

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ТУШОК ПТИЦІ ПІСЛЯ ЗАБОЮ

Усатенко Н. Ф.¹, к.т.н., ст. викладач кафедри професійної освіти (харчові технології)

<https://orcid.org/0000-0002-0339-5189>

Вербицький С. Б.², к.т.н., заст. зав. відділу інформаційного забезпечення, стандартизації та метрології

<https://orcid.org/0000-0002-4211-3789>

¹Переяслав-Хмельницький державний педагогічний

університет ім. Г. С. Сковороди, м. Переяслав, Україна

²Інститут продовольчих ресурсів НААН, м. Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2021-16-18>

Однією найважливіших ланок технологічного ланцюга виробництва м'яса птиці є охолодження тушок після забою. В Україні, зазвичай, застосовують економічно доцільніший спосіб охолодження – водно-контактний, який, проте, не забезпечує належної якості готової продукції і недозволений до застосування в країнах Європейського Союзу. **Актуальність теми.** Статтю присвячено впровадженню передових технологій в вітчизняній птахопереробній галузі. **Предмет досліджень** – теплофізичні характеристики процесів охолодження тушок курчат-бройлерів. **Мета роботи** - Обґрунтування доцільності використання в птахопереробній промисловості технології охолодження тушок курчат-бройлерів гідроаерозольно-повітряним способом. **Методи досліджень.** Експериментальні дослідження здійснювали із застосуванням методу локального моделювання процесів теплообміну між тушками та охолоджувальним середовищем різного типу. Аналітичні – з використанням диференціальних рівнянь, критеріальних залежностей і теорії подібності. **Результати досліджень** Експериментально встановлено, що за температури, однакової для всіх типів охолоджуючих середовищ $t_{сер} = 3^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$, масової швидкості їх руху, відповідно кожного - води $w_{\gamma} \approx 0,2 \text{ м/с}$, повітря і гідроаерозолі - $w_{\gamma} \approx 2,5 \text{ м/с} \div 2,8 \text{ м/с}$, коефіцієнт тепловіддачі від тушок становить: для водно-контактного способу охолодження – $\alpha_6 \leq 550,0 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, для гідроаерозольного - $\alpha_2 \leq 200,0 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, для гідроаерозольно-повітряного – $\alpha_{en} \leq 106,0 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, для повітряного – $\alpha_n \leq 34,1 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. За результатами порівняльних аналітичних досліджень процесів охолодження тушок, доведено доцільність використання гідроаерозольно-повітряного способу, як такого, що забезпечує якість м'яса птиці за помірних експлуатаційних витрат. Запропоновано алгоритм розрахунку параметрів цього процесу за доступною для фахівців інженерного профілю моделлю розрахунку цієї системи.

Ключові слова: тушки птиці, аналітичні і експериментальні дослідження, гідроаерозоль, метод локального моделювання, охолодження, теплообмін

THEORETIC BASES OF THE PROCESS OF CHILLING POULTRY CARCASSES AFTER SLAUGHTER

*Nina Usatenko*¹, PhD, Technics, Senior Lecturer of the Department of Vocational Education (Food Technology)
<https://orcid.org/0000-0002-0339-5189>

*Serhii Verbitskyi*², PhD, Technics, Deputy Head of Department of Information Support, Standardization and Metrology
<https://orcid.org/0000-0002-4211-3789>

¹Pereyaslav-Khmelnytsky State Pedagogical

University GS Skovoroda, Pereyaslav, Ukraine

²Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

<https://doi.org/10.31073/foodresources2021-16-18>

One of the most important parts of the technological chain for the production of poultry meat is chilling carcasses after slaughter. In Ukraine, a more economic method of cooling - water-contact one is mostly used, which however does not guarantee the proper quality of finished products and is not allowed in the European Union. **Actuality of theme.** This article concerns the introduction of advanced technologies in the domestic poultry industry. The subject of research - thermophysical characteristics of the chilling processes of broiler carcasses. **Purpose** of the article is to substantiate the feasibility of using in the poultry industry technology for chilling carcasses of broilers by the hydroaerosol-air method. **Research methods.** Experimental research was performed using the method of local modeling of heat transfer processes between carcasses and a cooling medium of different type, analytical research – using differential equations, criterion dependences and similarity theory. **Research results.** It is experimentally established that at the same temperature for all types of chilling media $t_{med} = 3\text{ }^{\circ}\text{C} \div 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, the mass velocity of their movement was, respectively, for water - $w_{\gamma} \approx 0.2\text{ m/s}$, for air and hydroaerosols - $w_{\gamma} \approx 2.5\text{ m/s} \div 2.8\text{ m/s}$, the heat transfer coefficient from the carcasses was: for water-contact method of cooling - $\alpha_v \leq 550.0\text{ W/m}^2\text{K}$, for hydroaerosol - $\alpha_g \leq 200.0\text{ W/m}^2\text{K}$, for hydroaerosol-air - $\alpha_{gp} \leq 106.0\text{ W/m}^2\text{K}$, for air - $\alpha_p \leq 34.1\text{ W/m}^2\text{K}$. According to the results of comparative analytical studies of carcass chilling processes, the expediency of using the hydroaerosol-air method as one that ensures the quality of poultry meat at moderate operating costs has been proven. An algorithm for calculating the parameters of this process is proposed.

Keywords: poultry carcasses, analytical and experimental researches, hydroaerosol, method of local modeling, cooling, heat sink

Постановка проблеми.

