

## АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНДУКТИВНОГО СУШІННЯ М'ЯСА

**Скрипник В'ячеслав Олександрович**доктор технічних наук, професор  
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна  
ORCID: 0000-0001-8883-7398  
skrypnyk\_v\_a@ukr.net**Пономаренко Богдан Геннадійович**аспірант, асистент  
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна  
ORCID: 0000-0002-4047-1881  
flysoul55@gmail.com

*Продукти харчування із тривалим терміном зберігання, в тому числі сушене м'ясо, користуються попитом серед споживачів, особливо в районах бойових дій та тих, які постійно знаходяться під обстрілами. Перебої в постачанні електричної енергії, викликані руйнуванням об'єктів критичної інфраструктури внаслідок ракетних атак з боку РФ, лише сприяють збільшенню такого попиту в масштабах всієї України. У зв'язку з цим є необхідність у пошуку екологічно чистого та енергоефективного способу виготовлення сушеного м'яса. Таким способом є кондуктивне (контактне) сушіння. Сушіння є технологією, що базується на видаленні вологи з сировини, ускладнюючи тим самим розвиток мікроорганізмів та хімічних реакцій, що призводять до псування продуктів харчування. Сушіння знайшло широке застосування в харчових технологіях, починаючи від традиційних способів, таких як конвективне, кондуктивне, НВЧ-сушіння або природне сушіння, і закінчуючи сучасними технологіями, такими як сублімаційне, радіаційне, ЗТП-сушіння та інші. Науковий підхід до вивчення кондуктивного сушіння, як способу консервування харчової сировини, в тому числі м'ясної, включає огляд теоретичних аспектів, що є вагомим розділом у вивченні цього питання, а також фізики кипіння в обмеженому просторі дуже малого розміру – нанопорах. Ця стаття присвячена дослідженню теоретичних основ кондуктивного сушіння м'яса, зокрема аналізу тепло- та масообмінних процесів, фізики фазових переходів в наномасштабі, специфічного механізму видалення вологи, впливу характеристик м'ясної сировини на процес. В рамках дослідження використовується аналітичний підхід для вивчення взаємодії між нагрівальною поверхнею та сировиною. Основна проблема, виявлена в ході дослідження, полягає в ускладненому теплообміні між цими двома елементами процесу. Автори розглядають фактори, які впливають на тепловий потік, аналізуючи можливі шляхи інтенсифікації процесу: першим варіантом вирішення зазначеної проблеми є визначення температури нагрівальних поверхонь, другим способом вирішення є механічне видалення шару перегазної пари, що утворюється біля поверхонь нагрівання, третім способом вирішення є стиснення сировини нагрівальними поверхнями із певним зусиллям. Дана стаття є внеском у розуміння особливостей кондуктивного сушіння та являється підґрунтям для подальших практичних досліджень з метою оптимізації і досягнення максимальної якості та тривалості зберігання продуктів харчування, в тому числі м'яса.*

**Ключові слова:** кондуктивний, кінетика сушіння, м'ясо, теплопровідність, нанопори, капіляр, теплообмін, вологовміст, кавітація.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.11>

**Вступ.** В контексті постійного зростання зацікавленості до збереження якості та тривалості зберігання харчових продуктів, в тому числі і м'яса, способи сушіння залишаються об'єктом уваги в харчовій промисловості та дослідницькій галузі. Необхідною умовою проведення процесу сушіння є підведення сушильного агенту до сировини для її подальшого зневоднення. Це призводить до зменшення водневого потенціалу сировини, що, в свою чергу, змінює її фізичні та хімічні показники. Зневоднення гальмує активність мікроорганізмів, які спричинюють псування продукту, чим і забезпечується їх подовження терміну придатності до споживання. Сушіння харчової сировини є об'єктом дослідження в науковій сфері у зв'язку з його визнаним потенціалом, як ефективного методу консервації. Зокрема, ці питання розглядалися Погожих М. І., Пак А. О., Бурдо О. Г., Sanan A., Ibrahim D., Aksoy A., Karasu S., Akcicek A. та

ін. Ці науковці внесли вагомий внесок у вдосконалення способів сушіння, оптимізацію процесів та розробку нових технологій (Hayashi, 1989; Pak, 2014). Разом з тим, в сучасній науковій літературі приділяється мало уваги дослідженню процесу кондуктивного сушіння м'яса. Тому виникає необхідність дослідження такого процесу, включаючи теоретичні аспекти, які є суттєвим етапом у загальному вивченні зазначеного питання. Метою статті було аналітичне обґрунтування процесу кондуктивного сушіння м'яса та пошук ефективного способу інтенсифікації при двобічному підведенні теплоти. Основними проблемами під час процесу ми вважаємо ускладнення тепло та масообміну і, як результат, збільшення тривалості кондуктивного сушіння. Основною гіпотезою даного дослідження є те, що зазначені проблеми вирішуються стисненням м'яса нагрівальними поверхнями із певним зусиллям.

