначене для шокового заморожування порційних страв із м'яса, риби, плодів, овочів, а також напівфабрикатів у пануванні. В цих апаратах використовуються шокфростери (повітроохолоджувачі з великою поверхнею теплообміну, збільшеною відстанню між ламелями для запобігання зашублюванню льодом та великою швидкістю повітрообміну).

В якості компресорно-конденсаторної установки зазвичай використовуються поршневі або гвинтові компресори з повітряними конденсаторами. На потужніші установки шокової заморозки встановлюються центральні (холодильні агрегати що з двох і більше поршневих чи гвинтових холодильних компресорів) з повітряними конденсаторами, вертикальними або горизонтальними.

Сучасні системи швидкого заморожування з примусовою циркуляцією повітря застосовують температури -35... -40°C, що потребує дуже низьких температур випаровування -42...-47°C. Це пов'язано з суттєвими витратами електричної енергії, застосуванням складного та коштовного холодильного обладнання

2. Об'єкт, предмет і методи дослідження

Об'єктом дослідження є процеси охолодження та зберігання харчових продуктів та енергоефективність холодильних систем.

Предметом дослідження є режими роботи холодильних системи при швидкому заморожуванні курячих субпродуктів (лапки).

Методи дослідження: експериментальні методи дослідження режимів роботи холодильної системи та теплообмінних процесів при заморожуванні харчовій сировині.

Метою дослідження є оптимізація режимів заморожування курячих субпродуктів за енергоефективністю та якістю готового продукту.

Реалізація поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань.

– вивчити особливості теплообмінних, хімічних та біохімічних процесів при заморожуванні м'ясної сировини;

– проаналізувати переваги технології швидкого заморожування та конструктивні особливості передових холодильних систем низькотемпературної заморозки;

- виконати експериментальні дослідження процесу заморожування курячих лапок;
- визначити оптимальний режим холодильного обладнання за енергоефективністю та якістю замороженої продукції.

3. Результати

3.1. Методика та обладнання експерименту

Згідно поставлених завдань було проведено 6 експериментів за різних температур та швидкостей повітря у холодильній камері. При цьому кінцева температура продукту була у всіх експериментах однаковою -18°C . Дана температура відповідає міжнародним рекомендаціям для зберігання замороженого продукту від 4 до 6 місяців без втрати органолептичних властивостей продукту.

Одним з наочних показників замороженого продукту є його колір, який повинний бути максимально наближений до природного кольору охолодженого курячого м'яса. Тому в процесі експерименту робилися фотографії для порівняння кольору заморожених курячих лапок.

В експерименті було застосовано наступне обладнання:

- холодильна камера об'ємом 10m^3 з теплоізоляцією пінополіуретаном 150 мм.
- холодильна система на базі компресорно-конденсаторного агрегату з компресором Bitzer (Німеччина) та повітроохолоджувачем Tehma (Україна) $Q_{-42}=1.27$ кВт на фреоні R507
- пересувний стелаж
- лоток з нержавіючої сталі $600\times 400\times 30$ мм
- ящик пластиковий $600\times 400\times 260$ мм
- додаткове теплове навантаження: пластикові ємності з водою.



Рис. 2. Додаткове обладнання: а) пересувний стелаж; б) ящик $600\times 400\times 260$ мм; в) лоток $600\times 400\times 30$ мм

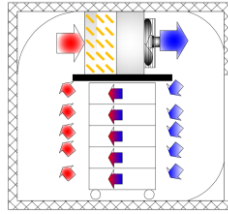
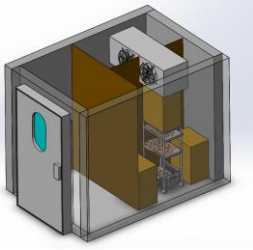


Рис. 3. Принципова схема експериментальної камери.

Вимірювальні засоби: блок керування повітроохолоджувача Dixel; система дистанційного моніторингу температур та енергоспоживання; анемометр Testo

Вимірювання швидкості повітря виконувалось за допомогою анемометра Testo до початку холодильної обробки в наступних зонах: в потоці повітря на виході з повітроохолоджувача та безпосередньо біля продукту.