Великої уваги технології охолодження харчових продуктів гідроаерозольним способом у всьому світі надавали ще на початку 80–х років XX століття [1-5]. У 1994 році провідними фахівцями Технологічного інституту молока та м'яса Української академії аграрних наук на основі власних ґрунтовних досліджень тепломасообмінних процесів, що відбуваються при охолодженні ковбасних виробів в потоках гідроаерозолі, була розроблена і виготовлена перша на території СРСР комбінована холодильна камера, аеродинамічна система якої була оснащена тангенціальними форсунками власної конструкції з розпиленням води дисперсністю біля 40 мкм [6]. Конструктивні рішення можна було б успішно застосовувати в інженерних схемах охолодження тушок птиці, проте увагу більшості науковців та практичних працівників було зосереджено на вивченні економічно ефективнішого процесу – охолодження тушок зануренням в холодну воду [7-10]. Вирішували, насамперед, питання взаємозв'язку між економічною

ефективністю та якістю тушок птиці [11, 12]. Доступні ж у літературних джерелах наукові роботи з удосконалення процесів охолодження тушок в потоках гідроаерозолі та в потоках гідроаерозолі з періодичним підсушування холодним повітрям є малочисельними та охоплюють, зазвичай, обмежений масив даних. Однією з основних проблем для вирішення питань детального вивчення й удосконалення цих процесів є відсутність алгоритмів розрахунку їхніх параметрів для тіл складної форми, до яких належать і тушки птиці – навіть для випадку постійного коефіцієнта тепловіддачі. Тому наразі доволі актуальним є отримання, на основі експериментальних досліджень, даних для обґрунтування технології гідроаерозоль-повітряного способу охолодження птиці і розроблення доступної для фахівців інженерного профілю моделі розрахунку цієї системи.

Предмет досліджень – теплофізичні характеристики процесів охолодження тушок курчат-бройлерів.

Мета роботи – обґрунтування доцільності використання в птахопереробній промисловості технології охолодження тушок курчат-бройлерів гідроаерозоль-повітряним способом.

Матеріали та методи досліджень.

Для вирішення поставленого завдання було виконано експериментальні та аналітичні дослідження. Вивчення процесів теплообміну між тушкою курчати-бройлера та охолоджувальним середовищем на першому етапі здійснювали методом локального моделювання з використанням модельного тіла. Для цього було сконструйовано альфа-калориметр (умовна модель тушки), який являв собою пустотілий металевий циліндр, на поверхні якого (по колу) було змонтовано шість датчиків теплового потоку та комплект термопар. Сигнали датчиків і термопар було виведено на вторинний реєструючий дванадцятиточковий прилад. Температуру модельного тіла термостатували ультратермостатом на рівні від 42⁰С до 3⁰С. Охолодження альфакалориметра проводили в потоках охолоджуючих середовищ: води, повітря, гідроаерозолі (аерозоль з дисперсністю водяних капель біля 40 мкм), гідроаерозолі та повітря (зрошування поверхні модельного тіла в потоках гідроаерозолі тривалістю 7 ÷ 10 хв. та підсушування – протягом 17÷20 хв). За сигналами тепломірів змінювали величину теплових потоків і, залежно від швидкості руху потоків охолоджуючого середовища та кута атаки ними модельного тіла, визначали коефіцієнт тепловіддачі (α). Швидкість робочого середовища вимірювали за допомогою електротермоанемометра типу ТА-ЛИОТ, з межею вимірювань від 0 м/с до 5,0 м/с та похибкою $\pm (0,1+0,05 V)$, м/с.

Отримані на модельному тілі теплотехнічні параметри з незначним припущенням використовували при вивченні процесів тепло-масообміну між тушками курчат-бройлерів та охолоджувальним середовищем.

Результати аналітичних досліджень описували за допомогою диференціальних рівнянь з використанням критеріальних залежностей та теорії подібності.

Результати досліджень

За результатами досліджень процесів теплообміну між модельним тілом та різного типу охолоджувальними середовищами, визначено їхні раціональні параметри: температура для кожного середовища ($t_{\text{ср}}$) має бути в межах від 3⁰С до 0⁰С; масова швидкість руху води (контактна теплопередача) $w_{\text{гв}} \approx 0,2$ м/с, а повітря та гідроаерозолі (конвекція) - від 2,5 м/с до 2,8 м/с. Встановлено, що, за таких параметрів, коефіцієнт тепловіддачі від модельного тіла до робочого середовища, визначений шляхом ділення значень виміряного теплового потоку на різницю температур між середовищем та тілом ($\alpha = q / \Delta t$) становить: для водно-контактного охолодження - $\alpha_{\text{в}} \leq 550,0$ Вт/ м² К, для гідроаерозольного - $\alpha_{\text{г}} \leq 200,0$ Вт/ м² К, для гідроаерозольного з почерговим обдуванням холодним повітрям - $\alpha_{\text{гп}} \leq 106,0$ Вт/ м² К, для повітряного - $\alpha_{\text{п}} \leq 34,1$ Вт/ м² К.

Залежність швидкості охолодження модельного тіла за раціональними параметрами процесу відповідно типу кожного охолоджуючого середовища, зображено графічно на рис. 1. За характером падіння кривих можна зробити висновок, що інтенсивність охолодження зменшується у такому порядку: водяне $\rightarrow$ гідроаерозольне $\rightarrow$ гідроаерозольне з обдуванням повітрям $\rightarrow$ повітряне.

Результати експериментальних досліджень було використано для проведення порівняльних теплотехнічних розрахунків процесів охолодження 500 штук (1000 кг) тушок курчат-бройлерів задіяними способами. Для цього, в частині визначення умов процесів, було, насамперед, скориговано теплофізичні характеристики об'єкта досліджень та враховано особливості геометричних параметрів його тіла.

Основні результати аналітичних досліджень наведено в таблиці 1.