**Матеріали і методи досліджень.** В статті використаний аналітичний метод дослідження наукових джерел, що включав збір інформації з існуючих джерел, її систематизація, класифікація, порівняння, а також виведення власних висновків. Зазначений метод сприяє глибокому розумінню досліджуваної проблеми, виявленню закономірностей та взаємозв'язків між явищами, формулюванню нових теоретичних концепцій, а також підтвердження виведеної гіпотези. Загалом, аналітичний метод є важливим інструментом для досягнення наукових цілей.

**Результати.** Розглянемо процеси, що відбуваються за кондуктивного сушіння м'яса. Як відомо, сушіння є нестационарним процесом (Pohozhykh et al, 2016), оскільки зміна стану сировини відбувається в міру її зневоднення із плином часу. Сушіння визначається як теплообмінний і масообмінний процес (Musielak et al., 2016; Pohozhykh et al., 2016). Нагрівання та випаровування дозволяють оцінити взаємодію теплової енергії та вологи за кондуктивного сушіння м'яса. На етапі нагрівання, тепла енергія подається до сирі м'ясної сировини, підвищуючи температуру її поверхневого шару із послідуною передачею теплоти теплопровідністю до внутрішнього шару. Цей процес описується рівняннями теплового балансу та теплопровідності, враховуючи фізичні властивості матеріалу. Рівняння теплового балансу описує взаємодію теплової енергії із сировиною та зміну температури в часі, допомагаючи врахувати тепловий обмін між нагрівальною поверхнею та м'ясом (Cherevko & Poperechniy, 2015).

Випаровування виникає при переході води у газоподібний стан. За випаровування тепловий потік спричинює фазовий перехід, в якому енергія витрачається на розрив молекулярних зв'язків для випаровування рідини. Цей процес суттєво впливає на температурний режим та фізичні властивості м'яса за сушіння, описується рівняннями теплового балансу та теплоперенесення. (Vigova et al., 2021; Labai, 1998).

Водночас із процесом теплообміну відбувається процес масообміну за рахунок молекулярної дифузії.

Молекулярна дифузія полягає у встановленні рівноваги зосередження вологи в м'ясі із послідуою випаровуванням за рахунок взаємодії градієнту температури і градієнту тиску, наслідком чого є перенесення молекул вологи через структуру м'яса із внутрішніх шарів до поверхневого шару. Розповсюдження теплоти в м'ясі призводить до нерівномірного підвищення температури в його шарах, за рахунок чого утворюється температурний градієнт, який збільшує кінетичну енергію молекул вологи і стимулює їх хаотичний рух в напрямку дифузії. Напрямок дифузії визначає градієнт тиску, що сприяє руху вологи від внутрішніх шарів до поверхневого шару. В рамках кондуктивного сушіння процес молекулярної дифузії описується законом Фіка (Cherevko & Poperechniy, 2015).

Особливості кондуктивного сушіння м'яса значною мірою обумовлені специфічним механізмом видалення вологи (Pohozhykh et al, 2016).

Як видно з рис. 1, видалення вологи із плином часу відбувається нерівномірно.

На початку процесу протягом незначного проміжку часу зневоднення відбувається повільно. Цей процес відповідає на кривій сушіння відріzkу  $AB$  і є періодом прогрівання, що складає 5...10 % від загальної тривалості процесу. В цей період спостерігається тепловий вплив на м'ясо, спрямований на його нагрівання до температури, необхідної для запуску процесу видалення вологи. У цей період температура м'яса поступово зростає, сприяючи початковій активації процесів тепло-масообміну.

Подальше зменшення вологовмісту  $W$  до першого критичного вологовмісту  $W_{кр1}$  відповідає відріzkу  $BC$  (рис. 1). Цей період вважається першим періодом кондуктивного сушіння, який відбувається за сталої температури. За цей період видаляється вільна волога (Aksoy et al., 2019). Температура протягом всього періоду є майже незмінною, позначена відріzkом  $B_1C_1$ . Перший період займає 50...60% від загальної тривалості процесу і триває до досягнення критичного вологовмісту  $W_{кр1}$ , після чого поверхня м'яса, ймовірно, почне підсихати, що, в свою чергу, викличе погіршення ефективності контакту

