

ELECTRICAL ENGINEERING

РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ВЛИВУ ВОЛОГОВМІСТУ НА ПОТІК РЕЧОВИНИ В М'ЯСІ ПІД КОМБІНОВАНОЮ ДІЄЮ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ І ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Скрипник В.О.,

*Доктор технічних наук,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавського державного аграрного університету, Україна*

Семенов А.О.,

*Кандидат фізико-математичних наук,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавського державного аграрного університету, Україна*

Бичков Я.М.,

*Кандидат технічних наук,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавського державного аграрного університету, Україна*

Фарісєєв А.Г.

*Кандидат технічних наук,
доцент кафедри харчових технологій
Дніпровського національного університету ім. О. Гончара, Україна*

RESULTS OF DETERMINING THE INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT ON THE FLOW OF SUBSTANCES IN MEAT UNDER THE COMBINED ACTION OF HEAT FLOW AND ELECTRIC CURRENT

Skrypnyk V.,

*Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering at
Poltava State Agrarian University, Ukraine*

Semenov A.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering at Poltava State Agrarian University, Ukraine

Bychkov Y.,

Candidate of Technical Sciences, associate Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering at Poltava State Agrarian University, Ukraine

Farisieiev A.

*Candidate of Technical Sciences, associate Professor at the Department of Food Technologies,
Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine*

Анотація

У статті досліджено закономірності виникнення потоку речовини в м'ясі свинини під впливом електричного струму, теплового потоку від нагрівача та їх комбінованої дії. Встановлено, що вологовміст м'яса має істотний і нелінійний вплив на об'єм речовини, що переноситься в м'ясі під впливом електричного струму та теплового потоку. Запропоновані аналітичні залежності для визначення кількісних параметрів з урахуванням вологовмісту, площі та товщини м'яса, різниці потенціалів, величини теплового потоку та прикладеного надлишкового тиску.

Abstract

The article investigates the patterns of substance flow occurrence in pork meat under the influence of electric current, heat flow from a heater, and their combined action. It has been established that the moisture content of the meat has a significant and nonlinear impact on the volume of substances transferred in the meat under the influence of electric current and heat flow. Analytical dependencies are proposed to determine quantitative parameters taking into account moisture content, meat area and thickness, potential difference, heat flow magnitude, and applied excess pressure.

Ключові слова: електричний струм, тепловий потік, вологовміст, м'ясо свинини, потік речовини.

Keywords: electric current, heat flow, moisture content, pork meat, substance flow.

Постановка проблеми

Жарення виробів із м'яса на нагрівальній поверхні є одним із розповсюджених процесів теплового оброблення в харчовій промисловості. Процес жарення натуральних виробів з м'яса є ресурсовитратним (втрати маси готового продукту сягають 35%) і енерговитратним (питома витрата теплоти сягає 1300 кДж/кг). Енергетична ефективність процесу жарення невисока, оскільки використовується висока температура поверхонь жарення (423...473 К) з коефіцієнтом використання площі 0,5...0,7. Використання двостороннього підведення теплоти під час процесу кондуктивного жарення значно інтенсифікує сам процес і призводить до значного підвищення виходу готового продукту [1]. Вдосконалення процесу і апаратів кондуктивного жарення м'яса, в т.ч. і за двостороннього підведення теплоти на основі глибокого розуміння процесів, які протікають в ньому, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень

Перенос теплоти в м'ясі під час жарення основним способом здійснюється внаслідок виникнення в ньому теплового потоку від розігрітої поверхні нагрівання [2]. На ефективність процесу жарення м'яса впливає величина теплового потоку, а також величина викликаного ним потоку маси речовини [3-5]. Виникнення потоку речовини під час кондуктивного і фритюрного жарення досліджувалося авторами [3-5, 6].

Одним із напрямків підвищення енергетичної і ресурсної ефективності процесу кондуктивного жарення м'яса є використання фізичних і електрофізичних методів впливу на сировину в процесі жарення [7], насамперед тиску і електричного струму.