Аналіз результатів аналітичних досліджень свідчить про перевагу повітряного способу охолодження над іншими саме у сенсі найменших витрат енергії і матеріалів. Доведено, що енергетичні витрати в гривневому еквіваленті на реалізацію повітряного способу охолодження менші ніж у разі застосування: охолодження тушок зануренням у ванни з водою – у 3,3 разу, гідроаерозольного – у 2,03 разу, гідроаерозольного з почерговим обдуванням холодним повітрям – у 1,6 разу.

Між цим, за прибутковістю для виробників лідером є водяний спосіб охолодження. Дослідженнями [13, 14] встановлено, що вихід м'яса птиці на етапі охолодження тушок корелює, насамперед, з вмістом в тушках технологічно доданої води. За вимогами Регламенту ЄС [15] та ДСТУ 3143:2013 «М'ясо птиці. Загальні технічні умови», величина абсорбції води в процесі охолодження не має перевищувати визначених норм: для тушок, охолоджених зануренням у ванни з водою-5,1 % від маси тушок, для гідроаерозольного-3,3 %, повітряного-1,5 %. Для охолодження тушок в гідроаерозолі з періодичним підсушуванням повітрям, відсоток цієї води зазначеними документами не нормовано, тому для розрахунків було умовно прийнято середньоарифметичне від значень для гідроаерозольного та повітряного способів, а саме 2,4 %.

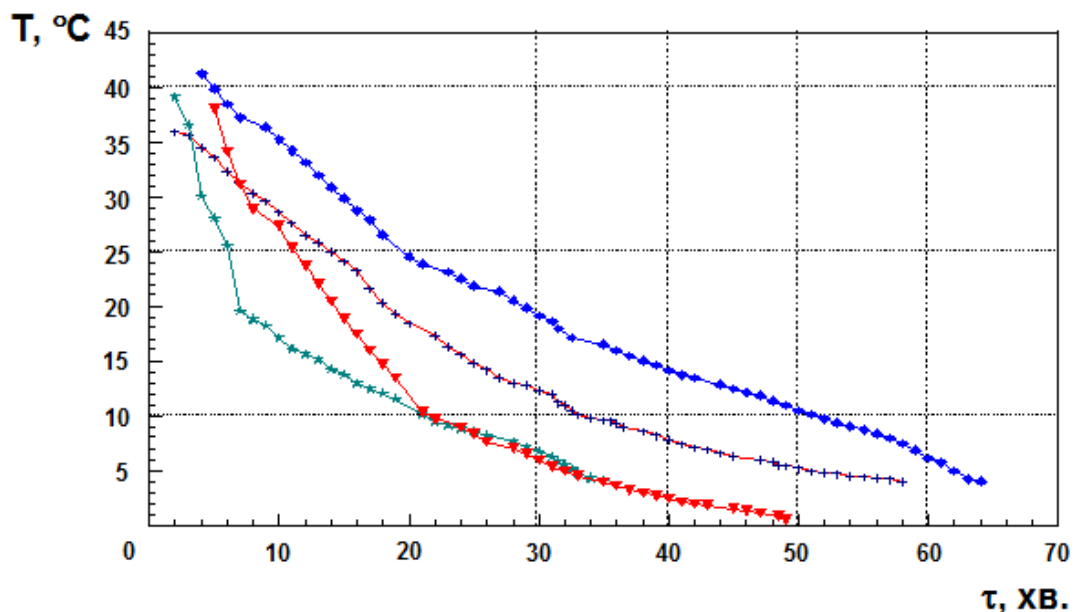


Рис.1. Залежність швидкості охолодження модельного тіла від параметрів охолоджуючого середовища:

- ◆-◆-◆—повітря за $t = 3^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$, $w_{\gamma} \approx 2,8$ м/с,
- +--+— гідроаерозоль за $t = 3^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$, $w_{\gamma} \approx 2,8$ м/с,
- ★-★-★—гідроаерозоль-повітря за $t = 3^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$, $w_{\gamma} \approx 2,8$ м/с,
- ▼-▼-▼—вода за $t = 3^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$ і $w_{\gamma} \approx 0,2$ м/с

Розраховано, що, за умов вартості 1 кг м'яса на продовольчому ринку України 75,0 грн, прибуток від реалізації 1000 кг мав би становити 75 000 грн. При цьому, надлишковий прибуток від реалізації тушок, при можливому збільшенні загальної їх маси за рахунок технологічно доданої води, в кожному процесі мав би дорівнювати: для водяного охолодження (зануренням) -3825,0 грн; для гідроаерозольного – 2475,0 грн; гідроаерозольного з обдуванням повітрям – 1800 грн; для повітряного – 1125,0 грн.

Доведено (табл. 1), що, з урахуванням матеріальних витрат, найбільшої економічної ефективності можна досягти у разі охолодження тушок зануренням у ванни з водою: значення його ефективності вище в 3,4 рази ніж у разі застосування повітряного охолодження, в 2,13 разу - гідроаерозоль-повітряного і в 1,54 разу - гідроаерозольного.

Проте, численними дослідженнями [16-19] встановлено, що м'ясо птиці, отримане з тушок, охолоджених зануренням у ванни з водою, має найгірші мікробіологічні показники та технологічно-функціональні характеристики.

Саме тому, в цій роботі загальну ефективність і, як наслідок, доцільність використання того чи іншого способу охолодження тушок курчат-бройлерів, визначали на основі комплексного оцінювання процесу, в основу якого було закладено: енергетичні витрати, вихід і якісні характеристики охолоджених до 4 °С (277 К) тушок.

З урахуванням напрацювань [6] пріоритет серед всіх способів охолодження тушок птиці має гідроаерозоль-повітряний, суть якого полягає в поєднанні переваг повітряного та водяного способів.