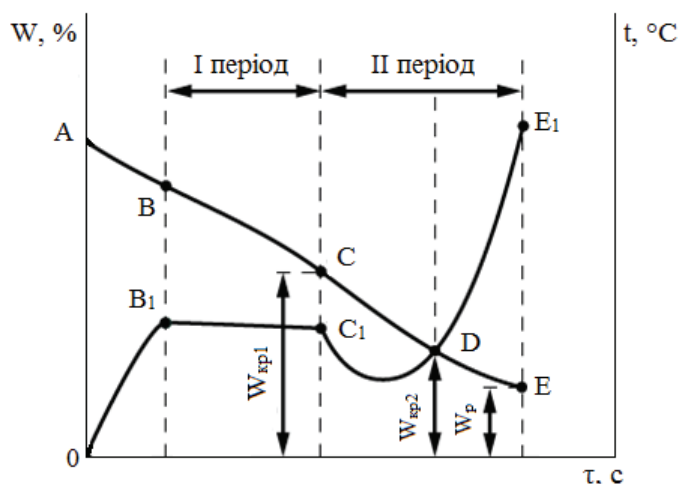


Рис. 1. Теоретична кінетика вологовмісту суміщена із теоретичною кінетикою температури

із нагрівальною поверхнею. Це, ймовірно, призведе до збільшення опору перенесення теплоти  $R_n$  і ускладнить зневоднення.

Другий період вважається періодом спадаючої швидкості, на кривій сушіння позначений відрізком  $CE$  і триває до повного припинення зневоднення. Під час другого періоду видалається зв'язана волога (Pohozhykh et al., 2016; Aksoy et al., 2019), а температура спочатку спадає до досягнення критичного вологовмісту  $W_{кр2}$ , після чого суттєво зростає, наближаючись до температури нагрівальної поверхні. Наявність  $W_{кр2}$  дозволяє поділити другий період на дві окремі частини (першу і другу), за якої температура спадає по кривій  $C_1D$ , а після досягнення  $W_{кр2}$  починає зростати по кривій  $DE_1$ . Таке підвищення температури зумовлено зниженням вологовмісту.

Теоретично процес кондуктивного сушіння доцільно зупинити при досягненні рівноважного вологовмісту  $W_p$ . В цей момент температура шарів м'яса вирівнюється із температурою нагрівальної поверхні, що позначене на рис. 1 точкою  $E_1$ .

Таким чином, як видно з рис. 1, під час другої частини другого періоду кондуктивного сушіння температура сировини стрімко підіймається із досягненням вологовмісту  $W_p$ . Це, ймовірно, зумовлено мінімальним залишком вологи в структурі м'яса і його підсохлою поверхнею, що викликає збільшення опору переносу теплоти  $R_n$ . Якщо не зупинити сушіння при досягненні рівноважного стану  $W_p$ , то, з високою ймовірністю, це призведе до зниження органолептичних показників та втрати товарного вигляду.

Розглянемо особливості м'ясної сировини, що мають науково-практичну важливість для аналітичного дослідження процесу кондуктивного сушіння.

М'ясо має складну мікроскопічну структуру. Вода (волога) розподілена у ній в складі м'язових волокон, сполучної тканини та між ними, в складі пор, капілярів та між ними. М'язові волокна об'єднуються в первинні пучки сполучною тканиною, первинні пучки об'єднуються у вторинні тощо. За даними авторів (Skrypnyk et al., 2024) діаметр м'язового волокна складає  $60 \cdot 10^{-6}$  м, а розмір інших пор між волокнами, між первинними та вторинними пучками складає  $(54 \dots 195) \cdot 10^{-6}$  м. В процесі нагрівання з м'ясом відбуваються структурні зміни: денатурація білків, зварювання і дезагрегація колагену, внаслідок чого м'язові волокна збільшуються в діаметрі, зсідуються і ущільнюються. Такі зміни призводять до зменшення діаметру зазначених структур від десятків нанометрів до нанометрів, тобто на порядок, що призводить в подальшому до ускладнення виведення вологи.

Пори і капіляри, а точніше, поведінка рідин в нанорозмірному замкненому просторі (Kavokine, et al., 2021; Coudert, et al., 2021), є об'єктом вивчення науковців протягом декількох останніх декад і особливості полягає в тому, що процеси в наномасштабі відбуваються дещо по-іншому, ніж у макроскопічних розмірних об'єктах (Giacomello, 2023). Пори і капіляри в м'ясній структурі не є виключенням і також являються нанорозмірними замкненими просторами, а простіше – нанопорами.