Вимірювання температури виконувалось: блоком керування Dixel на вході в повітроохолоджувач; системою моніторингу температури після повітроохолоджувача, в середині продукту, на лінії високого та низького тиску.

Вимірювання енергоспоживання холодильного обладнання виконувалось електричним лічильником кожну годину.

Оцінка теплових навантажень та енергоспоживання холодильного обладнання була виконана відповідними програмами: Logiciel Selection (розрахунок компресору); soft GPC Guentner (розрахунок повітроохолоджувача); програма TVal (розрахунок теплового балансу)

Програмою експериментів було обрано наступні режими швидкого заморожування для м'ясної сировини:

- температура в камері – -23°C або -35°C ;
- швидкість повітря від 0,5 до 6 м/с;
- кінцева температура в середині продукту -18°C ;

3.2. Результати отриманих експериментальних даних

На рис. 4, 5 показані кінетичні криві заморожування курячих лапок.

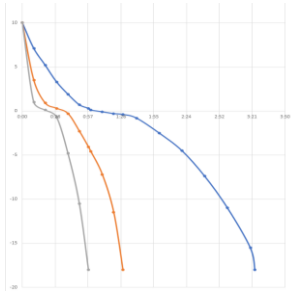


Рис. 4. Криві кінетики температури курячих лапок під час заморожування за температурів в камері -35 °С та швидкості повітря: 1 – 0,5 м/с; 2 – 1,0 м/с; 2 – 2,0 м/с.

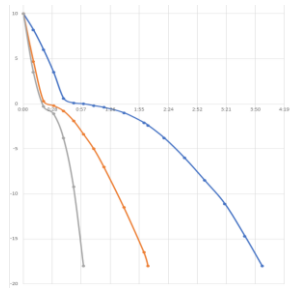


Рис. 5. Криві кінетики температури курячих лапок під час заморожування за температурі в камері -23 °С та швидкості повітря: 1–1,5 м/с; 2–4,0 м/с; 2–6,0 м/с.

У таблиці 1 наведені дані отримані у проведених дослідженнях.

Таблиця 1

Результуючі показники процесу заморожування курячих лапок

№ експерименту	Температура в камері, °С	Швидкість, м/с	Енерговитрати, кВт	Колір	Час заморожування, хв
1	-35	0,5	4,38	Темно-рожевий	204
2	-35	1	1,88	Світло-рожевий	88
3	-35	2	1,33	Світло-жовтий	58
4	-23	1,5	3,346	Темно-рожевий	227
5	-23	3	1,94	Рожевий	124
6	-23	6	1,05	Світло-жовтий	60

Зовнішній вигляд продукту після заморожування наведено на рис. 6.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 6. Зовнішній вигляд курячих лапок після заморожування:
а) – експеримент № 1; б) – експеримент № 2;
в) – експеримент № 3; г) – експеримент № 4; д) – експеримент № 5;
а) – експеримент № 6

ВИСНОВКИ

Курячі лапки являються малопробутковим продуктом для реалізації на Українському ринку. В окремих випадках його відносять до так званих боєнських відходів які підлягають утилізації в випарних котлах. Цей процес досі затратний (до 0.5 МВт/т). В свою чергу існують міжнародні ринки, зокрема північно-східної Азії та Китаю, на яких цей продукт має великий попит.

Заморожені курячі лапки зберігаються від 4 до 6 місяців без втрати органолептичних властивостей. Їх зручно транспортувати на велику відстань та реалізувати з мінімальними втратами первинної якості.

Більшість сучасних холодильних систем швидкого заморожування з примусовою циркуляцією повітря застосовують температури $-35\dots -40^{\circ}\text{C}$, що потребує дуже низьких температур випаровування $-42\dots -47^{\circ}\text{C}$. Такі температури викликають суттєві витрати електричної енергії та потребують застосування складного та коштовного холодильного обладнання.