Результати порівняльних теплотехнічних розрахунків процесів охолодження тушок курчат-бройлерів

Таблиця 1

Параметри	Позначення	Одиниця виміру	Спосіб охолодження з застосуванням			
			повітря	води	гідро-аерозолі	гідроаерозоль-повітря
2	3	4	5	6	7	8
Маса 500 тушок для охолодження	G_T	кг	1000	1000	1000	1000
Площа поверхні тушки усереднена	F_T	м ²	0,168	0,168	0,168	0,168
Еквівалентний діаметр тушки зовнішній	$d_{\text{екв.з}}$	м	0,12	0,12	0,12	0,12
Еквівалентний діаметр тушки внутрішній	$d_{\text{екв.в}}$	м	0,07	0,07	0,07	0,07
Еквівалентний радіус тушки зовнішній	$R_{\text{екв.з}}$	м	0,06	0,06	0,06	0,06
Еквівалентний радіус тушки внутрішній	$R_{\text{екв.в}}$	м	0,035	0,035	0,035	0,035
Температура тушок початкова	$t_{\text{п}}$	К	313,0	313,0	313,0	313,0
Температура тушок кінцева	$t_{\text{к}}$	К	277,0	277,0	277,0	277,0
Теплоємність м'яса птиці*	C_M	Дж/кг·К	$3,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$
Теплопровідність м'яса птиці без шкіри*	λ_M	Вт/м·К	0,4	0,4	0,4	0,4
Теплопровідність шкіри птиці*	$\lambda_{\text{ш}}$	Вт/м·К	0,23	0,23	0,23	0,23
Температуропровідність м'яса без шкіри*	$\alpha_M \cdot 10^8$	м ² /с	12,0	12,0	12,0	12,0
Температуропровідність шкіри птиці*	$\alpha_{\text{ш}} \cdot 10^8$	м ² /с	6,0	6,0	6,0	6,0
Швидкість робочого середовища	w_{γ}	м/с	2,8	0,2	2,8	2,8
Температура робочого середовища кінцева	$T_{\text{ек}}$	К	278,0	278,0	278,0	278,0
Температура робочого середовища початкова	$T_{\text{еп}}$	К	293,0	293,0	293,0	293,0
Питома теплоємність робочого середовища*	c_c	Дж/кг·К	1005	4212	2135	1450
Витрати води на охолодження тушок	G_v	м ³	-	3,5	2,5	1,3
Витрати повітря на охолодження тушок	$G_{\text{п}}$	м ³ /год	24,0	-	24,0	24,0
Прихована теплота пароутворення*	r	Дж/кг	2266 (2%)	-	2266	2266
Теплопровідність робочого середовища*	λ_c	Вт/м·К	0,023	0,551	0,289	0,289
Потужність електродвигунів насосів	$N_{\text{нас}}$	кВт	-	15,0	1,0	1,0
Потужність електродвигунів вентиляторів	$N_{\text{вент}}$	кВт	11,0	-	11,0	11,0
Загальна потужність встановлених електродвиг.	$N_{\text{нас}} + N_{\text{вент}}$	кВт	11,0	15,0	12,0	12,0

Продовження таблиці 1

2	3	4	5	6	7	8
Теплопритоки від охолодження тушок	$Q_T = G_T \cdot c_T \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{сп}})$	кВт/год	29,7	29,7	29,7	29,7
Теплопритоки від охолодження та приготування робочого середовища за умов, що к.к.д. форсунок для розпалення води $\approx 0,4$	$Q_{\text{pc}} = G_c \cdot c_c \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{сп}})$	кВт/год	26,8	28,3	38,6	28,3
Загальне теплове навантаження з урахуванням тепловтрат через огороження, теплопритоків від працівників та нагріву електродвигунів.	ΣQ	кВт/год	59,3	61,0	69,1	59,8
Теплове навантаження пускового періоду **	$k \cdot \Sigma Q$	кВт/год	71,2	73,2	82,92	71,76
Критерій Нуссельта (охолодження повітрям)	$Nu = 0,27 \cdot Re^{0,63} \cdot Pr^{0,36}$	-	125,8	-	-	-
Критерій Нуссельта (охолодження водою)	$Nu = 0,021 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43}$	-	-	110,0	-	-
Критерій Прандтля	Pr	-	0,707	13,4	-	-
Критерій Біо	$Bi = \frac{\alpha \cdot (d_{\text{т}} - d_{\text{мс}}) / 2}{(\lambda_{\text{в}} - \lambda_{\text{т}}) / 2}$	-	2,8	41,4	15,9	8,41
Коефіцієнт тепловіддачі від охолоджувального середовища до тушки в середньому***	$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_c}{d_T}$	Вт/м²·К	34,1	522,5	200	106
Відносна надлишкова різниця температур	$\Theta = \frac{t_{\text{тн}} - t_{\text{тк}}}{t_{\text{тн}} - t_{\text{ск}}}$	-	0,97	0,97	0,97	0,97
Критерій Фур'є	$Fo = Q_T \cdot \tau / R_{\text{екв}} \cdot 2$	-	0,095	0,065	0,07	0,075
Час охолодження тушки розрахунковий****	τ	хв	164,9	79,2	97,6	109,7
Холодопродуктивність об'єднання****	$Q_o = 1,2 \cdot \Sigma Q / \tau$	кВт/год	26,1	55,5	50,9	39,3
Витрати в гривневому еквіваленті	$\Sigma (\text{кВт/год} \cdot 2,9 + \text{м}^3 \cdot 25,4)$	грн	75,95	250,34	154,47	117,66
*) Дані довідкові [20, 21]						
**) Теплове навантаження пускового періоду ** розраховували з використанням поправочного коефіцієнта $k=1,2$.						
***) Коефіцієнт тепловіддачі усереднений від охолоджувального середовища до тушки отримано експериментально - на модельному тілі.						
****) Час охолодження тушки визначали з урахуванням її пустотілості та відмінностей теплофізичних характеристик анатомічних частин						

З одного боку, через періодичне зрошування тушок розпиленою водою, темп охолодження в порівнянні з чисто повітряним способом, дійсно, збільшується за рахунок випаровування лише напиленої вологи, запобігаючи усиханню продукту. З іншого боку, тушки, завдяки обдуванню повітрям, практично не поглинають воду ззовні і, крім цього, значно знижуються витрати питної води, порівняно із суто водяним охолодженням.