Початковий вологовміст  $W$  є характеристикою м'яса, що визначає його консистенцію, органолептичні показники, тривалість та енергоефективність сушіння, якість готового продукту. Крім того, початковий вологовміст сировини впливає на термодинамічні параметри процесу сушіння – ентальпію  $H$  та ентропію  $S$ . Початковий і кінцевий вологовміст вказують відсоткову частину ваги, відповідно сировини і готового продукту, що припадає на воду (DSTU ISO 1442:2005):

$$W = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100\%,$$

де  $m_1$  – вага води в сировині або готовому продукті, г;

$m_2$  – загальна вага сировини або готового продукту, г.

Кінцевий вологовміст м'яса визначає кількість води, яка залишається в м'ясі після завершення процесу сушіння. Цей показник визначає характеристики готового продукту. Кінцевий вологовміст може бути теоретично визначений як результат різниці між початковим вологовмістом і кількістю води, яка видалається за сушіння (Salehi, 2019).

Жир має високу енергетичну цінність, тому продукти харчування з високим вмістом жиру мають більше калорій. Крім цього, жир має низьку теплопровідність порівняно з білками та водою, це призводить до того, що в областях з вищим вмістом жиру тепловий потік буде менш інтенсивним, і, відповідно, сушіння відбуватиметься повільніше. Загалом, наявність жиру в м'ясі перешкоджає теплообміну та масообміну, ускладнюючи при цьому процес зневоднення сировини (Aksoy et al., 2019).

Теплофізичні характеристики м'яса визначають характер та швидкість розповсюдження теплоти під час теплової обробки або за сушіння (Burova et al., 2021).

Теплопровідність м'яса, що складає  $0,44 - 0,5$  Вт/(м·К), визначає швидкість теплопередачі від нагрівальної поверхні до внутрішніх шарів м'яса. Тепловий потік описується основним законом теплопровідності Фур'є (Cherevko & Poperechniy, 2015; Labai, 1998).

Температуропровідність м'яса визначає його здатність передавати теплоту при наявності температурного градієнту. Цей показник вказує на швидкість розповсюдження теплоти в м'ясі під час теплової обробки або за сушіння, а також ефективність теплопередачі через структуру м'яса

Товщина шару м'яса вказує на шлях, який теплота проходить, дістаючись до внутрішніх шарів за певний часовий проміжок, впливаючи на тривалість нагрівання м'яса і подальшого сушіння. З основного рівняння теплопередачі визначається тривалість такого процесу (Cherevko & Poperechniy, 2015; Burova et al., 2021).

Інтенсивність теплообміну між нагрівальною поверхнею і сировиною описується рівнянням Ньютона-Ріхмана (Pohozhykh et al., 2016).

**Обговорення.** Починаючи з кінця першого періоду при досягненні  $W_{кр1}$  процес кондуктивного сушіння м'яса супроводжується ускладненням теплообміну між нагрівальною поверхнею і м'ясом. Ймовірно, це зумовлено зниженням кількості вологи в структурі м'яса, наявністю жиру та термічних опорів, що виникають внаслідок

взаємодії теплових потоків із поверхневим та внутрішніми шарами м'яса.

Аналіз низки наукових джерел стосовно зневоднення в нанопорах (Remsing et al., 2015; Huang et al., 2003), капілярного випаровування (Trussett et al., 2001; Roth et al., 2006), кавітації в замкненому просторі (Bolhuis et al., 2000; Duan et al., 2012) дозволяє констатувати наступне: вода (рідина), що знаходиться в структурі м'яса, нагріта до певної температури, починає фазовий перехід у газоподібний стан (в пару). Фазовий перехід відбувається за умови, коли тиск в капілярі знижується нижче тиску насиченої пари рідини за відповідної температури. В результаті утворюються мікроскопічні порожнини, що заповнені паром. Цей процес відбувається завдяки специфічним ефектам, що виникають в нанопорах, коли температура кипіння залежить від тиску  $p_{\text{кип}}(T)$  і навпаки, на відміну від  $T=373,15\text{ K}$  при  $p_{\text{кип}}=101325\text{ Па}$  (Giacomello, 2023): кипіння може відбуватися при надзвичайно високих тисках або при низьких температурах, його можна контролювати, впливаючи на геометрію та хімію нанопор, на рідину та ін. параметри. Саме фазовий перехід рідини в пару в умовах зниженого тиску є явищем кавітації, а точніше – парової кавітації, що є конкретним її випадком.

У м'ясі утворення парових порожнин є складним процесом, оскільки м'ясо має комплексну мікроскопічну структуру. В основному, утворення парових порожнин відбувається в нанопорах. Однак у порах більшого розміру або між сполучними тканинами також відбувається утворення парових порожнин.

