

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ БІЛОГО М'ЯСА КУРЯТИНИ (ФІЛЕ) ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ

**Топольник В.Г., д-р техн. наук, професор, Стукальська Н.М., асистент
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-
Барановського**

У статті наведено розрахунок статистичної обробки результатів експерименту з метою знаходження оптимальних умов процесу подрібнення м'ясної сировини з курятини (філе) для зменшення витрат електроенергії.

In the article the calculation of statistical treatment of results of experiment with the purpose of finding of optimum terms of process of growing of meat raw material shallow is resulted from a chicken (filet) for diminishing of charges of electric power.

Ключові слова: подрібнення, м'ясо курятини, показники якості, енергоємність, математико-статистична обробка.

За даними [1], м'ясо – основне джерело повноцінних білків в раціоні людини, в яких містяться усі незамінні амінокислоти необхідні для забезпечення пластичних процесів в організмі. За кількістю ненасичених жирних кислот м'ясо птиці стоїть попереду свинини та яловичини з дієтичної точки зору. Воно є джерелом білку і амінокислот, при невеликому вмісті калорій. Біле м'ясо (філе) містить у собі менше жиру, більше білку та вологи, а червоне (гомілка) багато залізом і жиром. Ці особливості є головними при використанні м'яса курятини в харчуванні людини, особливо вегетаріанців і людей похилого віку. Самою дієтичною частиною тушки є філе. Саме тому темпи зростання в споживанні м'яса птиці в розвинених країнах вищі, ніж для інших типів м'яса [2].

В Україні зростання поголів'я птиці почало відновлюватися ще в 90 роках і зараз це одна з важливих галузей у тваринництві. В умовах стрімкого зростання попиту українські підприємства значно збільшили випуск м'яса птиці. Доля цієї категорії продукції в 2010 році склала більше 70% від об'єму промислового виробництва м'яса в країні. Крім того, м'ясо птиці стало заміником для більшості споживачів м'яса з огляду на те, що останніми роками відбувається суттєве скорочення пропозиції м'яса великої рогатої худоби та свинини, а відповідно зростають ціни на них [3]. У 2009-2011 рр. м'ясо птиці за споживанням на душу населення в більшості країн світу стоїть після свинини і, можливо, що в найближчому майбутньому воно займе перший рядок [4]. На ринку м'яса птиці склався великий попит на цю сировину при виробництві багатьох видів ковбас та січених м'ясних напівфабрикатів.

Процес подрібнення м'ясної сировини енергоємний, тому важливе стратегічне значення при подрібненні м'ясної сировини має зменшення витрат електроенергії та отримання фаршу визначеної якості. Більше половини усього діючого обладнання м'ясопереробної промисловості – це вовчок, як головна машина м'ясопереробної індустрії.

За думкою В.Д. Косого і В.П. Дорохова [5], факторами, що впливають на роботу вовчка, якість подрібнення та зниження енергоємності є сировина, конструктивні особливості обладнання, ріжучий інструмент, кінематичні параметри та умови експлуатації. Вони вважають, що фізико-хімічні особливості подрібненої сировини є визначеними при подрібненні. Однак їх дослідження довели, що при однаковому ступеню подрібнення одного виду сировини, але при використанні різноманітної компоновці ріжучого механізму вовчка (застосування різних діаметрів отворів решіток, використання криволінійної чи прямолінійної кромки ножа), витрати електроенергії коливаються від 2,5 до 12 кВт·год/т, що доказує необхідність пошуку оптимального співвідношення факторів, що впливають на якість подрібнення.

В.В. Кузьмін [6] у своїх дослідженнях виявив, що при подрібненні котлетної яловичини використання ножа з криволінійною ріжучою кромкою при швидкості обертання 300 об/хв. енергоємність процесу знижується на 25% у порівнянні з використанням ножа з прямолінійною осьювою ріжучою кромкою, а при подрібненні яловичини вищого сорту споживання електроенергії менше на 11%.

У роботі [7] наводяться результати застосування зворотно-поступального руху ножових решіток при подрібненні яловичини 1 сорту. Проведені дослідження доказують, що збільшуючи частоту зворотно-поступального руху решіток з 5 до 15 Гц, зменшується витрата електроенергії під час процесу подрібнення і покращується ступінь подрібнення м'ясної сировини.

Аналізуючи роботи авторів, можна зробити висновок, що конструктивні параметри обладнання суттєво впливають на якість процесу подрібнення і витрати електроенергії, але рекомендацій щодо застосування певних видів робочих органів вовчка при подрібненні м'яса курятини немає. Отже виникає завдання знаходження оптимальних умов проведення процесу подрібнення м'ясної сировини з курятини з метою зниження енергоємності процесу.