Однак, для повної реалізації переваг гідроаерозоль-повітряного способу, необхідним є більш досконалий підхід до розробки технології, що має забезпечити якість м'яса птиці за помірних експлуатаційних витрат, і яка, насамперед, має спиратися на надійну теорію даного методу охолодження тушок птиці та відповідний процесний інжиніринг.

Нижче викладено запропонований авторами алгоритм розрахунку режимів гідроаерозоль-повітряного процесу охолодження тушок птиці, який на достатньо високому рівні корелює з отриманими експериментальними даними.

Дослідниками доведено [5,6,22,23], що інтенсивність тепловідведення і випаровування вологи з поверхні тіла біологічного походження визначається ефективним коефіцієнтом тепловіддачі. Якщо охолодження здійснювати тільки обдуванням продукту повітрям, то результуюча щільність теплового потоку q_p від продукту до рухомого середовища може бути виражена з достатньою для інженерної практики точністю:

$$q_p = \alpha \cdot (T_n - T_{cep}) + r \cdot \beta \cdot \varepsilon_s \cdot (C_n - C_{cep}) \quad (1)$$

За цих умов ефективний коефіцієнт тепловіддачі дорівнює:

$$\alpha_{ef} = \frac{q_p}{T_n - T_{cep}} = \alpha + r \cdot \beta \cdot \varepsilon_s \cdot \left(\frac{C_n - C_{cep}}{T_n - T_{cep}} \right) = \alpha + \alpha_m, \quad (2)$$

де: α - коефіцієнт тепловіддачі (з індексом ef – ефективний, m - масообмінний);

T_m та T_{cep} - відповідно температура поверхні продукту і середовища;

r - прихована теплота пароутворення;

ε_s – випарна здатність;

C_n та C_{cep} – відповідно концентрація пари води біля поверхні продукту і в середовищі.

З виразу (2) випливає, що ефективний коефіцієнт тепловіддачі α_{ef} при охолодженні продукту більший за величину коефіцієнт тепловіддачі α при охолодженні сухої поверхні продукту аналогічних розмірів на величину α_m , яка визначає потік маси з поверхні продукту.

$$J_n = \beta \cdot \varepsilon_s \cdot (C_n - C_{cep})$$

Для даного конкретного випадку зменшення втрат маси тушок птиці та інтенсифікації процесу теплообміну, використовуємо зволоження тушки (гідроаерозолем). При цьому волога, що випаровується з поверхні тушки підводиться до неї не з тушки, а з розпиленої у повітрі вологи. Отже, вираз густини теплового потоку має вигляд:

$$q_p = \alpha \cdot (T_n - T_{cep}) + r \cdot \beta \cdot \varepsilon_s \cdot (C_n - C_{cep}) \cdot \left(1 - \frac{F_{n3}}{F_n} \right) + r \cdot \beta \cdot (C_n - C_{cep}) \cdot \frac{F_{n3}}{F_n} \quad (3)$$

а ефективний коефіцієнт тепловіддачі дорівнює:

$$\begin{aligned} \alpha_{ef} &= \frac{q_p}{(T_n - T_{cep})} = \alpha + r \cdot \beta \cdot \varepsilon_s \cdot \left(\frac{C_n - C_{cep}}{T_n - T_{cep}} \right) \cdot \left(1 - \frac{F_{n3}}{F_n} \right) + r \cdot \beta \cdot \left(\frac{C_n - C_{cep}}{T_n - T_{cep}} \right) \cdot \frac{F_{n3}}{F_n} = \\ &= \alpha + \alpha_m \cdot \left(1 - \frac{F_{n3}}{F_n} \right) + \alpha_m \cdot \frac{F_{n3}}{F_n} \end{aligned} \quad (4)$$

де: F_n – площа поверхні тушки;

n_3 – площа поверхні тушки, змочена водою від аерозольного розпилення.

З виразу (4) випливає, що втрати маси тушки при охолодженні будуть мінімальними, а ефективний коефіцієнт тепловіддачі – максимальним, якщо поверхня тушки буде змочена водою (тобто, коли $F_{n3}/F_n=1$). Втім, надлишок вологи буде погіршувати якість тушки та збільшить витрати води. У зв'язку з цим, процес зволоження необхідно здійснювати так, щоб кількість вологи, що випаровується з поверхні тушки з урахуванням зміни $C_n - C_{сер}$, відповідала б кількості води, що підводиться до поверхні за рахунок осадження вологи з аерозолі, або була б незначно меншою.

Для розв'язання завдання з визначення тривалості етапів зрошування та етапів підсушування має бути використано рівняння спрощеної задачі нестационарної теплопровідності тіл циліндричної форми у повітряному середовищі постійної температури за змінного коефіцієнта тепловіддачі. Таке спрощення не призведе до великої похибки, оскільки температура середовища в запропонованому способі змінюється незначно (від 3°C до 0°C) і, крім того, в наближеному завданні температура середовища прийнята рівною середньоінтегральному значенню змінної за час даного процесу:

$$T_{сер} = \frac{1}{\tau_{охол}} \cdot \int_0^{\tau_{охол}} T_{сер}(\tau) \cdot d\tau \quad (5)$$

де: $T_{сер}$ і $T_{сер}(\tau)$ – температура середовища відповідно середньоінтегральна і поточна;

$\tau_{охол}$ і τ відповідно тривалість охолодження і поточний час процесу;

Для визначення тривалості етапів зрошування і інтервалів підсушування тіла за формою необмеженої кулі, можна скористатися з розв'язання завдання нестационарної теплопровідності в даному тілі за змінних граничних умов третього роду (5).