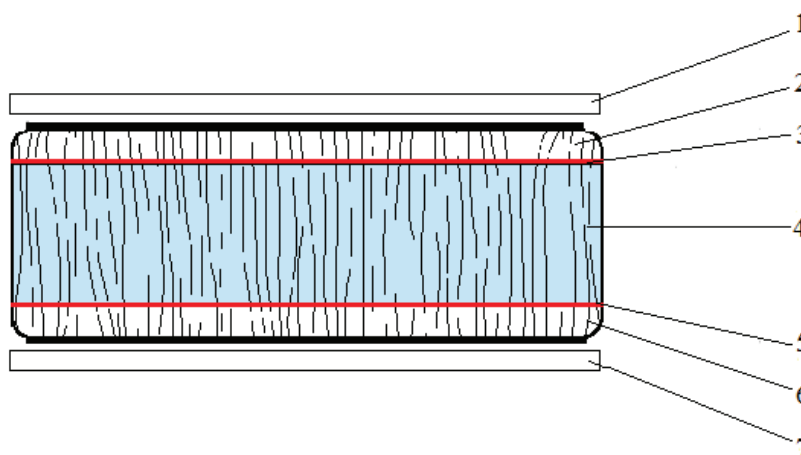
В процесі подальшого сушіння відбувається видалення утвореної пари із поверхні м'яса. Внаслідок того, що температура поверхневого шару є вищою за температуру внутрішніх шарів, хоча і внутрішні шари в цей момент є досить нагрітими, під поверхневим шаром утворюється прошарок пари, що зазнає впливу високої температури від нагрівальної поверхні, що призводить

до його перегрівання. В умовах двобічного підведення теплоти зазначений прошарок, який має вищу температуру, ніж точка кипіння води за даних умов тиску, утворюється біля поверхонь, що контактують із верхньою та нижньою нагрівальними поверхнями (рис. 2).

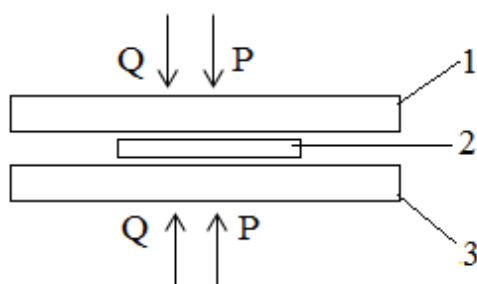
Рідина в нанопорах за настання температури кипіння обмежена двома нагрівальними поверхнями, в результаті чого виникають два фронти пароутворення, через які і виводиться пара, утворена в нанопорах. Фронти пароутворення по мірі видалення вологи рухаються назустріч один одному, що призводить до збільшення товщини  $\delta_{n1}$  та  $\delta_{n2}$  прошарків (зверху і знизу), заповнених перегрітою паром. Оскільки теплопровідність води за нормальних умов становить  $0,6 \dots 0,7\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  (Tritt, 2005), а теплопровідність пари наближається до теплопровідності повітря за тих же умов, збільшення товщини  $\delta_{n1}$  та  $\delta_{n2}$  різко погіршують умови теплообміну між нагрівальними поверхнями і внутрішніми шарами, що призводить до збільшення тривалості процесу кондуктивного сушіння.

Для вирішення проблеми ускладненого теплообміну між нагрівальною поверхнею і м'ясом можливо збільшити температуру нагрівальних поверхонь до  $423,15\text{ K}$ . Це дозволить, ймовірно, швидко прогріти сировину та інтенсифікувати процес сушіння протягом першого періоду (рис.1), за якого видаляється вільна волога. В подальшому висока температура, ймовірно, призведе до утворення небажаних сполук (Аукап, 2015; Domingo & Nadal, 2017), які є шкідливими для здоров'я людини. Виходячи з цього, підвищення температури нагрівальних поверхонь до  $423,15\text{ K}$  є недоцільним.

Натомість, вирішити зазначені проблеми можливо за рахунок постійного механічного видалення  $\delta_{n1}$  та  $\delta_{n2}$  або примусовим виведенням вологи із внутрішніх шарів до поверхневого шару. Нами пропонується таке виведення шляхом стиснення м'яса нагрівальними поверхнями із певним зусиллям  $P$  (рис. 3).