Початковий період процесу двостороннього жарення під дією електричного струму і теплового потоку від електричного нагрівача характеризується теплопередачею через парові прошарки в поверхневому шарі м'яса [8, 9]. Коефіцієнт теплопередачі через парові прошарки залежить від питомої потужності поверхонь жарення та коефіцієнту теплопровідності м'яса. Збільшення коефіцієнту теплопередачі в цей період лише збільшенням коефіцієнту теплопровідності м'яса шляхом фізичного або електрофізичного впливу не призведе до значної інтенсифікації процесу жарення, оскільки інтенсивне відведення теплоти вглиб м'яса повинне забезпечуватися відповідним підведенням теплоти ззовні, тобто інтенсифікацією тепловіддачі до м'яса від пари в парових прошарках. На величину коефіціє-

нта тепловіддачі під час конденсації пари в менісках капілярів впливає її питомий об'єм, а відповідно, і кількість самої пари у парових прошарках. Відповідно до цього, для забезпечення такої кількості пари в поверхневих шарах необхідне виникнення в м'ясі потоку рідини, достатнього для утворення такої кількості пари в наслідок фазового перетворення. Виникнення в м'ясі свинини потоку рідини під дією електричного струму досліджувалося в роботі [10], яловичини – в роботі [11]. Встановлено, що величина потоку речовини прямопропорційно залежить від площі м'яса і електродів, напруги електричного струму та нелінійно залежить від товщини м'яса. В роботі [12] досліджувалося виникнення потоку речовини в м'ясі свинини під комбінованою дією електричного струму та теплового потоку від нагрівальної поверхні. Встановлено, що величина потоку речовини прямопропорційно залежить від величини теплового потоку і нелінійно залежить від товщини м'яса. Крім того, встановлено, що за комбінованої дії теплового потоку і постійного електричного струму напругою 27 В протягом 2 с потоки речовини від теплового потоку і від електричного струму накладаються один на одного. Вплив вологовмісту м'яса на виникнення в ньому потоку речовини, а також на величину ефективного кінетичного коефіцієнту процесу переносу речовини в м'ясі під комбінованою дією електричного струму і теплового потоку від електронагрівача не досліджувалося.

Мета роботи: дослідження впливу вологовмісту м'яса на величину потоку речовини в м'ясі свинини під комбінованою дією електричного струму і теплового потоку від електронагрівача.

Для досліджень була використана експериментальна установка на основі модернізованого пристрою Перрена [13], наведена на рис. 1.

Установка складається зі скляного циліндру 5, до якого знизу за допомогою термолаку герметично приклеєно електрод у вигляді мідної пластини. До цієї пластини за допомогою перфорованого електрода 3 і притискного кільця 4 щільно притискається дослідний зразок з м'яса свинини, після чого в циліндр заливається дистильована вода 6. Циліндр 5 закривається пробкою 7, через яку виведено трубку 8 з мірним капіляром 9. На електроди подається випрямлений струм (з пульсацією) напругою 27 В (обґрунтування величини напруги наведено в роботі [10]) від електричного трансформатора 10 з діодним містком 11.

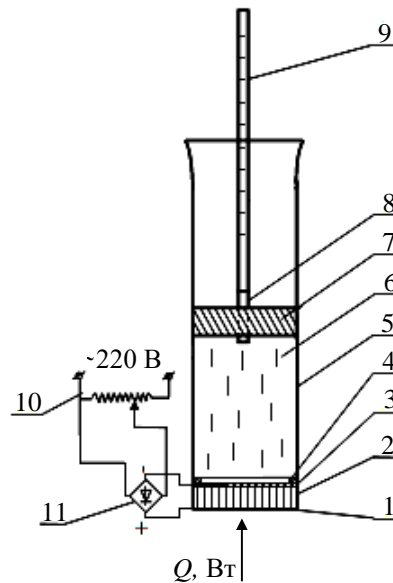


Рис. 1. Принципова схема установки для дослідження впливу вологовмісту м'яса свинини на виникнення в ньому потоку речовини під комбінованою дією теплового потоку від електронагрівача і електричного струму:

- 1 – герметичний електрод у вигляді мідної пластини; 2 – дослідний зразок із м'яса свинини;
3 – перфорований електрод; 4 – дослідний зразок м'яса; 5 – притискне кільце; 6 – дистильована вода; 7 – пробка; 8 – трубка; 9 – мірний капіляр; 10 – ЛАТР; 11 – діодний місток

Для виникнення в м'ясі теплового потоку був використаний плоский нагрівальний елемент із температурою поверхні 423 К та тепловим потоком від нього $Q = 18 \dots 72$ Вт, який щільно притискався до герметичного електроду у вигляді мідної пластини 1. Обґрунтування впливу величини теплового потоку наведено в роботі [12]. Тепловий потік $Q = 18 \dots 72$ Вт забезпечувався постійним фазовим регулятором напруги на семісторі ВТА16-600В.