При охолодженні тушки це завдання можна також сформулювати для кожного етапу зрошування або інтервалу підсушування як завдання нестационарної теплопровідності в необмеженому циліндрі за постійних граничних умов третього роду

$$\partial T / \partial \tau = \alpha \cdot \Delta T (\tau > 0, 0 \leq r \leq R); \quad (6)$$

$$T(r, \tau = 0) = f(r); \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{\alpha_k}{\lambda} [T(R, \tau)] - T_{сер}; \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (9)$$

де: α – температуропровідність тіла, що охолоджують,

T – температура тіла, яке охолоджують

τ – тривалість охолодження під час зрошування чи інтервалу підсушування;

$$\Delta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \right) - \text{оператор Лапласа}$$

де: r – просторова координата;

$f(r)$ – температурний розподіл в тілі на початку етапу або в інтервалі;

R – визначальний розмір тіла (радіус тушки);

α_k – коефіцієнт тепловіддачі від тушки до повітря;

$T_{сер}$ – температура середовища.

Якщо початкова температура охолоджуваного тіла перед першим етапом зрошування по всьому обсягу однакова й дорівнює $f(r) = T_0$, то розв'язання системи рівнянь (6)–(9) для k -го інтервалу чи етапу має вигляд:

$$T_K(r, \tau) = T_{cep}(T_{cep} - T_0) = \sum_{n\kappa=1}^{\infty} A_n \kappa \exp\left(-\mu_n^2 \kappa \frac{a\tau}{R^2}\right) \times J_0\left(-\mu_n \kappa \frac{r}{R}\right) \times \prod_{j=2}^{\kappa=1} \sum_{nj=1}^{\infty} A_{nj} B_{nj} \exp(-\mu_{nj}^2 - F_{0j}) \sum_{nl=1}^{\infty} A_{nl} B_{nl} \exp(-\mu_{nl}^2 - F_{0l}) \frac{J_1(\mu_{nl})}{(\mu_{nl})} \quad (10)$$

де:

$$A_{nl} = \frac{2}{J_0^2(\mu_{nl}) + J_1^2(\mu_{nl})}; (l=1, \dots, 2, \dots, k) \quad (11)$$

$$B_{nl} = \frac{J_0(\mu_{nl}) J_0(\mu_{nl+1}) [B_{il} - B_{il+1}]}{(\mu_{nl}^2 - \mu_{nl+1}^2)}; (l=1, \dots, 2, \dots, k-1) \quad (12)$$

μ_{nl} – корінь трансцендентного рівняння:

$$B_{nl} = \frac{J_0(\mu_{nl})}{J_1(\mu_{nl})} = \frac{\mu_{nl}}{B_{il}}; (l=1, \dots, 2, \dots, k-1) \quad (13)$$

J_0 і J_1 – функції Бесселя першого роду відповідно нульового й першого порядків,

$$\Delta = \frac{t}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \right)$$

$$B_{il} = \frac{\alpha_l R}{\lambda} - \text{критерій Біо}$$

$$F_{0l} = \frac{\alpha \tau_{nl}}{R^2} - \text{критерій Фур'є},$$

де: τ_{nl} - тривалість l -го етапу або інтервалу

Отримане рішення легко реалізується за допомогою ЕОМ. При розрахунку тривалості чергового зрошення або підсушування, процес теплообміну тушки птиці з середовищем при заданому коефіцієнті тепловіддачі, розглядається з урахуванням отриманих раніше теплових впливів на нього протягом усіх попередніх етапів зрошування або інтервалів підсушування.

Задаються значенням коефіцієнту тепловіддачі, наведеним вище $\alpha_k = 106 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. За допомогою отриманого рішення (10) визначається тривалість етапів зрошування і інтервалів підсушування для тушок різної вгодованості і габаритів.

При цьому, етап зрошування вважають закінченим при досягненні температури поверхні тушки, близької температури середовища. Далі, з урахуванням отриманого розподілу температури в тілі тушки птиці, розглядається теплообмін на інтервалі підсушування. Тривалість підсушування визначається часом, протягом якого температура поверхні тушки підвищується відносно температури середовища T_{cep} за рахунок внутрішнього тепла на $2-3^\circ\text{C}$ протягом перших і на 1°C – останніх інтервалів.

Висновки

1. Експериментально, методом локального моделювання, визначено раціональні умови проведення процесів теплообміну, які відбуваються при охолодженні, як модельного тіла, так і тушок курчат-бройлерів: температура середовища $t_{cep} = 3^\circ\text{C} \div 0^\circ\text{C}$, масова швидкість руху води (водно-контактний спосіб) $w_{\gamma B} \approx 0,2 \text{ м/с}$, повітря та гідроаерозолі (при їх застосуванні) – $w_{\gamma B} \approx 2,5 \text{ м/с} \div 2,8 \text{ м/с}$. За раціональних умов розраховано коефіцієнти тепловіддачі (α) від тушок до охолоджуючого середовища відповідно способам охолодження: для водяного (зануренням) – $\alpha_B \leq 550,0 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, для

гідроаерозольного – $\alpha_r \leq 200,0$ Вт/ м²·К, для гідроаерозольного з почерговим підсушуванням поверхні тушок холодним повітрям – $\alpha_{гп} \leq 106,0$ Вт/ м²·К, для повітряного- $\alpha_{п} \leq 34,1$ Вт/ м²·К.