**Рис. 2. Схема утворення перегрітої пари під поверхневим шаром м'яса за кондуктивного сушіння:**  
1 – верхня нагрівальна поверхня; 2 – шар перегрітої пари, утворений під поверхневим шаром, що контактує із верхньою нагрівальною поверхнею товщиною  $\delta_{n1}$ ; 3 – верхній фронт пароутворення; 4 – внутрішні шари м'яса товщиною  $\delta_b$ ; 5 – нижній фронт пароутворення; 6 – шар перегрітої пари, утворений під поверхневим шаром, що контактує із нижньою нагрівальною поверхнею товщиною  $\delta_{n2}$ ; 7 – нижня нагрівальна поверхня



**Рис. 3. Схема двостороннього підведення теплоти зі стисненням:**  
**1 – верхня нагрівальна поверхня; 2 – сировина; 3 – нижня нагрівальна поверхня**

Стиснення сировини нагрівальними поверхнями покращить щільність контакту, що призведе до збільшення коефіцієнта теплопередачі  $i$ , як результат, до вирішення проблеми ускладненого теплообміну. Оптимальним зусиллям стиснення  $P$  можна вважати таке значення, що забезпечить виведення вологи із нанопор м'яса, але не призведе до незворотної його деформації.

За таких умов кінетика вологовмісту буде описуватись модифікованою експонентою вигляду (Ramazanov et al., 2015):

$$y = k + a \cdot b^x,$$

де  $k$  – горизонтальна асимптота, яка в реальних умовах буде дорівнювати рівноважному вологовмісту;

$a$  і  $b$  – параметри функції, які залежать від параметрів процесу сушіння.

Кінетика температури за таких умов описується модифікованою експонентою вигляду (Ramazanov et al., 2015):

$$y = k - a \cdot b^x,$$

де  $k$  – горизонтальна асимптота, яка в реальних умовах буде дорівнювати температурі поверхонь нагрівання;

$a$  і  $b$  – параметри функції, які залежать від параметрів процесу сушіння.

**Висновки.** Розглянуто тепло- та масообмінні процеси, механізм видалення вологи, механізм утворення та виведення пари, а також проаналізовано вплив характеристик м'ясної сировини на процес кондуктивного сушіння м'яса. Для інтенсифікації процесу кондуктивного сушіння пропонується стиснення сировини нагрівальними поверхнями. Запропоновано аналітичні моделі кінетики вологовмісту і кінетики температури в м'ясі за кондуктивного сушіння у вигляді модифікованих експонент. Подальші експериментальні дослідження кондуктивного сушіння м'яса різної товщини планується проводити, застосовуючи стиснення м'яса із різним зусиллям.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Acar, C., Dincer, I., & Mujumdar, A. (2020). A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. *Drying Technology*, 40 (6), 1029–1050. DOI : 10.1080/07373937.2020.1848858.
2. Aksoy, A., Karasu, S., Akcicek, A., & Kayacan, S. (2019). Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat. *Foods*, 8 (6), 216. DOI : 10.3390/foods8060216.
3. Aykan, N. F. (2015). Red meat and colorectal cancer. *Oncology reviews*, 9(1), 288. DOI : 10.4081/oncol.2015.288.
4. Bolhuis, P. G., & Chandler, D. (2000). Transition path sampling of cavitation between molecular scale solvophobic surfaces. *The journal of chemical physics*. 113, 8154–8160. DOI :10.1063/1.1315997.
5. Burova, Z., Ivanov, S., Roman, T., Vasyliiv, V., Zheplinska, M., Mushtruk, M., Palamarchuk, I., Sarana, V., & Hudzenko, M. (2021). Examination of thermophysical characteristics of food products. *Animal science and food technology*. 12(3), 18-35. DOI: 10.31548/animal2021.03.002.
6. Cherevko, O. I., & Poperechniy, A. M. (2015). *Protsesy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv: navch. posib.* [Processes and equipment in food production: a textbook]. Harkiv: Svit knig (in Ukrainian).
7. Coudert, F. X., Boutin, A., & Fuchs A. H. (2021). Open questions on water confined in nanoporous materials. *Communications chemistry*. 4, 106. DOI :10.1038/s42004-021-00544-9.
8. David, R. Eyre, Mercedes, A. Paz, & Paul, M. Gallop. (1984). Cross – linking in collagen and elastin. *Annual review of biochemistry*. 53. 717 – 748. DOI :10.1146/annurev.bi.53.070184.003441.
9. Dexiao, M., Guozhao, J., Dong, W., & Aimin, Li. (2021). Reinforced contact between sludge and hot wall for enhancing conductive drying by applying external load : heat and mass transfer analysis. *Process safety and environmental protection*. 154, 372 – 383. DOI : 10.1016/j.psep.2021.08.021.
10. Domingo, J. L., & Nadal, M. (2017). Carcinogenicity of consumption of red meat and processed meat: a review of scientific news since the IARC decision. *Food and chemical toxicology*. 105, 256–261. DOI : 10.1016/j.fct.2017.04.028.
11. Duan, C., Karnik, R., Lu, M.-C., & Majumdar, A. (2012). Evaporation-induced cavitation in nanofluidic channels. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109, 3688–3693 DOI :10.1073/pnas.1014075109.
12. Giacomello, A. (2023). What keeps nanopores boiling. *The journal of chemical physics*. 159 (11), 110902. DOI :10.1063/5.0167530.