Метою нашої роботи було знаходження математичної моделі залежності енергоємних показників процесу подрібнення білого м'яса курятини (філе) від умов проведення процесу, яку можна використати для обґрунтування впливу параметрів, що характеризують процес подрібнення, і прогнозування зниження енергоємності за конкретних параметрів процесу.

Для вибору найкращих умов процесу подрібнення м'ясної сировини з курятини (філе) з метою зниження енергоємності процесу необхідно порівняти різноманітні варіанти процесу, врахувати та надати висновки щодо впливу великої кількості чинників на даний показник. Параметри оптимізації повинні бути: ефективними з точки зору досягнення цілі; універсальними; кількісними і виражатися одним числом; статистично ефективними; мати фізичний зміст; дійсними для усіх різноманітних станів. З урахуванням цих вимог в якості варійованих параметрів було обрано: $n(x_1)$ - швидкість обертання валу, об/хв; $d(x_2)$ - діаметр отворів решітки, м·10⁻³; $F(x_3)$ - сила подачі сировини, Н; $\alpha(x_4)$ - кут ножа, град.

Для проведення експерименту використовували м'ясорубку торгової марки «BRAUN», перетворювач частоти «Lenze», за допомогою якого варіювали швидкість обертання приводного валу і потенціометр для виміру потужності і витрат електроенергії під час процесу подрібнення.

Для точності і достовірності отриманих даних використано математико-статистичну базу планування екстремального експерименту за методом Бокса-Уілсона [8]. Ця методика дозволяє виявити аналітичну залежність впливу вхідних параметрів на якість процесу.

У таблиці 1 наведено область варійованих факторів з урахуванням апріорної інформації та реальних умов здійснення процесу подрібнення. Параметр оптимізації y – питома витрата електроенергії за один цикл подрібнення, кВт·год/т.

Була реалізована полурепліка повного чотирьохфакторного експерименту (2⁴⁻¹) з визначальним контрастом $x_4 = x_1 x_2 x_3$. Тому було проведено 8 дослідів з двократною повторністю, які були рандомізовані за допомогою випадкових чисел.

Статистичну обробку даних проводили за методикою [8].

Дисперсію окремого дослідів S_j^2 відповідно плану експерименту розраховували за формулою:

$$S_j^2 = 2(y_1 - \bar{y}_j)^2. \quad (1)$$

Таблиця 1 – Область факторного простору експерименту

| Фактор | | Найменування фактору | Розмірність | Рівні параметру | | | |
|----------|-------|--------------------------|--------------------|-----------------|--------|----------|------|
| | | | | Верхній | Нижній | Нульовий | Крок |
| | | | | +1 | -1 | 0 | - |
| n | x_1 | Швидкість обертання валу | об/хв. | 150 | 70 | 110 | 40 |
| d | x_2 | Діаметр отворів решітки | м·10 ⁻³ | 6 | 3 | 4,5 | 1,5 |
| F | x_3 | Сила подачі сировини | Н | 15 | 5 | 10 | 5 |
| α | x_4 | Кут ножа | град. | 90 | 30 | 60 | 30 |

Розрахунок значення дисперсії занесено до таблиці 2.

Після обчислення дисперсії було перевірено гіпотезу щодо їх однорідності за допомогою F -критерію Фішера по формулі:

$$F = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2} = \frac{0,00320}{0,00045} = 7,11. \quad (2)$$

Розраховане значення критерію $F_p(7,11)$ порівнювали з табличним значенням $F_{табл.}$ для прийнятого рівня значущості $\alpha=0,05$ та відповідних числах ступенів свободи для f_1 та f_2 для чисельника і знаменника ($f=n-1=1$) тобто $f_1=f_2=1$, що дорівнює 161 [9].