2. За результатами порівняльних комплексних досліджень процесів охолодження тушок курчат-бройлерів різними способами, з урахуванням отриманих коефіцієнтів тепловіддачі, доведено пріоритетність процесу охолодження тушок курчат-бройлерів гідроаерозоль-повітряним способом (зрошування тушок гідроаерозоллю з періодичним підсушуванням поверхні потоками холодного повітря), як такого, що забезпечує якість м'яса птиці на цьому етапі за помірних експлуатаційних витрат.

3. Запропоновано алгоритм розрахунку тривалості етапів «зрошування – підсушування» для гідроаерозоль-повітряного способу охолодження тушок птиці залежно від їх геометричних розмірів і встановлено умови його інженерної реалізації: процес зволоження необхідно вести так, щоб кількість вологи, що випаровується з поверхні тушки, відповідала б кількості води, що підводиться до поверхні за рахунок осадження її з аерозолі, або була незначно меншою.

Бібліографія

1. Levy F. A diagram for the transfer of heat and mass and Its application to problems of Refrigeration, Annexe, 1970-1 au Bulletin de l'IIF p. 271-286.
2. Tamm W. Neue Untersuchungen über fleischkühlung. "Der Kalte - Klima - Praktiker", 1972, N 12, s. 380-387; 1973, N 1, s. 2-8.
3. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. М.: Пищевая пром-сть, 1979.
4. Желиба Ю. А., Онищенко В. П., Головский С.Е., Яковлев А.В. Экспериментальные исследования теплообмена при холодильной обработке упакованных тушек кур. Депон. в ГНТБ Украины. 22.02.94. N 354. 15 с.
5. Цветков А.И., Оленев А.К. Аналитическое исследование процесса гидроаэрозольно-испарительного охлаждения тушек птицы. Вестник МАХ. 1998. Вып. 2. С. 48-49.
6. Дослідження з оптимізації конструкторських рішень камер інтенсивного охолодження ковбасних виробів. Звіт з НДР та ДКР ТІММ УААН, № 267.93 Інв. N 0393U009002. К., 1994. 48 с.
7. James, C. Vincent C., T. I. de Andrade Lima, James S.J. The primary chilling of poultry carcasses – a review. International Journal of Refrigeration, 2006, v. 29, n. 6, p. 847-862.
8. Landfeld A., Houska M. Prediction of heat and mass transfer during passage of the chicken through chilling tunnel. Journal of Food Engineering, 2006, v. 72, n. 1, p. 108-112.
9. Carciofi B. A. M., Laurindo J. B. Water uptake by poultry carcasses during cooling by water immersion. Chemical Engineering and Processing, 2007, v. 46, n. 5, p. 444-450.
10. Вербицкий С. Б., Шевченко В. В., Бондарь С. В. Производство мяса птицы. Тенденции, технологии, оборудование. Мясной бизнес. 2010. № 4. С. 60-70.
11. Selvarani Elahi, Joanna Topping. Study of physiological water content of poultry reared in the EU. Contract number: 30-CE-0460798/00-25. Final Report. Report Number LGC CPFC/2012/492.
12. Гущин В.В., Маковеев И.И., Митрофанов Н.С. та другие. Определение массовой доли влаги, выделившейся при размораживании м тушек и их частей тушек цыплят-бройлеров в зависимости от методов охлаждения. Птица и птицепродукты. 2014. №6. С.54-56.
13. L.L. Young, D.P. Smith, Moisture retention by water- and air-chilled chicken broilers during processing and cutup operations, Poult. Sci. 2004.v 83.119–122 p.
14. Усатенко Н. Ф. Эффект влияния технологических факторов на змiну маси тушок курчат-бройлерів. Продовольчі ресурси: збірник наукових праць Інституту продовольчих ресурсів НААН. 2014. № 3. С. 92-97

15. Regulation (EC) No 543/2008 laying down detailed rules for the application of Council Regulation (EC) No 1234/2007 as regards the marketing standards for poultry meat (OJ L 15)

16. Thomson J.E., Bailey J.S., Cox N.A. and other. Salmonella on broiler carcasses as affected by fresh water input rate and chlorination of chiller water. J Food Prot. 1979. v 42. 954-955.

17. Ellerbroek L. 1997. Airborne microflora in poultry slaughtering establishments. Food Microbiol. 1997. V 14. P 527-531.

18. Fluckey, W.M., Sanchez M.X., McKee S.R. and other. Establishment of a microbiological profile for an air-chilling poultry operation in the United States. J Food Prot. 2003. V 66. P 272-279.

19. Усатенко Н.Ф., Калашник М.Г., Вербицкий С.Б. та ін. Обґрунтування раціональних умов холодильної обробки тушок в технології виробництва м'яса курчат-бройлерів. Продовольчі ресурси : збірник наукових праць Інституту продовольчих ресурсів НААН. 2020. № 12. С.43- 49.

20. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.

21. Вукалович М.П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Машиностроение, 1967. 160 с.

22. Лыков А.В. Теория теплопроводности, М. : Высшая школа, 1967. 599 с.

23. Михеев М.А. Основы теплопередачи . 2-е изд.- М. : Энергия. 1949. 396 с.

References

1. Levy F.(1970) A diagram for the transfer of heat and mass and Its application to problems of Refrigeration, Annexe.1 au Bulletin de l'IIF p. 271-286.

2. Tamm W. (1972, 1973,) Neue Untersuchungen über Fleischkühlung. "Der Kalte - Klima - Praktiker". N 12, s. 380-387, N 1, s. 2-8.