13. Hayashi, H. (1989). Drying technologies of foods – their history and future. *Drying technology*, 7 (2), 315–369. DOI: 10.1080/07373938908916590.
14. Huang, X., Margulis, C. J., & Berne, B. J. (2003). Dewetting-induced collapse of hydrophobic particles. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 100, 11953–11958 DOI :10.1073/pnas.1934837100.
15. Jun, Q., Parag, A., Daris, M. J., Rembo, M. B., & Maarten, A. L. S. (2019). A systematic analysis on tomato powder quality prepared by four conductive drying technologies. *Innovative food science. Emerging technologies.* 54, 103 – 112. DOI :10.1016/j.ifset.2019.03.013.
16. Kavokine, N., Netz, R. R., & Bocquet, L. (2021). Fluids at the nanoscale: from continuum to subcontinuum transport. *Annual review. Fluid Mech.* 53, 377–410. DOI :10.1146/annurev-fluid-071320-095958.
17. Khaing Hnin, K., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Zhu, Y. (2018). Emerging food drying technologies with energy-saving characteristics: a review. *Drying technology*, 37 (12), 1465–1480. DOI: 10.1080/07373937.2018.1510417.
18. Labai, V. Y. (1998). *Teplomasoobmin [Heat and mass exchange]*. Lviv: Triada-Plius.
19. Le Donne, A., Tinti, A., Amayuelas, E., Kashyap, H. K., Camisasca, G., Remsing, R. C., Roth, R., Grosu, Y. & Meloni, S. (2022). Intrusion and extrusion of liquids in highly confining media: bridging fundamental research to applications. *Advanced physics.* 7(1), 2052353. DOI :10.1080/23746149.2022.2052353.
20. Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current opinion in food science.* 35, 20–26. DOI : 10.1016/j.cofs.2019.12.001.
21. Matthew, D. Shoulders, & Ronald, T. Raines. (2009). Collagen structure and stability. *Annual review of biochemistry.* 78, 929 – 958. DOI : 10.1146/annurev.biochem.77.032207.120833.
22. Molognoni, L., Daguer, H., Motta, G. E., Merlo, T. C., & Lindner, J. D. (2019). Interactions of preservatives in meat processing: formation of carcinogenic compounds, analytical methods, and inhibitory agents. *Food research international.* 125, 108608. DOI : 10.1016/j.foodres.2019.108608
23. Miaso ta miasni produkty. Metod vyznachennia vmistu volohy (kontrolnyi metod) [Meat and meat products. Method for determination of moisture content (control method)] (ISO 1442:1997, IDT). DSTU ISO 1442:2005. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2007, 9 (In Ukrainian).
24. Musielak, G., Mierzwa, D., & Kroehnke, J. (2016). Food drying enhancement by ultrasound: a review. *Trends in food science & technology.* 56, 126–141. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.08.003.
25. Pak, A. O. (2014). *Rozrobka naukovykh osnov indukovanoho teplo masoobminu ta yoho vykorystannia v protsesakh ta obladnanni kharchovykh vyrobnytstv [Development of scientific foundations for induced heat and mass transfer and its application in the processes and equipment of food production]*. Doctors thesis. Kharkiv (In Ukrainian).
26. Pohozhykh, M. I., Potapov, V. O., Pak, A. O., & Zhrebkin, M. V. (2016). *Enerhoefektyvni tekhnolohii ta tekhnika sushinnia kharchovoi syrovyny [Energy-efficient technologies and equipment for drying food raw materials]*. Kharkiv: KhDUKhT (In Ukrainian).
27. Ramazanov, S., Skrypnyk, V., & Molchanova, N. (2015). Modeliuvannia dynamiky teploprovodnosti v protsesi dvostoronnogo zharennia miasa na osnovi neliniinoi optymizatsii [Modeling of heat conductivity dynamics in the process of two-sided frying meat based nonlinear optimization]. *Technological audit and production reserves.* 3/3(23), 41–47 (In Ukrainian). DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44167.
28. Remsing, R. C., Xi, E., Vembanur, S., Sharma, S., Debenedetti, P. G., Garde, S., & Patel, A. J. (2015). Pathways to dewetting in hydrophobic confinement. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 112, 8181–8186. DOI :10.1073/pnas.1503302112.
29. Riadh, M. H., Siti Anom, B. A., Marhaban, M. H., & Che Soh, A. (2014). Infrared heating in food drying : an overview. *Drying technology.* 33(3), 322 – 335. DOI : 10.1080/07373937.2014.951124.
30. Roth, V., & Kroll, K. M. (2006). Capillary evaporation in pores. *Journal of. physics : condensed matter.* 18, 6517–6530. DOI :10.1088/0953-8984/18/28/007;
31. Salehi, F. (2019). Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: a review. *International journal of fruit science,* 20 (3), 586–602. DOI: 10.1080/15538362.2019.1616243.
32. Skrypnyk, V. O., Myronov, D. A., & Latysh, V. S. (2021). *Rezultaty poperednikh doslidzhen protsesu konduktivnoho sushinnia zharenoho miasa [Results of previous research on the process of conductive drying of roasted meat]*. *Novi tekhnolohii i obladnannia kharchovykh vyrobnytstv.* Poltava: PUET (In Ukrainian).
33. Skrypnyk, V., & Ponomarenko, B. (2022). The possibility of applying of existing methods for the fried meat drying process. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy,* (2), 287–295 (In Ukrainian). DOI: 10.31210/visnyk2022.02.34.
34. Skrypnyk, V. O., Molchanova, N. Yu., Fariseiev, A. H., & Tarasenko, D. S. (2024). *Pidvyshchennia enerhetychnoi i resursnoi efektyvnosti protsesiv i aparativ konduktivnoho zharennia miasa. [Improving the energy and resource efficiency of meat conductive roasting processes and apparatus]*. Poltava: PDAU (In Ukrainian).
35. Tritt, T. M. (2005). *Thermal conductivity: theory, properties, and applications.* Springer science & Business media, New York.
36. Truskett, T. M., Debenedetti, P. G., & Torquato, S. (2001). Thermodynamic implications of confinement for a waterlike fluid. *The journal of chemical physics.* 114, 2401–2418. DOI :10.1063/1.1336569.
37. Zhang, M., Jiang, H., & Lim, R.-X. (2010). Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits, and aquatic products – drying kinetics and quality considerations. *Drying technology,* 28 (11), 1307–1316. DOI: 10.1080/07373937.2010.524591.
38. Zuhair, F. Bhat, James, D. Morton, Alaa El-Din, A. Bekhit, Sunil, K. & Hina, F. Bhat. (2021). Thermal processing implications on the digestibility of meat, fish and seafood proteins. *Comprehensive reviews in food science and food safety.* 20(5), 4511 – 4548. DOI : 10.1111/1541-4337.12802.