Таблиця 2. – Розрахунок дисперсії для питомої витрати електроенергії, кВт·год/т

| Номер досліджу | Порядок реалізації | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | y_1 | y_2 | \bar{y}_1 | Δy_j | Δy_j^2 | S_j^2 |
|----------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|--------------|----------------|---------|
| 1 | 09, 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5,35 | 5,30 | 5,325 | 0,025 | 0,000625 | 0,00125 |
| 2 | 14, 10 | 1 | 1 | -1 | -1 | 5,71 | 5,67 | 5,690 | 0,020 | 0,000400 | 0,00080 |
| 3 | 04, 13 | 1 | -1 | 1 | -1 | 6,22 | 6,18 | 6,200 | 0,020 | 0,000400 | 0,00080 |
| 4 | 08, 12 | 1 | -1 | -1 | 1 | 6,63 | 6,58 | 6,605 | 0,025 | 0,000625 | 0,00125 |
| 5 | 01, 07 | -1 | 1 | 1 | -1 | 6,83 | 6,91 | 6,870 | -0,040 | 0,001600 | 0,00320 |
| 6 | 06, 05 | -1 | 1 | -1 | 1 | 6,41 | 6,38 | 6,395 | 0,015 | 0,000225 | 0,00045 |
| 7 | 11, 15 | -1 | -1 | 1 | 1 | 5,41 | 5,49 | 5,450 | -0,040 | 0,001600 | 0,00320 |
| 8 | 02, 03 | -1 | -1 | -1 | -1 | 6,51 | 6,55 | 6,530 | -0,020 | 0,000400 | 0,00080 |
| $\sum_{j=1}^8 S_j^2$ | | | | | | | | | | | 0,01175 |

Оскільки $F_p=7,11 < F_{табл}=161$, то гіпотеза про однорідність дисперсій приймається.

Перевірка однорідності дисперсій досліджу по критерію Кохрена G_p для y_1 по формулі (3) також підтверджує однорідність дисперсій.

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = \frac{0,00320}{0,01175} = 0,27. \quad (3)$$

Табличне значення цього критерію при $\alpha=0,05$ і ступеню свободи $f_1=1$ і $f_2=8$ дорівнює 0,6798. Оскільки розрахункове значення G_p -критерію не перевищує табличного значення $G_{табл}$ -критерію (умова $G_p < G_{табл}$), тобто $0,27 < 0,6798$, отже, дисперсії дослідів експерименту однорідні.

Оскільки дисперсії S_j^2 однорідні, визначали дисперсію параметра оптимізації S_y^2 (дисперсію відтворюваності експерименту), яку обчислювали за формулою :

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 = \frac{0,01175}{8} = 0,0015. \quad (4)$$

Залежність питомих енерговитрат від умов процесу має вигляд $y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} b_{ij} x_{ij} x_{lj}$

де b_0 – вільний член рівняння регресії;

b_j – коефіцієнт регресії при головних чинниках;

x_j – кодоване значення чинника;

x_{ij}, x_{lj} – взаємодія чинників.

Коефіцієнт регресії розраховували по формулам з урахуванням даних табл. 2.

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j. \quad (5) \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j. \quad (6) \quad b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} \bar{y}_j. \quad (7)$$

Значення коефіцієнтів: $b_0 = 6,13$; $b_1 = -0,18$; $b_2 = -0,06$; $b_3 = -0,17$; $b_4 = -0,19$.

Для перевірки статистичної значущості цих коефіцієнтів необхідно розрахувати величину довірчого інтервалу.

Дисперсію коефіцієнтів регресії S_{bi}^2 коефіцієнта було визначено по формулі:

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{nN} = \frac{0,0015}{8 \cdot 2} = 0,0001, \quad (8)$$

тоді по формулі (6) S_{bi}

$$S_{bi} = +\sqrt{S_{bi}^2} = \sqrt{0,001} = 0,01. \quad (9)$$

Розрахуємо величину довірчого інтервалу для коефіцієнтів Δb_i по формулі:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi} = 2,31 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ (при } \alpha=0,05 \text{ и } f=8). \quad (10)$$

Порівняння коефіцієнтів регресії з довірчим інтервалом дозволяє стверджувати, що всі визначені коефіцієнти статистично значущі, оскільки вони більше за довірчий інтервал. У цьому випадку математична модель залежності витрат електроенергії від контрольованих параметрів має вигляд:

$$y = 6,13 - 0,18x_1 - 0,06x_2 - 0,17x_3 - 0,19x_4. \quad (11)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння для кожного рядка матриці 2 знайдемо розрахункові значення \hat{y}_j . Для цього, в рівняння (11) підставляємо кодовані значення для кожного x .

В таблиці 3 наведено розрахункові значення параметру оптимізації і дані, що необхідні для визначення дисперсії адекватності рівняння (11).