3. Chizhov G.(1979) Teplofizicheskie processy v holodil'noj tekhnologii pishchevykh produktov.[Thermophysical Processes in Refrigeration Technology of Food Products]. М.: Pishchevaya prom-st'. [in Russian].

4. Jeliba U., Onischenko V., Golovskiy S., Yakovlev A. (1994) Eksperimentalnie issledovaniya teploobmena pri holodilnoi obrabotke ypakovannix tushek kur. [Experimental studies of heat transfer during refrigeration processing of packaged chicken carcasses]. Depon. V GNTB Ukraini. N 354. 15 p. [in Russian].

5. Zvetkov A., Olenov A. (1998). Analiticheskoe issledovanie prozessa gidroaerozolno – isparitelnogo ohlajdeniya tushek ptizi. [Analytical study of the process of hydroaerosol-evaporative cooling of poultry carcasses]. Vestnik MAX. V 2. 48-49 p. [in Russian].

6. Doslidjennya z optimizacii konstruktorskix rishen kamer intensivnogo oholodjennya kovbasnih virobiv. Zvit po NDR ta DKR TIMM YAAN [Research on optimization of design decisions of chambers of intensive cooling of sausage products. Report on GDR and DKR TIMM UAAS], № 267.93

Inv. № 0393U009002. K. 1994.49 p. [in Ukrainian].

7. James C. Vincent C., T. de Andrade Lima, James S. (2006). The primary chilling of poultry carcasses - a review. International. Journal of Refrigeration, v. 29, n. 6, p. 847-862.

8. Landfeld A., Houska M. (2006). Prediction of heat and mass transfer during passage of the chicken through chilling tunnel. Journal of Food Engineering, v. 72, n. 1, p. 108-112.

9. Carciofi B., Laurindo J. (2007). Water uptake by poultry carcasses during cooling by water immersion. Chemical Engineering and Processing, v. 46, n. 5, p. 444-450.

10. Verbizkiy S.(2010) Proizvodstvo myasa ptizi. Tendenzii, tehnologii, oborudovanie [Poultry meat production. Trends, technologies, equipment]. Myasnoi biznes. [Meat business]. № 4. p. 60 – 70. [in Russian].

11. S. Elahi, J. Topping. Study of physiological water content of poultry reared in the EU. Contract number: 30-CE-0460798/00-25. Final Report. Report Number LGC CPFC/2012/492.
12. Gushchin V., Makoveev I., Mitrofanov N., Makoveeva A., Chunina G., Smirnova I. (2014.) Opredelenie massovoi doli vlagi, videlivshiysya pri razmorajivanii tushek i ih chastei tushek ziptyat – broilerov v zavisimosti ot metodov ohlajdeniya. [Determination of the mass fraction of moisture released during defrosting of carcasses and their parts of carcasses of broiler chickens, depending on the cooling methods.] Ptiza i ptizeproducti.[Poultry and poultry products] № 6. p. 54 – 56. [in Russian].
13. L. Young, D. Smith (2004) Moisture retention by water- and air-chilled chicken broilers during processing and cutup operations, Poult. Sci. 83. P 119–122.
14. Usatenko N. (2014) Efekt vplyvy tehnologichnih faktoriv na zminy masi tushok kurchat-broileriv.[The effect of technological factors on the change in carcass weight of broiler chickens]. Prodovolchi resursi: zbirnik naukovih praz Institut prodovolchih resursiv NAAN [Food resources: a collection of scientific works of the Institute of Food Resources of NAAS]. № 3. 92 – 97 p. [in Ukrainian].
15. Regulation (EC) No 543/2008 laying down detailed rules for the application of Council Regulation (EC) No 1234/2007 as regards the marketing standards for poultrymeat (OJ L 15
16. Thomson J., Bailey J., Cox N, Posey D, Carson M. (1979). Salmonella on broiler carcasses as affected by fresh water input rate and chlorination of chiller water. J Food Prot. 42:954-955, 967.
17. Ellerbroek, L. (1997). Airborne microflora in poultry slaughtering establishments. Food Microbiol. 14:527-531.
18. Fluckey W., Sanchez M., McKee S., Smith D., Pendleton E., Brashears M. (2003). Establishment of a microbiological profile for an air-chilling poultry operation in the United States. J Food Prot. 66:272-279.
19. Usatenko N., Kalashnik M., Verbizkiy S., Kopilova E., Ohrimenko U., Krizskaya T.(2020). Obgruntuvannya razionalnih umov holodilnoi obrobki tushok v tehnologii virobniztva myasa kurchat – broileriv.[Substantiation of rational conditions of refrigeration processing of carcasses in the technology of broiler chicken meat production]. Prodovolchi resursi : zbirnik naukovih praz Institutu prodovolchih resursiv NAAN. [Food resources: a collection of scientific works of the Institute of Food Resources of NAAS]. № 12. 43 – 49 p. [in Ukrainian].
20. Ginzburg A., Gromov M, Krasovskaya G.(1990) Teplofizicheskie harakteristiki pishchevix productov: Spravochnik. [Thermophysical characteristics of food products. Directory.] M.: Agropromizdat. 287 p. [in Russian].
21. Vukalovich M. (1967). Teplofizicheskie svoistva vodi i vodyanogo para. [Thermophysical properties of water and steam] M.: Mashinostroenie. 160 p. [in Russian].
22. Likov A. (1967). Teoriya teploprovodnosti [Heat conduction theory]. M. : Visshaya shkola, 599 p. [in Russian].
23. Miheev M. (1949). Osnovi teploperedachi. 2- e izd[Basics of heat transfer. 2nd ed.]. M.: Energiya. 396 p. [in Russian].