За початок відліку процесів переносу речовини в дослідженнях було обрано момент повного закипання води й початку інтенсивного пароутворення біля мідної пластини 1, що фіксувалося візуально. В дослідженні виникнення потоку речовини під дією електричного струму подавали напругу на електроди. В дослідженнях комбінованого впливу теплового потоку та електричного струму на виникнення потоку речовини після моменту повного закипання води й початку інтенсивного пароутворення біля мідної пластини під дією теплового потоку від нагрівача вмикали подачу напруги на електроди. Об'єм води в мірному капілярі 9 фіксувався за допомогою відеозйомки на камеру мобільного телефону Realme 9 Pro+ із частотою 25 кадрів/с. Після цього за допомогою демоверсії програми Free Video to JPG Converter здійснювалася розкадровка відео в формат JPG для подальшої обробки результатів.

Для дослідження виготовлялися зразки м'яса із найдовшого м'язу від трьох тварин (віком 8, 10 і 12 місяців).

Тривалість комбінованої дії електричного струму та теплового потоку від нагрівача на дослідні зразки фіксувалася за допомогою електронного секундоміра «Select Stop Watch».

Для визначення початкового вологовмісту м'яса зразок зважували на аналітичних вагах, після чого висушували його до рівноважного вологовмісту w_p за ISO 1442:2005 в сушильній шафі [14]. Помилка! Джерело посилання не знайдено. Висушений тестер зважували на аналітичних вагах. Значення вологовмісту розраховували за формулою (без врахування маси чаші, піску і скляної палички):

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%;$$

де m_1 – маса тестера до висушування; m_2 – маса тестера після висушування.

Початковий вологовміст найдовшого м'язу від самої тварини віком 8 міс. становив 73,1%, від тварини віком 10 міс. – 72,8%, від самої старшої – 72,1%. Як видно з цих даних, вологовміст м'язової тканини залежить і від віку тварини.

В дослідженнях використовувалися дослідні зразки, виготовлені з найдовших м'язів тварин зазначеного віку. Найдовші м'язи розрізалися впоперек волокон на шматки товщиною 0,01 м. Загостреним краєм скляного циліндра 5 вирізалися дослідні зразки площею $10,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Результати досліджень та обговорення

Спочатку проводили дослідження впливу вологовмісту дослідних зразків на виникнення потоку речовини в м'ясі свинини під дією електричного струму. Вихідними параметрами дослідження були: напруга постійного електричного струму (з пульсацією) на електродах $U = 27$ В; площа дослідного зразка $S_m = 10,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; товщина дослідного зразка $\delta_m = 0,01$ м; коефіцієнт пропорційності, який враховує співвідношення поміж площею контакту перфорованого електроду та площею зразка м'яса

$k_S = 0,438$, надлишковий тиск $p = 2320$ Па, граничний тиск для дослідного зразка $p_{гр} = 10400$ Па. Результати досліджень наведені в табл. 1. та рис. 2.

Таблиця 1

Результати визначення впливу вологовмісту м'яса свинини на виникнення в ньому потоку речовини під дією електричного струму

Вологовміст м'яса, w ,	Об'єм перенесеної речовини, $V_p \cdot 10^6, \text{ м}^3$, за $U = 27, \text{ В}$, $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2$, $\delta_M = 0,01, \text{ м}$ і тривалості впливу $\tau, \text{ с}$					
	0,5	1	2	3	4	5
0,731	0,0559	0,1119	0,2237	0,3356	0,4475	0,5593
0,728	0,0552	0,1103	0,2207	0,3310	0,4413	0,5517
0,721	0,0534	0,1068	0,2137	0,3205	0,4273	0,5342