Таблиця 3 - Дані для обчислення дисперсії адекватності

| Номер досліду | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | \bar{y}_j | \hat{y}_j | $\Delta y = (\bar{y}_j - \hat{y}_j)$ | Δy^2 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|--------------------------------------|--------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5,325 | 5,531 | 0,206 | 0,0423 |
| 2 | 1 | 1 | -1 | -1 | 5,690 | 6,253 | 0,563 | 0,3171 |
| 3 | 1 | -1 | 1 | -1 | 6,200 | 6,036 | -0,164 | 0,0270 |
| 4 | 1 | -1 | -1 | 1 | 6,605 | 6,001 | -0,604 | 0,3653 |
| 5 | -1 | 1 | 1 | -1 | 6,870 | 6,266 | -0,604 | 0,3653 |
| 6 | -1 | 1 | -1 | 1 | 6,395 | 6,231 | -0,164 | 0,0270 |
| 7 | -1 | -1 | 1 | 1 | 5,450 | 6,013 | 0,563 | 0,3171 |
| 8 | -1 | -1 | -1 | -1 | 6,530 | 6,736 | 0,206 | 0,0423 |
| $\sum \Delta y^2$ | | | | | | | | 1,5034 |

Дисперсію адекватності, яка характеризує розсіяння експериментальних і розрахункових даних розраховували по формулі:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - m} = \frac{1,534}{8 - 5} = 0,511. \quad (12)$$

Здійснюємо перевірку адекватності рівняння за допомогою F -критерію Фішера по формулі:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,511}{0,0015} = 340. \quad (13)$$

Порівнюємо F_p з $F_{табл.}$ при $\alpha = 0,05$, $f_1=3$ і $f_2=8$, який рівний $F=4,07$, тобто розрахункове значення $F_p=340 > F_{табл.}=4,07$. Таким чином, рівняння (11) не адекватне.

Приймаємо рішення - ввести в рівняння (11) взаємодію чинників: x_1x_3 , x_1x_4 , x_3x_4 . У таблицю 4 наведено їх кодовані значення.

Коефіцієнти регресії розраховані по формулах (5-7): $b_{13}=-0,02$; $b_{14}=0,20$; $b_{34}=-0,38$. Всі коефіцієнти статистично значущі.

Рівняння має вигляд:

$$y_i = 6,13 - 0,18x_1 - 0,06x_2 - 0,17x_3 - 0,19x_4 - 0,02x_1x_3 + 0,20x_1x_4 - 0,38x_3x_4 \quad (14)$$

Таблиця 4 – Дані для розрахунку коефіцієнтів регресії адекватного рівняння

| Номер досліджу | Порядок реалізації | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_1x_3 | x_1x_4 | x_3x_4 | \bar{y}_j | \hat{y}_j | Δy | S_j^2 |
|----------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|-------------|------------|---------|
| 1 | 09, 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5,325 | 5,325 | 0 | 0 |
| 2 | 14, 10 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 5,690 | 5,690 | 0 | 0 |
| 3 | 04, 13 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 6,200 | 6,200 | 0 | 0 |
| 4 | 08, 12 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 6,605 | 6,605 | 0 | 0 |
| 5 | 01, 07 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 6,870 | 6,870 | 0 | 0 |
| 6 | 06, 05 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 6,395 | 6,395 | 0 | 0 |
| 7 | 11, 15 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 5,450 | 5,450 | 0 | 0 |
| 8 | 02, 03 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 6,530 | 6,530 | 0 | 0 |
| $\sum_{j=1}^8 S_j^2$ | | | | | | | | | | | | 0 |

Оскільки $\sum \Delta y^2 = 0$, то рівняння (14) адекватне ($F_{роз} = 0 < F_{табл} = 4,07$)

Рівняння (14) незручне для практичних розрахунків. Тому, використовуючи формули переходу від кодованих до натуральних значень чинників (N, d, F, α):

$$x_1 = \frac{N - N_0}{\Delta N}; \quad x_2 = \frac{d - d_0}{\Delta d}; \quad x_3 = \frac{F - F_0}{\Delta F}; \quad x_4 = \frac{\alpha - \alpha_0}{\Delta \alpha}, \quad (15)$$

де N_0, d_0, F_0, α_0 – натуральні значення чинників на нульовому рівні;
 $\Delta N, \Delta d, \Delta F, \Delta \alpha$ – значення інтервалів варіювання чинників,

визначимо вираз кодованих чинників:

$$x_1 = \frac{N - 110}{40}; \quad x_2 = \frac{d - 4,5}{1,5}; \quad x_3 = \frac{F - 1}{0,5}; \quad x_4 = \frac{\alpha - 60}{30} \quad (16)$$

і розрахуємо відповідні значення:

$x_1 = 0,025N - 2,75$; $x_2 = 0,66667d - 3$; $x_3 = 2F - 2$; $x_4 = 0,03333\alpha - 2$; $x_1x_3 = 0,05NF - 0,05N - 5,5F + 5,5$;
 $x_1x_4 = 0,00083N\alpha - 0,05N - 0,09167\alpha + 5,5$; $x_3x_4 = 0,06667F\alpha - 4F - 0,06667\alpha + 4$ та підставимо в рівняння (14).

