

СКРИПНИК ВЯЧЕСЛАВ

Полтавський державний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8883-7398>e-mail: [viacheslav.skrypnyk@pdau.edu.ua](mailto:viacheslav.skrypnyk@pdau.edu.ua)

ПОНОМАРЕНКО БОГДАН

Полтавський державний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4047-1881>e-mail: [bohdan.ponomarenko@pdau.edu.ua](mailto:bohdan.ponomarenko@pdau.edu.ua)

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИКИ ВОЛОГОВМІСТУ І ТЕМПЕРАТУРИ В М'ЯСІ ЗА КОНДУКТИВНОГО СУШІННЯ В УМОВАХ СТИСНЕННЯ ДО КРИТИЧНОЇ ТОЧКИ ВОЛОГОВМІСТУ

Сушені продукти користуються значним попитом завдяки збереженню поживних властивостей, тривалому терміну придатності до споживання, а також зручному транспортуванню тощо. Однак процес сушіння харчової сировини часто супроводжується високими витратами енергії. Зниження цих витрат є актуальною задачею у зв'язку із теперішньою ситуацією в енергетиці України. Кондуктивне сушіння є одним із наявних методів, за якого можна знизити споживання енергії, але наразі недостатньо вивчений. Зокрема, сушіння м'яса таким способом в умовах двостороннього підведення теплоти із стисненням відкриває нові можливості для низки досліджень, спрямованих на зниження витрат енергії та скорочення тривалості цього процесу. У цій статті представлено результати експериментів сушіння м'яса різної товщини (0,003 м, 0,005 м та 0,007 м) кондуктивним способом із стисненням його нагрівальними поверхнями із навантаженням 10 кг, 20 кг та 30 кг на протязі першого періоду сушіння, тривав до критичної точки вологовмісту  $W_{кр}$ . Авторами розроблено аналітичну модель такого процесу, встановлено та проаналізовано фактичну кінетику вологовмісту та температури, які продемонстрували схожу з рештою способів динаміку протягом усього процесу. При цьому, отримані дані свідчать про те, що встановлені кінетики є скороченими у часі в умовах стиснення. Визначено, що подальше сушіння із стисненням після досягнення критичної точки  $W_{кр}$  недоцільне, оскільки залишкова волога за таких умов видаляється значно повільніше. Тому стиснення у другому періоді лише збільшує тривалість процесу і підвищує витрати енергії. Результати експериментів показали, що найкращі показники процесу досягалися при товщині зразка  $\delta = 0,003$  м і стисненні із навантаженням  $G = 30$  кг.

Ключові слова: кондуктивний, кінетика, стиснення, вологовміст, температура, сушіння.

VIACHESLAV SKRYPNYK, BOGDAN PONOMARENKO

Poltava state agrarian university

## RESULTS OF DETERMINING THE KINETICS OF MOISTURE CONTENT AND TEMPERATURE IN MEAT DURING CONDUCTIVE DRYING UNDER CONDITIONS OF COMPRESSION TO THE CRITICAL POINT OF MOISTURE CONTENT

Dried products are in high demand due to their preserved nutritional properties, extended shelf life, and ease of transportation. However, the drying process for food materials often involves high energy consumption. Reducing these costs is a pressing issue given the current energy situation in Ukraine. Conductive drying is one of the available methods that can lower energy consumption, but it remains insufficiently studied. In particular, the drying of meat using this method with double-sided heat application under compression opens new opportunities for a range of studies aimed at reducing energy consumption and shortening the process duration. This article presents the results of experiments on drying meat of various thicknesses (0.003 m, 0.005 m, and 0.007 m) using conductive drying with compression by heating surfaces under loads of 10 kg, 20 kg, and 30 kg during the first drying period, which lasted until the critical moisture content  $W_{cr}$ . The authors developed an analytical model for this process and analyzed the actual moisture content and temperature kinetics, which demonstrated dynamics similar to other drying methods throughout the process. The data indicate that the kinetics obtained under compression were shorter in duration. It was determined that further compression drying after reaching the critical moisture point  $W_{cr}$  is impractical since residual moisture is removed significantly more slowly under such conditions. Therefore, compression during the second drying period only prolongs the process and increases energy consumption. The experimental results showed that the best process performance was achieved with a sample thickness of  $\delta=0.003$  m and a compression load of  $G=30$  kg.

Keywords: conductive, kinetics, compression, moisture content, temperature, drying.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та

### її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сучасному етапі розвитку харчової промисловості України особлива увага приділяється впровадженню технологій, що забезпечують підвищення ефективності виробничих процесів та скорочення витрат енергії. Українська держава змушена спрямовувати всі можливі зусилля на економію енергії у всіх ключових галузях, таких як енергетика, промисловість, сільське господарство, транспорт, і, зокрема, харчова промисловість. Нині питання доступності та наявності електроенергії стоїть настільки гостро, як ніколи раніше, що вимагає максимальної мобілізації ресурсів і впровадження енергоощадних технологій для забезпечення стабільності. Виходячи з цього, пріоритетними стають процеси та апарати в харчовій промисловості, які відзначаються низьким споживанням енергії. Адже тільки такі кроки здатні забезпечити стабільність роботи підприємств у цей складний період, що є критично важливим для економіки України. У сушінні одним із наявних методів зневоднення харчової сировини, що забезпечує низьку витрату енергії, є кондуктивний спосіб [4]. Цей процес базується на передачі тепла безпосередньо від нагрітої поверхні до продукту [3,12], при цьому затрати енергії на випромінювання чи конвекцію відсутні. Сушіння м'яса таким

способом забезпечує збереження харчової цінності та органолептичних властивостей. Практичну зацікавленість викликає скорочення тривалості процесу кондуктивного сушіння і зниження витрат енергії за рахунок стиснення сировини нагрівальними поверхнями до настання критичної точки вологовмісту  $W_{кр}$ . В цей проміжок часу видаляється фізико-механічно зв'язана волога [7,10,12,15-16,19,23], її обсяг складає 80...90% від загальної кількості води у м'ясі. Саме ця волога являється основною частиною води, яка видаляється за кондуктивного сушіння на протязі першого періоду, що умовно триває до настання критичного вологовмісту  $W_{кр}$ . Фізико-хімічно зв'язана волога видаляється складніше, її обсяг становить до 5%, а хімічно зв'язана волога практично не видаляється оскільки являється частиною внутрішньоклітинної структури [7,10,16,23]. За настання критичного вологовмісту  $W_{кр}$  у м'ясі залишається фізико-хімічно та хімічно зв'язана волога, якої не вистачає для створення надлишкового тиску пари, через що ця пара долає структурний каркас м'яса і видаляється через бічні поверхні, що не контактують із нагрівальними поверхнями. У зв'язку з цим доцільно продовжувати процес сушіння лише під навантаженням нагрівальної поверхні. Зазначена закономірність була врахована при розробці методики експериментів, що дозволило більш досконало дослідити процес кондуктивного сушіння м'яса.

В умовах максимального заощадження енергоресурсів, в яких сьогодні знаходиться українська держава, а також у контексті попиту на сушене м'ясо, вивчення цього процесу є актуальним.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Одним із ключових викликів є збереження якості готового продукту, яка може погіршуватися в процесі сушіння через взаємодію його із нагрівальними поверхнями. Так, дослідження показують ефективність кондуктивного сушіння для продуктів, що вимагають збереження текстури та поживних речовин [15] у помірному режимі сушіння. Аналогічно цим результатам проведені дослідження [2,6] підтвердили доцільність помірної температури кондуктивного сушіння. На відміну від цього, м'ясо, скоріше за все, не можливо висушити за помірних температур. М'ясо складається на 70-75% з води, процес її виведення з його структури вимагає іншого підходу.

Дослідження, присвячені капілярному випаровуванню, кавітації у замкненому просторі, кипінню рідини в нанопорах [9,11,17,18] є важливими для розуміння механізмів переносу теплоти і маси в складних системах. Подібні явища відбуваються й у структурі м'яса під час його зневоднення, зокрема в процесі кондуктивного сушіння. Ми вважаємо, що у мікроскопічній структурі м'яса спостерігаються схожі процеси. У випадку кондуктивного сушіння м'яса рідина, що утримується в порах та капілярах, змінює свій стан під впливом теплового потоку та стиснення, що є явищем кавітації, а точніше – парової кавітації, що є конкретним її випадком. Більш детально це питання розглянуто в роботі [22]. Процес кондуктивного сушіння м'яса досі залишається недостатньо дослідженим, хоча ця технологія має значний потенціал з точки зору науки.

#### Формування цілей статті

Метою цього дослідження було визначення раціональної товщини м'яса, встановлення кінетики вологовмісту та температури в поверхневому шарі м'яса під час кондуктивного сушіння в умовах стиснення, що тривало до настання критичної точки вологовмісту  $W_{кр}$ , а також оцінка впливу стиснення на показники процесу та якість висушеного продукту.

#### Виклад основного матеріалу

Для досягнення мети роботи використовувався експериментальний метод досліджень. Низка експериментів проводилася на стенді (рис.1), що був розроблений на кафедрі механічної та електричної інженерії інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету.

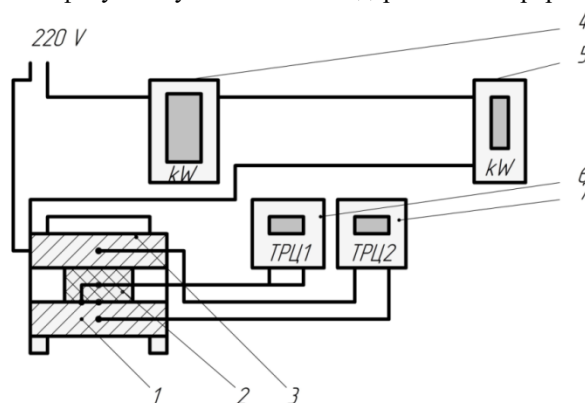


Рис. 1. Схема експериментального стенду для дослідження процесів кондуктивного сушіння м'яса.

1 – нижня нагрівальна поверхня контактної грилю; 2 – верхня нагрівальна поверхня контактної грилю; 3 – дослідний зразок; 4 – однофазний лічильник електроенергії «Сиргум S121Н»; 5 – монітор-лічильник електроенергії «Smart-maic D101»; 6 – прилад «ТРЦ 02 Універсал плюс», що визначає температуру дослідного зразка; 7 – прилад «ТРЦ 02 Універсал плюс», що регулює температуру нижньої та верхньої нагрівальних плит

Стенд включає електричний контактний гриль моделі «Frosty SP-1A3», який забезпечує двостороннє нагрівання сировини за допомогою двох нагрівальних поверхонь (верхньої та нижньої). Температура нагрівальних поверхонь регулюється через прилад «ТРЦ 02 Універсал плюс» за допомогою двох температурних датчиків «pt 100», встановлених у геометричних центрах верхньої та нижньої нагрівальних

поверхонь. Енергоспоживання реєструється за допомогою лічильника електроенергії «Сиргум S121H» та монітора-лічильника електроенергії «Smart-maic D101», що дозволяє відстежувати, реєструвати та візуалізувати зміни споживання енергії і параметри електричної мережі. Маса зразків вимірюється аналітичними вагами «AXIS AD-600» з точністю до  $10^{-5}$  кг. Тривалість процесу кондуктивного сушіння фіксується за допомогою секундоміра, а температура на поверхні чи всередині зразків контролюється приладом «ТРЦ 02 Універсал плюс» за допомогою двох термодар ХК-0,5, які вводяться в поверхневий або внутрішній шар зразків.

Дослідні зразки, які виготовлено із найдовшого м'язу свинини, мали наступні розміри: зразок №1 –  $0,07 \times 0,04 \times 0,003$  м; зразок №2 –  $0,07 \times 0,04 \times 0,005$  м; зразок №3 –  $0,07 \times 0,04 \times 0,007$  м.

Дослідження проводили із зразками в умовах стиснення між нагрівальними поверхнями, нагрітими до температури  $130^{\circ}\text{C}$ . Таку температуру було обрано, щоб уникнути утворення канцерогенних сполук [8,13-14,20,21]. Стиснення здійснювали шляхом розміщення гир масою 10 кг, 20 кг і 30 кг на верхній нагрівальній плиті на протязі першого періоду, за якого видалялася механічно-зв'язана волога [7,10,12,15-16]. Межею виведення механічно-зв'язаної вологи та кінця першого періоду вважали згасання характерного звуку та припинення випаровування, що спостерігалось візуально. Стиснення призводило до створення надлишкового тиску пари в поверхневих шарах зразків на початку процесу відповідно  $p = 35,03$  кПа,  $p = 70,07$  кПа та  $p = 105,12$  кПа. У міру зневоднення зразків надлишковий тиск поступово зменшувався. Тому основним параметром в експериментах обрано масу навантаження, що включала масу верхньої плити та гир 10 кг, 20 кг та 30 кг.

Для визначення початкового вологовмісту  $W_n$  зразок товщиною 0,003 м зважили на вагах, висушили його в сушильній шафі до постійної маси, після остигання зважили ще раз. Значення вологовмісту обчислили як відношення різниці між початковою масою зразка  $m_1$  і кінцевою масою зразка  $m_2$  до початкової маси зразка  $m_1$ , помножене на 100% [1], при розрахунках не враховувались маса чаші, піску і скляної палички.

Для визначення послідуочого вологовмісту  $W$  наступний сирий зразок товщиною  $\delta = 0,003$  м розміщували на нижній нагрівальній поверхні контактного грилю, встановлювали термодари в його поверхневий шар і накривали верхньою поверхнею, після чого додавали гирі масою 10 кг на верхню плиту. Через 25 секунд зразок діставали, одночасно фіксуючи температуру в його поверхневому шарі. Після охолодження зразок зважували і досушували до постійної маси в сушильній шафі, після чого знову зважували. Наступні зразки з тією ж товщиною  $\delta = 0,003$  м піддавали сушінню, збільшуючи тривалість процесу кожного наступного на 25 с. Протягом процесу сушіння додатково фіксувалась тривалість характерного звуку, що супроводжувався випаровуванням. В той момент, коли звук згасав, а пари більше не спостерігалось, гирі прибирали з верхньої плити та продовжували процес зневоднення в умовах стиснення, створене масою верхньої нагрівальної поверхні.

Для оцінки якості висушеного продукту та визначення витрати енергії було додатково проведено сушіння зразків відповідно до зазначеної методики та встановленої тривалості процесу. Витрату енергії визначали за різницею показників лічильника електроенергії, а якість готового продукту оцінювали за 5-бальною шкалою, наведеною в таблиці 1.

Таблиця 1

#### Органолептична оцінка якості сушеного м'яса

Показник	5 балів	4 бали	3 бали	2 бали	1 бал
Зовнішній вигляд	Однорідна поверхня, без деформації	Незначна деформація	Нерівні краї, тріщини	Суттєва деформація	Виріб безформний
Консистенція	Щільна, пружна, легко ріжеться	Трохи сухувата, але пружна	Трохи жорстка або ламка	Жорстка або крихка	Дуже жорстка
Запах	Насичений, виразний аромат сушеного м'яса	Легкий, виразний аромат	Нейтральний, без вираженого аромату	Слабкий неприємний запах підгорілості	Різкий неприємний запах підгорілості
Смак	Насичений, приємний, без сторонніх присмаків	Приємний, але менш насичений	Ненасичений, слабковиражений	Слабовиражений із підгорілим присмаком	Насичений підгорілий присмак
Колір	Рівномірний коричневий або коричнево-червоний відтінок з легким блиском	Рівномірний коричневий або коричнево-червоний відтінок	Рівномірний світло-коричневий	Коричневий із темними ділянками, в т.ч., по краях виробу	Темно-коричневий із чорними ділянками, в т.ч., по краях виробу

Для отримання достовірних та максимально точних даних дослід проводили у триразовій повторюваності.

Новий зразок товщиною  $\delta = 0,003$  м сушили за такою ж послідовністю із накладанням гир вагою 20 кг.

Новий зразок товщиною  $\delta = 0,003\text{м}$  сушили за такою ж послідовністю із накладанням гир вагою 30 кг. Сушіння дослідних зразків товщиною  $\delta = 0,005\text{м}$  та  $\delta = 0,007\text{м}$  проводилися за аналогічною методикою.

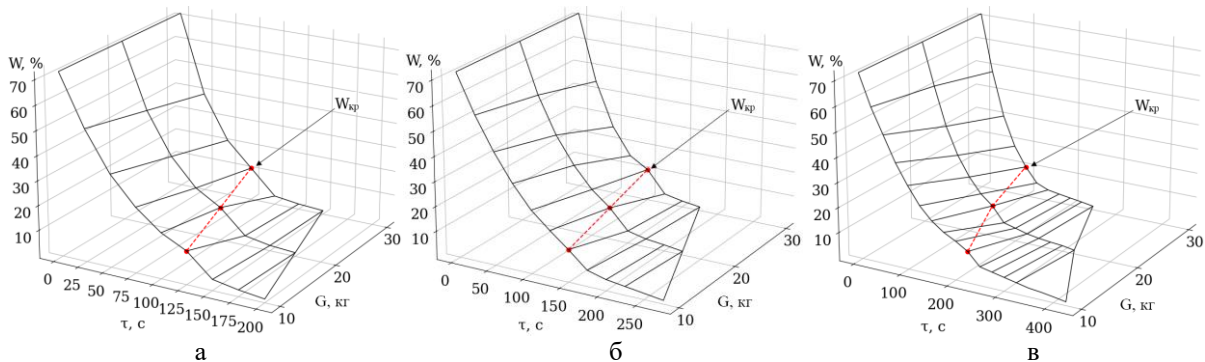
В результаті проведених досліджень встановлені значення вологовмісту дослідних зразків, які зведено в таблиці 2.

Таблиця 2.

**Вологовміст дослідних зразків за кондуктивного сушіння**

$\tau, \text{с}$	$\delta = 0,003 \text{ м}$			$\delta = 0,005 \text{ м}$			$\delta = 0,007 \text{ м}$		
	10 кг	20 кг	30 кг	10 кг	20 кг	30 кг	10 кг	20 кг	30 кг
0	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5
25	52	46	40	57	52	45	60	55,5	49
50	36	29	22	44	37	27	50	40	31
75	25	18	12	33	26	16	40	29	19
100	17	11,5	2	24	17,5	11,5	32	21	12,5
125	12	2,5	0,7	17,5	11,5	2,5	25	15	5
150	3	0,7	0	12,5	3,5	1	20	11	3
175	1,2	0		5	1,8	0	16,5	5	2,2
200	0			3	1		14	3,8	1,5
225				2	0		11	2,5	0,8
250				1			6	1,7	0
275				0			5	1,2	
300							4	0,8	
325							3	0	
350							2		
375							1,5		
400							0,8		
425							0		

Вологовміст, встановлений експериментальним шляхом, дає змогу відобразити фактичну кінетику вологовмісту, представлену на рис. 2.



**Рис. 2. Фактична кінетика вологовмісту дослідних зразків**  
**а – товщина 0,003м; б – товщина 0,005м; в – товщина 0,007м**

Результати експериментального визначення зміни температури у поверхневому шарі дослідних зразків зведено в таблиці 3.

Таблиця 3

**Температура дослідних зразків за кондуктивного сушіння**

$\tau, \text{с}$	$\delta = 0,003 \text{ м}$			$\delta = 0,005 \text{ м}$			$\delta = 0,007 \text{ м}$		
	10 кг	20 кг	30 кг	10 кг	20 кг	30 кг	10 кг	20 кг	30 кг
0	8	8	8	8	8	8	8	8	8
25	103	105	108	102	104	107	101	103	106
50	106,5	110	113,5	105	107,5	112	103	108	112
75	110	114,5	119	107,5	111,5	117	105	110,5	116
100	114	118,5	124	111	115	121	107,5	113	119
125	117,5	123	127	114,5	119	124,5	109	115	121
150	121,7	126	129	117	122	127	111	117	123
175	124,5	129		120	124,5	128	112,5	119	125
200	128			122	126,5		114	122	126
225				124	128		115	123	127
250				126			117	124,5	128

$\tau$ , с	10 кг	20 кг	30 кг	10 кг	20 кг	30 кг	10 кг	20 кг	30 кг
275				128			119	126	
300							121	127	
325							122	128	
350							124		
375							125		
400							126,5		
425							128		

Температура, встановлена експериментальним шляхом, дає змогу відобразити фактичну кінетику температури у поверхневому шарі дослідних зразків. Як видно з таблиці 3, температура суттєво не змінюється для усіх дослідних зразків, різниця полягає тільки у часі, тому на рис. 3 представлено кінетику температури дослідних зразків середньої товщини 0,005 м.

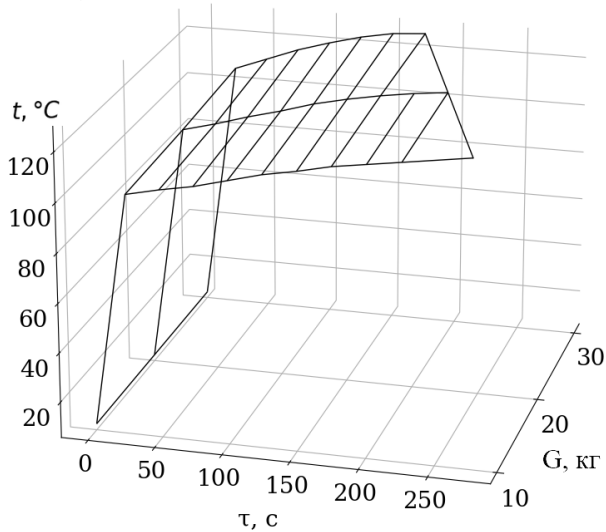


Рис. 3. Фактична кінетика температури у поверхневому шарі дослідних зразків товщиною 0,005м

Результати визначення маси висушених зразків, кількість видаленої вологи, витрати енергії на процес кондуктивного сушіння представлено в таблиці 4.

Таблиця 4

**Показники процесу кондуктивного сушіння дослідних зразків**

Найменування показника	Зусилля стиснення зразка товщиною 0,003м, кг			Зусилля стиснення зразка товщиною 0,005м, кг			Зусилля стиснення зразка товщиною 0,007м, кг		
	10	20	30г	10	20	30	10	20	30
Тривалість, с	200	175	150	275	225	175	425	325	250
Початкова маса зразка, кг	0,018			0,020			0,022		
Маса висушеного зразка, кг	0,0056	0,0041	0,0034	0,0061	0,0043	0,0032	0,0062	0,0046	0,0035
Кількість видаленої вологи, кг	0,0124	0,0139	0,0146	0,0139	0,0157	0,0168	0,0158	0,0174	0,0185
Питома витрата енергії, кВт·год./1 кг випареної вологи	0,48	0,4	0,39	0,49	0,44	0,41	0,56	0,45	0,44
Тривалість характерного звуку	122	97	72	151	123	101	173	147	121

Результати органолептичної оцінки, що проводилася після остигання готових сушених виробів, зведені в таблиці 5.

## Результати органолептичної оцінки готових сушених виробів

Товщина дослідного зразка, м	Оцінка в балах		
	10кг	20кг	30кг
0,003	3,8	4,1	4,3
0,005	3,4	3,6	4,0
0,007	3,0	3,2	3,3

Розглянемо фактичну кінетику температури дослідних зразків. На всіх кривих спостерігається швидке підвищення температури на початку процесу і поступове вирівнювання температури у подальшому процесі, де значення температури в кінці процесу досягає значення, близького до температури нагрівальних поверхонь. За даними авторів [5] температура у поверхневому шарі м'яса швидко досягає значення 100 °С, оскільки тепло передається безпосередньо через контакт із нагрівальною поверхнею. Це підтверджується усіма експериментальними даними (табл. 3). На цьому етапі тепловий потік інтенсивний, оскільки різниця температур між нагрівальною поверхнею та внутрішніми шарами зразка максимальна. Разом з цим, в експериментальних даних спостерігається залежність тривалості нагрівання  $\tau$  від товщини зразка  $\delta$ . У зразках товщиною  $\delta = 0,003$  м процес нагрівання швидший, ніж у зразках товщиною  $\delta = 0,007$  м (табл. 3).

У подальшому видно, що криві вирівнюються, і процес підвищення температури сповільнюється (рис. 3). Це можна пояснити наступним чином: після досягнення температури 100 °С рідина закипає у структурі м'яса. За умов  $t = 100^\circ\text{C}$  при атмосферному тиску  $P = 1$  атм, відбувається фазовий перехід рідини в пару, що являється явищем кавітації [9,22]. В цей час тепла енергія витрачається на фазовий перехід і відбувається зменшення вмісту вологи у м'ясі, яка видаляється через поверхневі шари у вигляді пари. Ймовірно, температура стабілізується на рівні, близькому до температури кипіння води і продовжує повільне зростання, в тому числі і після досягнення  $W_{кр}$ , наближаючись до температури нагрівальних поверхонь. Для всіх зразків на початку процесу спостерігається стрімке підвищення температури до 100°C, у першому періоді температура підтримується близькою до температури кипіння води із незначним стабільним зростанням, оскільки тепла енергія використовується на фазовий перехід, а у другому періоді, коли фазовий перехід майже відсутній, температура продовжує підвищуватись, досягаючи значення близькому температурі нагрівальних поверхонь. Також, спостерігається закономірність: із збільшенням стиснення, викликане навантаженням  $G = 10 \dots 30$  кг відбувається інтенсивніше зростання температури для усіх зразків.

Проаналізуємо кінетику вологовмісту дослідних зразків. Як видно з графіків (рис. 2), зразки товщиною  $\delta = 0,003$  м швидше досягають кінцевого вологовмісту, при чому збільшення стиснення, зумовлене масою навантаження  $G = 10 \dots 30$  кг суттєво скорочує процес. Для зразків товщиною  $\delta = 0,005$  м і  $\delta = 0,007$  м тривалість сушіння збільшується, що свідчить про вплив товщини шару м'яса на тривалість процесу. Однак у всіх випадках найкоротша тривалість процесу досягається при максимальному стисненні, що створювалось навантаженням масою  $G = 30$  кг. Хоча кінцевий вологовміст є однаковим і складає  $W_k = 6\%$  незалежно від стиснення, викликане навантаженням  $G$ , збільшення маси навантаження в межах  $G = 10 \dots 30$  кг інтенсифікує процес кондуктивного сушіння для усіх зразків.

Фактичні криві вологовмісту мають експоненційний характер. Кожен графік демонструє типове для процесу сушіння зниження вологовмісту, але є скороченими у часі в умовах стиснення. Із початку процесу спостерігається інтенсивне зниження вологовмісту, що триває до критичної точки  $W_{кр}$ , яка замірювалась протягом експериментів. Критична точка визначалась на основі двох факторів: характерного звуку, який супроводжує кипіння рідини у структурі м'яса [9,11,17-18] та візуального спостереження за випаровуванням. Тривалість цього характерного звуку  $\tau_{зв}$  змінювалась залежно від товщини зразків  $\delta$  і маси навантаження  $G$ . Для зразків товщиною  $\delta = 0,003$  м тривалість складала  $\tau_{зв} = 122$  с при стисненні, викликане навантаженням масою  $G = 10$  кг,  $\tau_{зв} = 97$  с при  $G = 20$  кг та  $\tau_{зв} = 51$  с при  $G = 30$  кг. У зразках товщиною  $\delta = 0,005$  м ці показники становили:  $\tau_{зв} = 151$  с при  $G = 10$  кг,  $\tau_{зв} = 112$  с при  $G = 20$  кг та  $\tau_{зв} = 78$  с при  $G = 30$  кг. Найбільшу тривалість зафіксовано у зразків товщиною  $\delta = 0,007$  м:  $\tau_{зв} = 173$  с при  $G = 10$  кг,  $\tau_{зв} = 139$  с при  $G = 20$  кг та  $\tau_{зв} = 117$  с при  $G = 30$  кг. Це пояснюється тим, що на етапі прогрівання сировини та протягом першого періоду кондуктивного сушіння видаляється фізико-механічно зв'язана волога, видалення якої, скоріше за все, є межею, тобто критичною точкою, після якої протягом другого періоду кондуктивного сушіння видаляється хімічно та фізико-хімічно зв'язана волога [7,12,15,19], видалити яку складно, тому і процес зневоднення стає значно повільнішим. Із зменшенням кількості вологи у структурі м'яса надлишковий тиск пари також знижується навіть при максимальному стисненні, викликане навантаженням масою  $G = 30$  кг, а тому стиснення після критичної точки  $W_{кр}$  не інтенсифікує процес зневоднення м'яса.

Очевидно, що від початкового вологовмісту  $W_{поч.} = 72,5\%$  до вологовмісту  $W = 11\%$ , тобто до моменту зняття навантаження, фактична кінетика відповідає аналітичній моделі у вигляді модифікованої експоненти, яка враховує вплив навантаження в діапазоні  $0 \dots 30$  кг:

$$W = W_{поч.} \cdot ((0,989 - 0,0005 \cdot G) + \delta_m)^t, \% \quad (1)$$

де:  $W_{поч.}$  – початковий вологовміст, кг/кг;

$\delta_m$  – початкова товщина дослідного зразка, м;

$G$  – маса додаткового навантаження під час сушіння, кг;

0,0005 – коефіцієнт, що враховує деформацію м'яса під час сушіння під навантаженням.

Після зняття навантаження під час подальшого сушіння спостерігається різкий спад вологовмісту з  $W = 11\%$  до  $W = 6\%$ . Різде зниження вологовмісту пояснюється зняттям навантаження, що, в свою чергу, приводить до миттєвого скидання надлишкового тиску пари з м'яса в навколишнє середовище і викликаної конденсації її залишку всередині м'яса. Через те, що капіляри і пори всередині м'яса мають температуру конденсації, а в поверхневих шарах м'яса і більшу, пара на них не може конденсуватися. Вона може конденсуватися лише там, де є відведення теплоти. Це може бути лише паро-рідинна суміш фізико-хімічно зв'язаної вологи, що залишається в м'ясі. Це призводить до її часткового випарування і виведення в навколишнє середовище. Як видно з табл. 2 та рис. 2, такий процес відбувається практично лінійно протягом 25 с для всіх зразків м'яса. Апроксимація падіння вологовмісту з  $W = 11\%$  до  $W = 6\%$  для всіх дослідних зразків з достовірністю 95% дає лінійну залежність у вигляді

$$W = -(0,2 + \delta_m) \cdot \tau + 11, \% \quad (2)$$

де  $0,2$  – кінетичний коефіцієнт;  
 $11$  – вологовміст під час зняття навантаження, %.

Подальше висушування дослідних зразків від вологовмісту  $W = 6\%$  до рівнозначного, прийнятого за  $W = 0\%$ , здійснюється за аналітичною моделлю кінетики сушіння без навантаження, яка наведена в роботі [24], у вигляді модифікованої експоненти

$$W = W_{\text{поч}} \cdot (0,989 + \delta_m)^\tau, \% \quad (3)$$

де  $W_{\text{поч}}$  – початковий вологовміст, кг/кг;  
 $0,989$  – кінетичний коефіцієнт.

Таким чином, кондуктивне сушіння під навантаженням та його зняттям після виведення вільної вологи складається з трьох періодів:

- виведення фізико-механічно зв'язаної вологи, що включає в себе вільну та капілярну вологи;
- зняття навантаження і конденсація пари в паро-рідинну суміш;
- досушування до кінцевого або рівнозначного вологовмісту.

Для аналітичного опису процесу кондуктивного сушіння м'яса розглянемо схематичне зображення такого процесу, що ілюструє зазначені періоди сушіння відповідно до умов стиснення (рис. 4):

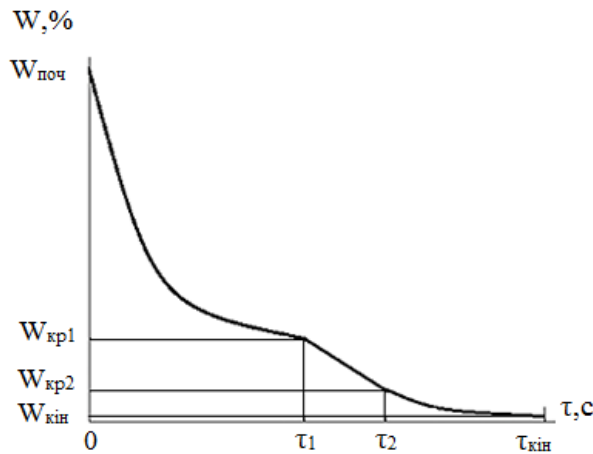


Рис.4. Схематична кінетика вологовмісту

На рис. 4. виведення вільної та капілярної вологи відбувається до критичної точки вологовмісту  $W_{\text{кр1}} = 11\%$ , що триває від початку процесу до  $\tau_1$ . Після зняття навантаження, як було зазначено, відбувається різкий спад вологовмісту з  $W_{\text{кр1}}$  до  $W_{\text{кр2}} = 6\%$ . Цей процес відбувається у часовому проміжку  $\tau_1 - \tau_2$ . Нарешті, досушування до кінцевого  $W_{\text{кін}}$  або рівнозначного  $W_p$  вологовмісту відбувається без стиснення, під навантаженням лише верхньої нагрівальної поверхні у часовому проміжку  $\tau_2 - \tau_{\text{кін}}$ .  $W_{\text{кін}}$  визначається умовами досліджень. Досушування до рівнозначного вологовмісту  $W_p$  також можливе. За рівнозначний вологовміст у м'ясі ми вважаємо такий його стан, за якого швидкість випаровування вологи з його поверхні вирівнюється із швидкістю поглинання вологи з навколишнього середовища. У цьому стані парціальний тиск водяної пари над м'ясом дорівнює парціальному тиску водяної пари в оточуючому середовищі, що створює умови динамічної рівноваги, за яких подальше зменшення вологовмісту неможливе без зміни умов сушіння, і є недоцільним.

Аналітично процес кондуктивного сушіння м'яса із стисненням із подальшим його зняттям можна представити у вигляді:

$$W = \begin{cases} W_{\text{поч}} \cdot (0,989 - 0,0005 \cdot G + \sigma_m)^\tau, & 0 \leq \tau \leq \tau_1; \\ -(0,2 + \sigma_m) \cdot (\tau - \tau_1) + W_{\text{кр1}}, & \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2; \\ W_{\text{кр2}} \cdot (0,989 + \sigma_m)^{\tau - \tau_2}, & \tau_2 \leq \tau \leq \tau_{\text{кін}}. \end{cases} \quad (4)$$

Де  $\tau_1 = \frac{\ln W_{\text{кр1}} - \ln W_{\text{поч}}}{\ln(0,989 + \sigma_m - 0,0005 \cdot G)}$ ;  
 $\tau_2 = \frac{W_{\text{кр1}} - W_{\text{кр2}}}{0,2 + \sigma_m} + \tau_1$ ;

$$\tau_{\text{кін}} = \frac{\ln W_{\text{кін}} - \ln W_{\text{кр}2}}{\ln(0,989 + \sigma_m)} + \tau_2.$$

Таким чином, інтенсивне видалення вологи спостерігалось протягом першого періоду кондуктивного сушіння, що тривав до критичної точки вологовмісту  $W_{\text{кр}}$ . У подальшому процесі, інтенсивність зневоднення значно знизилася. Відповідно до класифікації форм зв'язку вологи із матеріалом [7,10,12,15,16,19,23], хімічно зв'язану та фізико-хімічно зв'язану вологу видалити складно. Натомість видалається фізико-механічно зв'язана волога, що включає в себе капілярну та вільну вологу. Зазначений вид вологи видалається із структури м'яса на протязі першого періоду. Межею такого зневоднення є критична точка  $W_{\text{кр}}$ , після якої спостерігалось зниження інтенсивності зневоднення та повільне підвищення температури у поверхневому шарі м'яса.

На основі результатів проведених експериментальних досліджень та їх аналізу встановлено наступне: оскільки найвищі бали за результатами органолептичної оцінки та витрата енергії виявилась найнижчою у зразка товщиною  $\delta = 0,003\text{м}$ , то раціональною товщиною м'яса вважаємо  $0,003\text{м}$ , а стиснення, що викликане масою навантаження  $G = 30\text{ кг}$  максимально інтенсифікує процес кондуктивного сушіння м'яса. Дослідження показали, що інтенсифікація доцільна лише на протязі часу, поки у структурі м'яса утримується вільна волога, тобто під час першого періоду.

#### Висновки з даного дослідження та перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Експериментальним шляхом встановлено та проаналізовано фактичну кінетику вологовмісту та температури у м'ясі за кондуктивного сушіння. Отримані експериментальні криві виявилися схожими із теоретичними, демонструючи очікувану динаміку зміни вологовмісту та температури. При цьому вони мають експоненційний вигляд, але характеризуються скороченим часовим проміжком, що пояснюється особливостями теплопередачі та зневоднення в умовах стиснення. Запропоновано нову аналітичну модель процесу кондуктивного сушіння, що складається із трьох періодів. Результати досліджень виявили найвищі бали оцінки якості готового продукту, найкоротшу тривалість процесу та найнижчу витрату енергії у зразка товщиною  $0,003\text{м}$ . При цьому, стиснення, викликане навантаженням масою  $30\text{ кг}$ , максимально інтенсифікує процес кондуктивного сушіння. Дослідження показали, що інтенсифікація процесу доцільна лише на протязі першого періоду кондуктивного сушіння до критичної точки  $W_{\text{кр}}$ . Подальші розробки будуть спрямовані на розробку та конструювання апарата, що забезпечить перебіг процесу кондуктивного сушіння м'яса виходячи із результатів експериментальних досліджень.

#### Література

1. ДСТУ ISO 1442:2005. М'ясо та м'ясні продукти. Метод визначення вмісту вологи (контрольний метод) (ISO 1442:1997, IDT). [Чинний від 2008-03-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 9 с.
2. Онищенко В. М., Янчева М. О., Пак А. О., Онищенко А. В. Дослідження процесу кондуктивного сушіння півки багатофункціонального призначення із кишкової сировини. *Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини*: тези доп. Всеукр. науково-практ. конф. Харків: ДБТУ, 2023. С. 31 – 32
3. Погожих М. І., Потапов В. О., Пак А. О., Жеребкін М. В. Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини: навч. посібник. Харків: ХДУХТ, 2016. 234 с
4. Скрипник В. О., Пономаренко Б. Г. Можливість використання наявних способів для сушіння жареного м'яса. *Вісник ПДАА*. 2022. № 2. С. 287–295.
5. Скрипник В. О., Молчанова Н. Ю., Фарісеєв А. Г., Тарасенко Д. С. Підвищення енергетичної і ресурсної ефективності процесів і апаратів кондуктивного жарення м'яса: монографія. Полтава: ПДАУ, 2024. 274 с.
6. Шеїна А. В. Особливості сушіння картопляного пюре кондуктивним способом та в полі ІЧ-випромінювання. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2018. № 2 (37). С. 81 – 87.
7. Barbosa-Canovas G. V., Vega-Mercado H. Dehydration of Foods. New York: Springer, 1996. 330 p.
8. Cross A. J., Sinha R. Meat-related mutagens/carcinogens in the etiology of colorectal cancer. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2004. Vol. 44, No. 1. P. 44 – 55.
9. Giacomello A. What keeps nanopores boiling. *The journal of chemical physics*. 2023. Vol. 159, No 11.
10. Gibson M. Food science and the culinary arts. London: Academic Press, 2018. 528 p.
11. Kavokine N., Netz R. R., Bocquet L. Fluids at the nanoscale: from continuum to subcontinuum transport. Annual review. *Fluid Mechanics*. 2021. Vol. 53. P. 377 – 410.
12. Mujumdar Arun S. *Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton: CRC Press, 2014. 1348 p.
13. Nadeem H. R., Akhtar S., Ismail T., Sestili P., Lorenzo J. M., Ranjha M. M. A. N., Jooste L., Hano C., Aadil R. M. Heterocyclic aromatic amines in meat: formation, isolation, risk assessment, and inhibitory effect of plant extracts. *Foods*. 2021. Vol. 10, No. 7. 1466.
14. Pogorzelska-Nowicka E., Kurek M., Hanula M., Wierzbicka A., Poltorak A. Formation of carcinogens in processed meat and its measurement with the usage of artificial digestion – a review. *Molecules*. 2022. Vol. 27, No 14. 4665.
15. Qiu J. Mild conductive drying of foods: PhD dissertation / Wageningen University and Research. Wageningen, 2019. 195 p.
16. Ratti C. *Advances in food dehydration*. Boca Raton: CRC Press, 2009. 467 p.



17. Remsing R. C., Xi E., Vembanur S., Sharma S., Debenedetti P. G., Garde S., Patel A. J. Pathways to dewetting in hydrophobic confinement. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2015. Vol. 112. P. 8181 – 8186.
18. Roth V., Kroll K. M. Capillary evaporation in pores. *Journal of physics: condensed matter.* 2006. Vol 18. P. 6517 – 6530.
19. Sharma, B. O. *Meat and meat products technology (including poultry products technology)*. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers, 1999. 139 p.
20. Sinha R., Rothman N., Salmon C. P., Knize M. G., Brown E. D., Swanson C. A., Rhodes D., Rossi S., Felton J. S., Levander O. A. Heterocyclic amine content in beef cooked by different methods to varying degrees of doneness and gravy made from meat drippings. *Food and chemical toxicology.* 1998. Vol. 36, No. 4. P. 279 – 287.
21. Skog K. I., Johansson M. A., Jägerstad M. I. Carcinogenic heterocyclic amines in model systems and cooked foods: a review on formation, occurrence and intake. *Food and chemical toxicology.* 1998. Vol. 36, No. 9 – 10. P. 879 – 896.
22. Skrypnyk V. O., Ponomarenko B. G. Analytical justification of the conductive drying process of meat. *Bulletin of Sumy National Agrarian University.* 2024. Vol 2, No 56. P. 79 – 85.
23. Vaclavik V., Christian E. *Essentials of food science* (4th ed.). New York: Springer, 2014. 495 p.
24. Viacheslav O. Skrypnyk, Anatolii O. Semenov, Bogdan H. Ponomarenko, Andrii H. Farisieiev. Mechanism of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. *Journal of Chemistry and Technologies,* 2024. Vol. 32, No 1. P. 89 – 98.

### References

1. International Organization for Standardization. (2023). Meat and meat products – Determination of moisture content (Reference method). <https://www.iso.org/standard/82664.html>.
2. Onishchenko, V. M., Yancheva, M. O., Pak, A. O., & Onishchenko, A. V. (2023). Doslidzhennia protsesu konduktivnoho sushinnia plivky bahatofunktionalnogo pryznachennia iz kyshkovoi syrovynny [Study of the process of conductive drying of a multifunctional film made from intestinal raw materials]. *Problemy enerhoefektyvnosti ta yakosti v protsesakh sushinnia kharchovoi syrovynny: tezy dopovidei Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii.* Kharkiv, Ukraine: DBTU. 31 – 32 [in Ukrainian].
3. Pohozhykh, M. I., Potapov, V. O., Pak, A. O., & Zherebkin, M. V. (2016). Enerhoefektyvni tekhnologii ta tekhnika sushinnia kharchovoi syrovynny. [Energy-efficient technologies and equipment for drying food raw materials]. Kharkiv: KhDUKhT [in Ukrainian].
4. 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.
5. Skrypnyk, V. O., Molchanova, N. Yu., Farisieiev, A. H., & Tarasenko, D. S. (2024). Pidvyshchennia enerhetichnoi 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].
6. Sheina, A. V. (2018). Osoblyvosti sushinnia kartoplanoho piure konduktivnym sposobom ta v poli IR-vyprynimuvannia [Characteristics of conductive drying and infrared radiation drying of mashed potatoes]. *Obladnannia ta tekhnologii kharchovykh vyrobnystv.* 2(37), 81 – 87.
7. Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of Foods*. New York, NY: Springer.
8. Cross, A. J., & Sinha, R. (2004). Meat-related mutagens/carcinogens in the etiology of colorectal cancer. *Environmental and molecular mutagenesis.* 44(1), 44–55. DOI: 10.1002/em.20030.
9. Giacomello, A. (2023). What keeps nanopores boiling. *The journal of chemical physics.* 159 (11), 110902. DOI :10.1063/5.0167530
10. Gibson, M. (2018). *Food Science and the Culinary Arts*. London: Academic Press.
11. 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.
12. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
13. Nadeem, H. R., Akhtar, S., Ismail, T., Sestili, P., Lorenzo, J. M., Ranjha, M. M. A. N., Jooste, L., Hano, C., & Aadil, R. M. (2021). Heterocyclic aromatic amines in meat: formation, isolation, risk assessment, and inhibitory effect of plant extracts. *Foods.* 10(7), 1466. DOI: 10.3390/foods10071466.
14. Pogorzelska-Nowicka, E., Kurek, M., Hanula, M., Wierzbicka, A., & Poltorak, A. (2022). Formation of Carcinogens in Processed Meat and Its Measurement with the Usage of Artificial Digestion-A Review. *Molecules.* 27(14), 4665. DOI: 10.3390/molecules27144665.
15. Qiu, J. (2019). *Mild conductive drying of foods.* *Candidates thesis.* Wageningen.
16. Ratti, C. (2009). *Advances in food dehydration.* Boca Raton, FL: CRC Press.
17. 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.
18. 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.
19. Sharma, B. O. (1999). *Meat and Meat Products Technology (Including Poultry Products Technology)*. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers.
20. Sinha, R., Rothman, N., Salmon, C. P., Knize, M. G., Brown, E. D., Swanson, C. A., Rhodes, D., Rossi, S., Felton, J. S., & Levander, O. A. (1998). Heterocyclic amine content in beef cooked by different methods to varying degrees of doneness and gravy made from meat drippings. *Food and chemical toxicology.* 36 (4), 279 – 287. DOI: 10.1016/s0278-6915(97)00162-2.
21. Skog, K. I., Johansson, M. A., & Jägerstad, M. I. (1998). Carcinogenic heterocyclic amines in model systems and cooked foods: a review on formation, occurrence and intake. *Food and chemical toxicology.* 36(9-10), 879–896. DOI: 10.1016/s0278-6915(98)00061-1.
22. Skrypnyk, V. O., & Ponomarenko, B. G. (2024). Analytical justification of the conductive drying process of meat. *Bulletin of Sumy National Agrarian University.* 2 (56), 79 – 85. DOI: 10.32782/msnau.2024.2.11.
23. Vaclavik, V., & Christian, E. (2014). *Essentials of Food Science* (4th ed.). New York: Springer.
24. Skrypnyk, V. O., Semenov, A. O., Ponomarenko, B. H., & Farisieiev, A. H. (2024). Mechanism of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. *Journal of Chemistry and Technologies.* 32(1), 89 – 98. DOI: 10.15421/jchemtech.v32i1.285130.