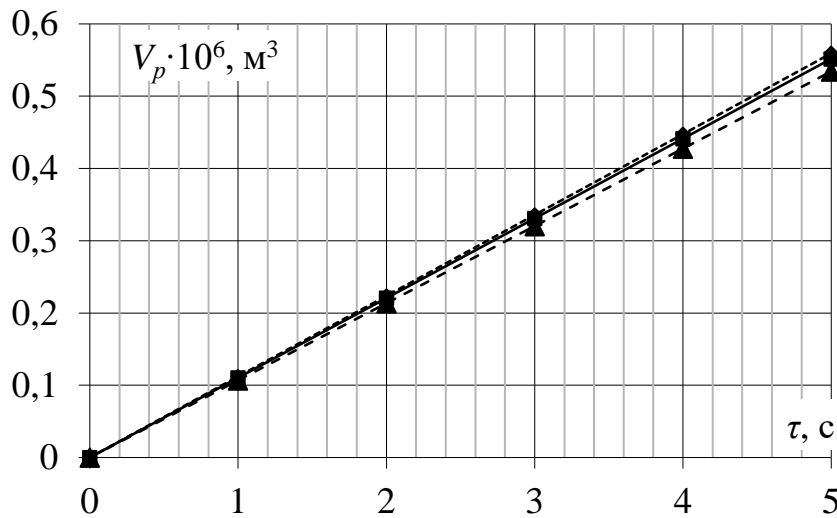


Рис. 2. Кінетика об'єму речовини, перенесеної в м'ясі свинини під дією електричного струму за напруги $U = 27, \text{ В}$, площі зразка $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2$, його товщини $\delta_M = 0,01, \text{ м}$, величини прикладеного надлишкового тиску $p = 2320$ Па, протягом $\tau = 0,5 \dots 5,0$ с і вологовмісту $\blacklozenge - 0,731, \blacksquare - 0,728$ та $\blacktriangle - 0,721$ кг/кг.

Як видно з табл. 1 та рис. 2 протягом 5 с в межах одного вологовмісту кінетика об'єму речовини, перенесеної в м'ясі під дією електричного струму має прямопропорційний вигляд. З наведених даних видно, що вологовміст м'яса істотно і нелінійно впливає на об'єм речовини, що переноситься в м'ясі під дією електричного струму.

З роботи [10] таку залежність об'єму речовини, що переноситься в м'ясі свинини під дією електричного струму від напруги, площі контакту перфорованого електроду з м'ясом, товщини дослідного зразку та його площі, тиску і тривалості впливу для вологовмісту $w = 0,731$ можна представити у вигляді:

$$V_p = k_e \cdot k_S \cdot U \cdot S_M \cdot \delta_M^{-0,731} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3;$$

для вологовмісту $w = 0,728$

$$V_p = k_e \cdot k_S \cdot U \cdot S_M \cdot \delta_M^{-0,728} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3;$$

для вологовмісту $w = 0,721$

$$V_p = k_e \cdot k_S \cdot U \cdot S_M \cdot \delta_M^{-0,721} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3.$$

$$J_{pe}^V = \frac{V_{pe}}{S_M \cdot \tau} = k_e \cdot k_S \cdot U \cdot \delta_M^{-w} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}}, \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с}); \quad (2)$$

або

$$J_{pe}^G = \frac{V_{pe} \cdot \rho_M}{S_M \cdot \tau} = k_e \cdot k_S \cdot U \cdot \delta_M^{-w} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \rho_M, \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}); \quad (3)$$

де ρ_M – густина м'яса, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Наведені залежності з достовірністю 95% описують отримані результати експерименту.

Очевидно, що показник степені товщини дослідного зразку відповідає значенню вологовмісту дослідного зразку, що дає змогу сформулювати теоретичну кінетику об'єму речовини, що переноситься в м'ясі свинини під дією електричного струму, в наступному вигляді

$$V_p = k_e \cdot U \cdot S_M \cdot \delta_M^{-w} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3; \quad (1)$$

де k_e – ефективний кінетичний коефіцієнт процесу переносу речовини в м'ясі під дією електричного струму, $\text{м}^{1+w}/(\text{с} \cdot \text{В})$. В даному експерименті $k_e = 0,4132 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{1+w}/(\text{с} \cdot \text{В})$.