Після математичних перетворень рівняння, яке описуватиме залежність питомої витрати електроенергії в залежності від умов подрібнення курячого філе, приймає вигляд:

$$Q = 6,98047 - 0,01339N - 0,04208d + 1,30719F + 0,00104\alpha - 0,00103NF + 0,00017N\alpha - 0,02563F\alpha. \quad (17)$$

Аналізуючи рівняння (14), яке характеризує вплив окремих факторів та їх взаємодію на питому витрату електроенергії під час процесу подрібнення білого м'яса курятини (філе) слід констатувати наступне. Для зменшення питомої витрати електроенергії необхідно збільшувати швидкість обертання валу, діаметр отворів решітки, силу подачі сировини та кут ножа. Найбільший вплив на витрати електроенергії при подрібненні має парна взаємодія сили подачі (x_3) з кутом ножа (x_4). Ефект впливу на енерговитрати головних чинників майже однаковий, найменший ефект встановлено для діаметру отворів решітки (x_2).

Таким чином, отримані функції регресії в кодованих та натуральних значеннях варійованих чинників, які адекватно описують вплив їх на параметр оптимізації.

Висновки. Динаміка споживання м'яса курятини позитивна – збільшується з кожним роком, тому вивчення впливу умов процесу подрібнення цієї сировини на енерговитрати має певний науковий інтерес.

Для пошуку оптимальних умов використано метод планування експерименту Бокса-Уілсона, що дозволяє заощадити трудозатрати на наукове дослідження.

Знайдено математичну модель залежності питомої витрати електроенергії під час процесу подрібнення білого м'яса курятини (філе) від варійованих чинників. Кодовані значення чинників в математичній моделі дозволяють визначити величину впливу кожного чинника, направленість руху до екстремуму значення параметру оптимізації. Naturalні значення чинників в математичній моделі дозволяють управляти витратами енергії на процес подрібнення за допомогою параметрів (умов) процесу. Визначені раціональні умови процесу подрібнення м'яса курятини (філе): швидкість обертання приводного валу - 150 об/с; діаметр отворів решітки - $6 \cdot 10^{-3}$ м; сила подачі сировини - 15 Н; кут ножа - 90° .

Подальші наші дослідження будуть спрямовані на виявлення залежності структурно-механічних характеристик курячого фаршу від умов подрібнення.

Література

1. Ячнева М.О. Фізико-хімічні та біологічні технології м'яса та м'ясопродуктів [Текст] / М.О. Ячнева, Л.В. Пешук, О.Б Дроменко // Навч. пос. – К. : Центр учбової літератури, 2009. – 304 с.
2. Сурай П. Роль яиц и мяса птицы в здоровом питании человека / Сурай П. // Международный общественно-политический журнал «Европа центр». – 2010. - №27. – С. 32-34.
3. Копитець Н. Г. Ринок м'яса птиці: поточна кон'юнктура і прогноз на I півріччя 2007 р. / Н.Г. Копитець // Мясной Бизнес. - 2007. —№ 2. С. 88-89.
4. Рынок мяса птицы за 2010 год [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (850 кбайт) // Информационно-аналитическое агенство «ИМИТ». - [Цит. 2010, 12 июля]. – Режим доступа: <<http://www.emeat/ru>>
5. Косой В.Д. Совершенствование производства колбас (теоретические основы, процессы, оборудование, технология, рецептуры и контроль качества) [Текст] / В.Д. Косой, В.П. Дорохов. – М.: ДеЛипринт, 2006. – 766 с.
6. Кузьмін В.В. Совершенствование процесса резания мясного сырья на основе математического моделирования формы режущих инструментов: автореф. дис. канд. техн. Наук : 05.18.12 [Текст] / В.В. Кузьмин. – СПб. – 2008. – 16 с.
7. Сидоряк А.Н. Совершенствование процесса измельчения мяса : автореф. дис.. канд.. техн.. наук : 05.18.12 / А.Н. Сидоряк. – М. – 2007. – 22 с.
8. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: Наука, 1976. – 280 с.
9. Таблицы математической статистики. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.