**Skrypnyk V. O.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

**Ponomarenko B. G.** Graduate Student, Assistant, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

**Analytical justification of the conductive drying process of meat**

Food products with extended shelf life, including dried meat, are in demand among consumers, particularly in regions affected by conflict with Russia. Disruptions in electricity supply, caused by the destruction of critical infrastructure due to missile attacks, further contribute to an increased demand for such products on a nationwide scale in Ukraine. Consequently, there is a need to explore environmentally friendly and energy-efficient methods for producing dried meat. One such method is conductive (contact) drying. Drying is a technology based on moisture removal from raw materials, complicating microbial development and chemical reactions that lead to food spoilage. Drying has found widespread applications in food technologies, ranging from traditional methods like convective, conductive, microwave drying, or natural drying, to modern techniques such as sublimation, radiation, vacuum drying etc. A scientific approach to studying conductive drying as a method of preserving food raw materials, including meat, involves reviewing theoretical aspects, which are a significant section in the study of this issue, as well as the physics of boiling in confined spaces of very small size – nanopores. This article is dedicated to exploring the theoretical foundations of conductive meat drying, including the analysis of heat and mass transfer processes, the physics of phase transitions on a nanoscale, the specific mechanism of moisture removal, and the influence of meat raw material characteristics on the process. Within the framework of the research, an analytical approach is used to study the interaction between the heating surface and the raw material. The main problem identified during the research lies in the complicated heat exchange between these two elements of the process. The authors consider factors influencing heat flow, analyzing possible ways to solve the identified problem: the first solution to the problem is determining the temperature of the heating surfaces, the second solution involves mechanically removing the layer of superheated vapor formed near the heating surfaces, and the third solution is compressing the raw material with heating surfaces with a certain effort. This article contributes to understanding the peculiarities of conductive drying and serves as a basis for further practical research aimed at optimization and achieving maximum quality and shelf life of food products, including meat.

**Key words:** conductive, drying kinetics, meat, thermal conductivity, nanopores, capillary, heat exchange, moisture content, cavitation.