Метою проведеного дослідження було визначення режимів заморожування з температурами максимально близькими до температур

подальшого зберігання. Це дає потенційну можливість зменшити капітальні витрати, зменшити експлуатаційні витрати та собівартість продукції, знизити шкідливий вплив на екологію та підвищити енергоефективність.

В результаті експерименту встановлено, що найбільш впливовим фактором енерговитрат в процесі заморожування є активна циркуляція повітря через продукт на яку впливає товщина шару продукту.

Найкращий результат був досягнутий при розміщенні продукту на відкритих піддонах в один шар, при температурі повітря -23°C і швидкості повітря 6 м/с. Енерговитрати 1,05 кВт-година. Колір продукту природний світло- жовтий.

Наступний результат за якістю був досягнутий при розміщенні продукту на відкритих ящиках в один шар, при температурі -35°C і швидкості повітря 2 м/с. Енерговитрати 1,33 кВт-година. Колір продукту природний світло- жовтий.

У випадках, коли продукт розміщувався в ящиках або в декілька шарів, температура продукту -18°C не досягалася протягом 60 хвилин ані за температури повітря -23°C , ані за -35°C .

За тривалості процесу заморожування більше ніж півтори години колір шкіри продукту змінювався від рожевого до червоного, що не відповідає вимогам якості.

Визначено, що в середньому енергоспоживання холодильної системи на 32% вище за температури в камері -35°C ніж за температури в камері -23°C .

В якості завдань для подальших досліджень є проведення ексергетичного аналізу холодильних циклів за визначених режимів заморожування курячих субпродуктів та побудови відповідної математичної моделі.

АНОТАЦІЯ

У роботі проведені експериментальні дослідження процесу заморожування курячих субпродуктів. Курячі лапки являються малопробитковим продуктом для реалізації на Українському ринку. В окремих випадках його відносять до так званих боєнських відходів які підлягають утилізації в випарних котлах. Цей процес досі затратний (до 0.5 МВт/т). В свою чергу існують міжнародні ринки, зокрема південно-східної Азії та Китаю, на яких цей продукт має великий попит.

Заморожені курячі лапки зберігаються від 4 до 6 місяців без втрати органолептичних властивостей. Їх зручно транспортувати на велику відстань та реалізовувати з мінімальними втратами первинної якості.

Для швидкого заморожування більшість сучасних холодильних систем застосовують дуже низькі температури повітря $-35\dots-40^{\circ}\text{C}$. Такі температури викликають суттєві витрати електричної енергії та потребують застосування складного та коштовного холодильного обладнання. В роботі було досліджено режими заморожування з

температурами близькими до температур подальшого зберігання -23°C та -35°C за швидкості циркуляції повітря у камері 0,5...6 м/с. Це дає потенційну можливість зменшити капітальні витрати, зменшити експлуатаційні витрати та собівартість продукції, знизити шкідливий вплив на екологію та підвищити енергоефективність.

Встановлено, що найкращі показники за енергоефективністю та якістю заморожених курячих лапок, отримано при розміщенні продукту на відкритих піддонах в один шар за температури повітря -23°C і швидкості повітря 6 м/с, або температурі -35°C і швидкості 2 м/с. Енерговитрати за цих режимів складають 1,05 кВт/година та 1,33 кВт/година відповідно. Тривалість процесу заморожування за цих режимів близько години.

Визначено, що в середньому енергоспоживання холодильної системи за температури в камері -35°C на 32% вище ніж за температури в камері -23°C.

Література

1. Осадчук В. Китайський ринок курятини: перспективи для українського виробника. *Україна-Китай*, N2(20) 2020, 32-39.

2. National Chicken Culture Promotion Alliance. 33 billion! How much do Chinese people love to eat chicken feet, chicken wings, and chicken legs. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/73307694>.

3. Apollo News Network. . Where do all the chicken feet in the vegetable market come from, and where do the rest of the chicken parts go? 2023-07-15. URL: <https://www.aboluowang.com/2023/0715/1927586.html>.

4. Guanyan Tianxia (Beijing) Information Consulting Co., Ltd. China Chicken Feet Market Development Trend Research and Future Prospect Forecast Report (2023-2030). URL: <https://www.chinabaogao.com/detail/631061.html>.