Потік речовини J_p , що переноситься через одиницю площі S_M м'яса в одиницю часу τ в даному діапазоні параметрів залежить від напруги електричного струму U , товщини м'яса δ_M , вологовмісту w та величини прикладеного тиску p :

Вихідними параметрами для дослідження впливу вологовмісту дослідних зразків на виникнення потоку речовини в м'ясі свинини під дією теплового потоку від електронагрівача були: тепловий потік від електронагрівача $Q = 92$ Вт; площа дослідного зразка $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}$ м²; товщина дослідного зразка $\delta_M = 0,01$ м; надлишковий тиск $p = 2320$ Па, граничний тиск для дослідного зразка $p_{гр}$

$= 10400$ Па. Результати досліджень наведені в табл. 2 і рис. 3.

Як видно з табл. 2 та рис. 3 протягом 5 с в межах одного вологовмісту кінетика об'єму речовини, перенесеної в м'ясі під дією теплового потоку від електронагрівача має прямопропорційний вигляд. З наведених даних видно, що вологовміст м'яса істотно і нелінійно впливає на об'єм речовини, що переноситься в м'ясі під дією теплового потоку від електронагрівача.

Таблиця 2

Результати визначення впливу вологовмісту м'яса свинини на виникнення в ньому потоку речовини під теплового потоку від електронагрівача

Вологовміст м'яса, w ,	Об'єм перенесеної речовини, $V_p \cdot 10^6$, м ³ , за $Q = 92$, Вт, $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}$, м ² , $\delta_M = 0,01$, м і тривалості впливу τ , с					
	0,5	1	2	3	4	5
0,731	0,01457	0,02914	0,05828	0,08742	0,11655	0,14569
0,728	0,01477	0,02954	0,05909	0,08863	0,11818	0,14772
0,721	0,01526	0,03051	0,06102	0,09154	0,12205	0,15256

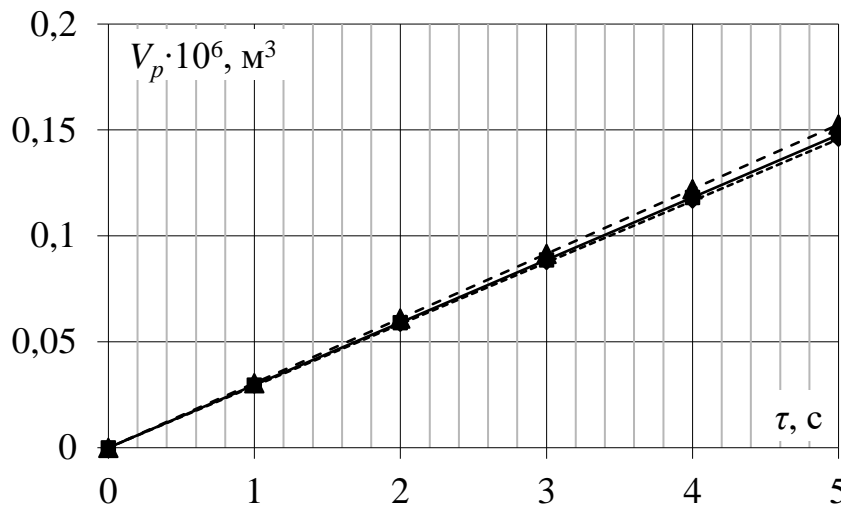


Рис. 3. Кінетика об'єму речовини, перенесеної в м'ясі свинини під дією теплового потоку від електронагрівача $Q = 92$, Вт, за площі зразка $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}$, м², його товщини $\delta_M = 0,01$, м, величини прикладеного надлишкового тиску $p = 2320$ Па, протягом $\tau = 0,5 \dots 5,0$ с і вологовмісту \blacklozenge – 0,731, \blacksquare – 0,728 та \blacktriangle – 0,721 кг/кг.

З роботи [12] таку залежність об'єму речовини, що переноситься в м'ясі свинини під дією теплового потоку від електронагрівача від величини теплового потоку, товщини дослідного зразка та його площі, тиску і тривалості впливу для вологовмісту $w = 0,731$ можна представити у вигляді

$$V_p = k_T \cdot Q \cdot S_M \cdot \delta_M^{-(1-0,731)} \cdot \frac{(p_{гр}-p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3;$$

для вологовмісту $w = 0,728$

$$V_p = k_T \cdot Q \cdot S_M \cdot \delta_M^{-(1-0,728)} \cdot \frac{(p_{гр}-p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3;$$

для вологовмісту $w = 0,721$

$$V_p = k_T \cdot Q \cdot S_M \cdot \delta_M^{-(1-0,721)} \cdot \frac{(p_{гр}-p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3;$$

Очевидно, що показник степені товщини дослідного зразка відповідає значенню вологовмісту дослідного зразка, що дає змогу сформулювати теоретичну кінетику об'єму речовини, що переноситься в м'ясі свинини під дією теплового потоку від електронагрівача, в наступному вигляді

$$V_p = k_T \cdot Q \cdot S_M \cdot \delta_M^{-(1-w)} \cdot \frac{(p_{гр}-p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3; \quad (4)$$

де k_T – ефективний кінетичний коефіцієнт процесу переносу речовини в м'ясі під впливом теплового потоку, м^(2-w)/(с·Вт); для даного випадку за вертикального вектору переносу маси $k_T = 0,11614 \cdot 10^{-6}$ м^(2-w)/(с·Вт).

Потік речовини J_{pT} , що переноситься через одиницю площі S_M м'яса за одиницю часу τ у даному діапазоні параметрів залежить від величини теплового потоку від нагрівача Q , товщини δ_M , вологовмісту дослідного зразка w і величини прикладеного надлишкового тиску p

$$J_{pT}^V = \frac{V_{pT}}{S_M \cdot \tau} = k_T \cdot Q \cdot \delta_M^{-(1-w)} \cdot \frac{(p_{гр}-p)}{p_{гр}}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

або

$$J_{pT}^G = \frac{V_{pT} \cdot \rho_M}{S_M \cdot \tau} = k_T \cdot Q \cdot \delta_M^{-(1-w)} \cdot \frac{(p_{гр}-p)}{p_{гр}} \cdot \rho_M, \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}. \quad (6)$$

Дослідження впливу вологовмісту дослідних зразків на виникнення потоку речовини в м'ясі свинини під комбінованою дією теплового потоку від

електронагрівача й електричного струму здійснювалось за наступних вихідних параметрів: напруга постійного електричного струму (з пульсацією) на електродах $U = 27$ В; тепловий потік від електронагрівача $Q = 92$ Вт; площа дослідного зразка $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}$ м²; товщина дослідного зразка $\delta_M = 0,01$ м; коефіцієнт пропорційності, який враховує співвідношення між площею контакту перфорованого електроду та площею зразка м'яса $k_S = 0,438$, надлишковий тиск $p = 2320$ Па, граничний тиск для дослідного зразка $p_{гр} = 10400$ Па. Результати досліджень наведені в табл. 3 та рис. 4.

Як видно з табл. 3 та рис. 4 під час комбінованого впливу теплового потоку від електронагрівача

й електричного струму на дослідний зразок з м'яса свинини, в межах одного вологовмісту, об'єм перенесеної речовини в дослідних зразках накладається один на одного та має лінійну залежність тільки впродовж перших 0...2 с. Після 2 с комбінованої дії потоки речовини від дії електричного струму та теплового потоку від електронагрівача перестають накладатися один на одного, що цілком співпадає з даними наведеними в роботі [12], та залежить від зневоднення шару м'яса біля мідної пластини (герметичного електроду). З наведених даних видно, що під час комбінованого впливу теплового потоку й електричного струму вологовміст м'яса також має істотний і нелінійний вплив на об'єм речовини, що переноситься в м'ясі.

Таблиця 3

Результати визначення впливу вологовмісту м'яса свинини на виникнення в ньому потоку речовини під теплового потоку від електронагрівача й електричного струму

Вологовміст м'яса, w ,	Об'єм перенесеної речовини, $V_p \cdot 10^6$, м ³ , за $U = 27$ В; $Q = 92$, Вт, $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}$, м ² , $\delta_M = 0,01$, м і тривалості впливу τ , с					
	0,5	1	2	3	4	5
0,731	0,0705	0,1410	0,2820	0,3746	0,4562	0,5166
0,728	0,0699	0,1399	0,2797	0,3716	0,4525	0,5125
0,721	0,0687	0,1373	0,2747	0,3649	0,4443	0,5032

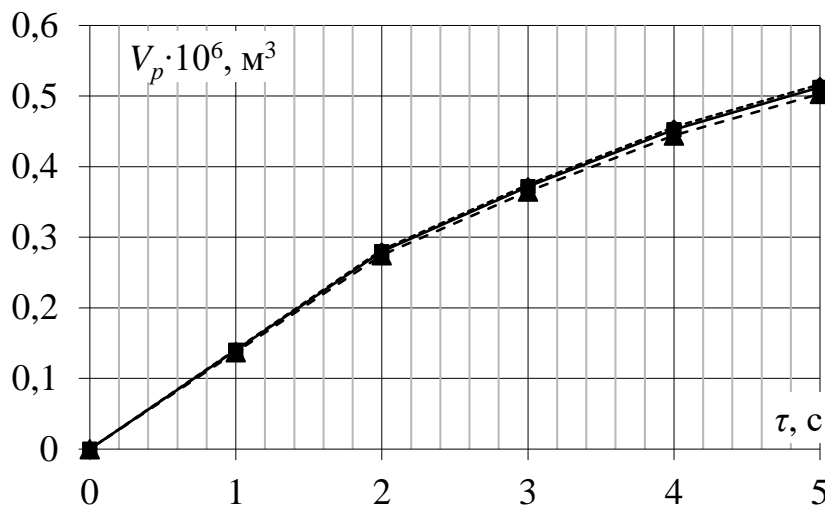


Рис. 4. Кінетика об'єму речовини, перенесеної в м'ясі свинини під дією теплового потоку від електронагрівача $Q = 92$, Вт й електричного струму за напруги $U = 27$ В, за площі зразка $S_M = 10,17 \cdot 10^{-4}$, м², його товщини $\delta_M = 0,01$, м, величини прикладеного надлишкового тиску $p = 2320$ Па, протягом $\tau = 0,5 \dots 5,0$ с і вологовмісту \blacklozenge – 0,731, \blacksquare – 0,728 та \blacktriangle – 0,721 кг/кг.

Це дає підстави сформулювати теоретичну кінетику перенесеного в м'ясі під час комбінованої дії теплового потоку й електричного струму об'єму речовини в інтервалі тривалості впливу 0...2 с в наступному вигляді

$$\begin{aligned}
 V_p &= V_{p_t} + V_{p_e} = k_t \cdot Q \cdot S_M \cdot \delta_M^{-(1-w)} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \tau + k_e \cdot k_S \cdot U \cdot S_M \cdot \delta_M^{-w} \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \tau = \\
 &= (k_t \cdot Q \cdot \delta_M^{-(1-w)} + k_e \cdot k_S \cdot U \cdot \delta_M^{-w}) \cdot S_M \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \tau, \text{ м}^3, \quad (7)
 \end{aligned}$$

Відповідно до (7), потік речовини J_p , що виникає під комбінованим впливом теплового потоку від нагрівача й електричного струму в інтервалі тривалості впливу 0...2 с буде дорівнювати

$$J_p^V = \frac{V_p}{S_M \cdot \tau} = (k_t \cdot Q \cdot \delta_M^{-(1-w)} + k_e \cdot k_S \cdot U \cdot \delta_M^{-w}) \cdot \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}}, \text{ м/с}, \quad (8)$$

або

$$J_p^G = \frac{V_p \cdot \rho_M}{S_M \cdot \tau} = (k_t \cdot Q \cdot \delta_M^{-(1-w)} + k_e \cdot k_S \cdot U \cdot \delta_M^{-w}) \times$$

$$\times \frac{(p_{гр} - p)}{p_{гр}} \cdot \rho_M, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (9)$$

Таким чином, отримані дані підтверджують що об'єм перенесеної речовини та величина потоку речовини в м'ясі свинини, під комбінованою дією теплового потоку від нагрівача й електричного струму, досягають свого максимуму при тривалості спільного впливу протягом 2 с, що підтверджує обґрунтування частоти електричного струму 0,5 Гц під час двостороннього жарення виробів з м'яса свинини під дією електричного струму процес та обладнання реалізації якого описані в роботі [15].

Висновки. В ході проведених досліджень встановлені кількісні параметри перенесення речовини в м'ясі свинини під окремим впливом електричного струму й теплового потоку від нагрівача та їх комбінованою дією. Вперше встановлено, що вологовміст м'яса істотно і нелінійно впливає на виникнення в ньому потоку речовини. Запропоновано закономірності виникнення потоку речовини в м'ясі свинини під дією електричного струму та теплового потоку від нагрівача з урахуванням вологовмісту м'яса та величини прикладеного надлишкового тиску. Підтверджено, що максимальний ефект комбінованого впливу електричного струму та теплового потоку на процеси перенесення речовини в м'ясі спостерігається при тривалості 0...2,0 с, коли дія обох факторів накладається одна на одну, а залежність має лінійний характер.

Список літератури

1. Скрипник В.О. Розробка обладнання для реалізації процесу двостороннього жаріння м'яса в умовах осьового стиснення: монографія / В. О. Скрипник. Полтава: ПУЕТ, 2012. 173 с.
2. Tran N.L., Salmon C.P., Knize M.G., Colvin M.E. Experimental and simulation studies of heat flow and heterocyclic amine mutagen/carcinogen formation in pan-fried meat patties. *Food and Chemical Toxicology*, 2002. Vol. 40(5). P. 673-684.
3. Sravan Lalam, Jaspreet S. Sandhu, Pawan S. Takhar, Leslie D. Thompson, Christine Alvarado. Experimental study on transport mechanisms during deep fat frying of chicken nuggets. *LWT - Food Science and Technology*, 2013. Vol. 50(1). P. 110-119.
4. Bea Kovácsné Oroszvári, Elena Bayod, Ingegerd Sjöholm, Eva Tornberg. The mechanisms controlling heat and mass transfer on frying of beefburgers. III. Mass transfer evolution during frying. *Journal of Food Engineering*, 2006. Vol. 76(2), P. 169-178.
5. Mohammed Farid. Chapter 17 – Heat and Mass Transfer in Food Processing. *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*, 2019. P. 439-460.
6. Mohammed M. Farid, Riza Kizilel. A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying and frying of food products. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009. Vol. 48(1). P. 217-223.
7. Skrypnik V. The Theoretical Substantiation of Intensification Process Possibilities of Conductive Frying Meat Natural Products. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2015. Vol. 3(2). P. 361-367.
8. Черевко О.І., Скрипник В.О., Молчанова Н.Ю., Фарісеєв А.Г. Теплопередача в поверхневому шарі м'ясних виробів при двосторонньому жаренні під дією електричного струму. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 4/4 (24). С. 47-51.
9. Черевко О.І., Скрипник В.О., Фарісеєв А.Г. Теплопередача в поверхневому шарі м'ясних виробів при двосторонньому жаренні в умовах стиснення. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг.* Харків: ХДУХТ, 2015. Вип. 1 (21). С. 107-120.
10. Черевко А.И., Скрипник В.А., Фарисеев А.Г. Влияние электроосмоса на процессы массопроводности в свином мясе. *Техника и технология пищевых производств. Кемерово*, 2014. № 1. С. 115–120.
11. Yvan Llave, Toshifumi Udo, Mika Fukuoka, Noboru Sakai. Ohmic heating of beef at 20 kHz and analysis of electrical conductivity at low and high frequencies. *Journal of Food Engineering*, 2018. Vol. 228. P. 91-101.
12. Черевко А.И., Скрипник В.А., Фарисеев А.Г. Результаты исследования массопроводности свиного мяса под воздействием теплового потока и тока электроосмоса. *Вестник ВГУИТ. Воронеж*, 2013. № 4. С. 138-144.
13. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001. 640 с.
14. ДСТУ ISO 1442:2005 М'ясо та м'ясні продукти. Метод визначення вмісту вологи (контрольний метод) (ISO 1442:1997, IDT). З поправкою. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. – URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_1442_2005.pdf (дата звернення - 22.11.2023 р.).
15. Підвищення енергетичної і ресурсної ефективності процесів і апаратів кондуктивного жарення м'яса: монографія / Скрипник В. О., Молчанова Н.Ю., Фарісеєв А. Г., Тарасенко Д.С. ; за заг. ред. В.О. Скрипника. Полтава: Астроя, 2024. 274 с.