5. Асоціація «Союз птахівників України». Огляд ринку м'яса птиці, грудень 2020. URL: https://www.poultryukraine.com/ua/poultry/analytics/2022/02/analytics_8348.htm

6. Holiuk V. Ya. Holets N.I. Analysis chicken meat exports to Ukraine: state and development trends. *ECONOMY AND ENTERPRISE MANAGEMENT*. 2016 , 131-135

7. Agroportal. Підсумки року: Україна експортувала продовольства майже на \$22 млрд. URL: <https://agroportal.ua/ru/news/ukraina/pidsumki-roku-ukrajina-eksportovala-prodovolstva-mayzhe-na-22-mlrd>

8. Мнацаканов Г.К. Холодильна техніка і технологія. Навчальний посібник. (2008) . *ОДАХ, Одесса, 2008 р.*, 128 с.

9. Лозовський А.П. Основи холодильних технологій: навч. посібник. – Суми: *Університетська книга, 2015.*– 149 с.

10. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів : навч. посіб. / М. М. Масліков – К. : *НУХТ, 2007.* – 335 с.

11. Белоус А.М. Кріобіологія: монографія / А.М. Белоус, В.І. Грищенко. – *Київ: Наукова думка, 1994.* – 432 с.

12. Основи кріобіології та кріомедицини: підручник / Г.Ф. Жегунов, О.А. Нардид, Б.Т. Стегній . Х.: Інститут проблем кріобіології і кріомедицини НАН України, 2019. – 616 с.

13. Roy J. Dossat. PRINCIPLES OF REFRIGERATION, University of Houston, Houston, Texas, 1961. 144 с

14. Оніщенко В.П. Наукові основи процесів та апаратів холодильної технології харчових продуктів. Дис... д-ра техн. наук: 05.18.14. *Одесса, 2000.* – 415 с.

15. Чижев Г.Б. Теплофізичні процеси в холодильній технології харчових продуктів/Г.Б. Чижев. – М.: Харчова промисловість, 1979. -271 с.

16. Potapov V, O. Development of a physical-mathematical model for the process of crystallization of meat systems. V. Yancheva, O. Dromenko, Potapov V, O. Grinchenko, T. Zhelieva. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. – № 1/11 (91). – С. 50-55.

17. Dielectric properties of human cord blood serum after long-term low temperature storage. Lipina O. V., Gorobchenko O. A., Nardid O. A., Yasunova O. S., Nikolov O. T. *Biophysical Bulletin*, 2013, 2(30).

18. Almásy E., Erdeli L., Sharoy T. *Élelmiszerek gyorsfagyasztása /* – М.: Кőnnyű- és élelmiszeripar, Budapest 1977. – 408 p.

19. Potapov V.A. Analytical model of the share of frozen water in food products / Potapov V.A., Semenyuk D.P., Romanov O.O. *Kazakhstan-Cold 2018: Sat. report int.sci.tech. conf. (March 15-16, 2018)* – Almaty: ATU, 2018, pp. 132-137.

20. J. Postolski, Z. Gruda. Zamrażanie żywności, Opiniodawca prof. dr hab. ANDRZEJ JARCZYK, Warszawa, 1974. – 606 с.

21. Alan R. Sams. Poultry meat processing / Edited by Alan R. Sams, Ph.D. Department of Poultry Science Texas A&M University, 2001 – 432 с,

22. . Холодильні установки. Проектування. Навчальний посібник (2008) / Чумак І.Г., Чепурненко В.П., Ларяновський С.Ю. та ін. Під ред. докт. техн. наук і проф. І.Г. Чумака. 4-е вид. переробл. і доп. – *Одесса: Друк, 2008.* – том 1. – 145 с.

Information about the authors:

Molskiy Oleksandr Serhiyovych,

Postgraduate Student at the Department of “Integrated Electrical Technologies and Power Engineering”,
State Biotechnological University
44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Potapov Volodymyr Oleksiiovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of “Integrated Electrical Technologies
and Power Engineering”,
State Biotechnological University
44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine