

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ В ПОДРІБНЮВАЧІ ЗА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИМ ПОКАЗНИКОМ

Шибка В.О.

здобувач вищої освіти ступеня Магістр

Костенко О.М.

д.т.н., професор кафедри безпеки життєдіяльності, професор

Дрожчана О.У.

старший викладач кафедри безпеки життєдіяльності

Полтавський державний аграрний університет

м. Полтава, Україна

Показники функціонування технічних систем, такі як продуктивність, якість продукції, надійність, керованість і інші, пов'язані між собою, взаємозалежні і взаємообумовлені: поліпшення одних показників призводить до погіршення інших. При цьому протиріччя технологічної системи, яке полягає в конфлікті найбільш важливих техніко-економічних показників, породжує безліч протиріч.

Дозволити протиріччя - значить прибрати негативний ефект, зберігаючи позитивний. Але зовсім усунути технічне протиріччя не можна. Поліпшення одних параметрів без погіршення інших не буває, і на зміну усунутому ефекту обов'язково прийде якийсь інший.

Основне технічне протиріччя в такій технологічній системі, як подрібнювач полягає в зниженні енерговитрат при збільшенні продуктивності. Суперечливі відомості в самій постановці завдання «створити технологічну систему з розширеними функціональними можливостями, кращої якості з заданим об'ємом одержуваного фаршу і з найменшими витратами» призводить як правило, до компромісних рішень [2].

Для вирішення «вузла» основного протиріччя між енерговитратами і продуктивністю виконані дослідження, що дозволяють вирішити задачу оптимального вибору продуктивності подрібнювача в інтервалі заданих значень за мінімальною величиною енергетичних витрат на одиницю маси подрібнювальної сировини [1].

Методологічний підхід у вирішенні основного технічного протиріччя полягає в оптимізації процесу подрібнення м'ясної сировини по техніко-економічному показнику, в якості якого використовується відношення сумарних енергетичних витрат у вартісному вираженні до витрати продукції, яка подається на подрібнення при обмеженнях на величину інтенсивного навантаження q (Н/м²) на решітку [1]:

$$R = \frac{C_e \sum_{i=1}^n N_{ei}}{Q} \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, n, w_{max} \leq [w], f_{max} \leq [f], \quad (1)$$

де C_e - ціна електроенергії, грн/кВт·год.;

$\sum_{i=1}^n N_{ei}$ - сумарні втрати потужності приводу подрібнення, $i = 1, 2, \dots, n$;

N_{e1} - потужність, що витрачається на продавлювання сировини в робочій отвір решітки при її різанні ножем;

N_{e2} - потужність, що витрачається на подолання сил тертя між подрібненою сировиною та робочим отвором решітки;

N_{e3} – потужність, що витрачається на подолання сил тертя між корпусом подрібнення та подрібнювальною сировиною;

N_{e4} - потужність, що витрачається на подолання сил тертя між поверхнею подавального шнека та сировини;

N_{e5} - потужність, що витрачається на деформації подрібнювальної сировини при її проходженні від бункера до подрібнювача;

N_{e6} - потужність, що витрачається на процес різання сировини хрестоподібним ножем;

N_{e7} - потужність, що витрачається на деформації сировини у міжпір'їєвому просторі ножа;

$w_{max}, [w]$ - максимальний та допустимий прогин решітки від радіального згинального моменту, м;

$f_{max}, [f]$ – максимальний та допустимий прогин ножа, м.

Продуктивність подрібнювача визначається співвідношенням:

$$Q = \rho v F, \quad (2)$$

де ρ - щільність подрібнювальної сировини , кг/м³;

v - швидкість протікання, м/с;

F - площа протікання, м².

З урахуванням рівняння руху сировини в процесі її подачі всередині циліндричного корпусу шнековим механізмом і різання хрестоподібним ножем, а також втрат енергії на тертя і деформацію, будемо використовувати вираз для визначення продуктивності подрібнювача в залежності від його основних конструктивних параметрів і кутової швидкості обертання гвинтового шнека [1]:

$$Q = \rho \frac{M_{\text{прив}} - M_{\text{тр}}^{\text{ц.о.к}} + M_{\text{ніж}}^{\text{різ}} + M_{\text{ніж}}^{\text{деф}} + M_{\text{тр}}^{\text{н.р}}}{F_{\text{отв}}^{\text{різ}} + F_{\text{отв}}^{\text{тр}} + F_{\text{деф}}^{\text{м'яс}} + F_{\text{ц.о.к}}^{\text{тр}} + F_{\text{шн}}^{\text{тр}}} \cdot \frac{\pi d^4}{4} \eta \left[1 - \frac{4mS_{\text{лез}}}{\pi(D_{\text{н}} + D_{\text{в}})} \right] \omega. \quad (3)$$

Із аналізу критерію (2) виходить, що при невеликій продуктивності

Q співвідношення $\frac{c \sum_{i=1}^n N_{ei}}{Q}$ буде збільшуватися, при надмірному збільшенні Q потужність приводу на переробку м'ясної сировини буде значно зростати, а значить буде зростати і співвідношення $\frac{c \sum_{i=1}^n N_{ei}}{Q}$. Звідси існування компромісу між показниками, що вступають в конфлікт, які визначаються функціональною залежністю $Q = f(\omega)$.

Виразимо чисельник виразу (2) через кутову швидкість обертання гвинтового шнека і ножа подрібнювача ω . Залежність сумарних втрат потужності приводу подрібнювача від ω апроксимувати квадратичним рівнянням за експериментальними даними [1]:

$$\sum_{i=1}^n N_{ei} = a\omega^2 + b\omega + c, \quad (4)$$

де a, b, c - емпіричні коефіцієнти.

Спростимо вираз (4):

$$Q = A \cdot \omega, \quad (5)$$

$$\text{де } A = \rho \frac{M_{\text{прив}} - M_{\text{тр}}^{\text{ц.о.к}} + M_{\text{ніж}}^{\text{різ}} + M_{\text{ніж}}^{\text{деф}} + M_{\text{тр}}^{\text{н.р}}}{F_{\text{отв}}^{\text{різ}} + F_{\text{отв}}^{\text{тр}} + F_{\text{деф}}^{\text{м'яс}} + F_{\text{ц.о.к}}^{\text{тр}} + F_{\text{шн}}^{\text{тр}}} \cdot \frac{\pi d^4}{4} \eta \left[1 - \frac{4mS_{\text{лез}}}{\pi(D_{\text{н}} + D_{\text{в}})} \right]. \quad (6)$$

Підставимо вирази (5) та (6) у вираз (2):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n N e^i}{Q} = \frac{a\omega^2 + b\omega + c}{A\omega} \rightarrow \min, i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

З умови існування екстремуму:

$$\frac{dR}{d\omega} = \frac{a\omega^2 - c}{\omega^2} = 0. \quad (8)$$

Звідси виходить єдине рішення в точці оптимуму:

$$a\omega^2 - c = 0 \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{c}{a}}. \quad (9)$$

$$\text{Така як } \frac{d^2R}{d\omega^2} = \frac{2c\omega}{\omega^4} > 0, \quad (10)$$

в точці оптимуму (9) має місце мінімум.

Таким чином, обґрунтована екстремальна характеристика процесу подрібнення м'ясної сировини в подрібнювачі, яка дозволяє здійснювати вибір оптимальної кутової швидкості, а, отже, і продуктивності подрібнювача при мінімумі енерговитрат.

Найважливішим обмеженням у вирішенні задачі оптимізації (1) - (10) є величина тиску м'ясної сировини (величина зовнішнього навантаження) на решітку, яка визначається виходячи з міцності решітки і, перш за все, її товщиною. В цьому випадку розглядається гранично допустиме значення спільних максимальних прогинів хрестоподібного ножа і перфорованої решітки за умови рівності цих величин. Величини прогинів решітки при заданих її розмірах і відомому навантаженні визначаються умовами її зовнішнього закріплення. Будемо вважати, що решітка, перфорована отворами, жорстко закріплена по внутрішньому контуру.

Для визначення величини прогину решітки використовуються диференціальне рівняння симетричного вигину круглої пластини постійної товщини:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dw}{dr} \right] \right) \right) = \frac{q(r)}{D}, \quad (11)$$

де r - відстань від точки, що розглядається, до центру пластини, м;

w - прогин пластини, м;

dr - інтенсивність зовнішнього поперечного навантаження, Н/м²;

$D = \frac{E \delta_p^3}{12(1-\nu^2)}$ - циліндрична жорсткість пластини, Н·м;

E - модуль поздовжньої пружності матеріалу решітки, Па;

δ_p^3 - товщина решітки, м;

ν - коефіцієнт Пуассона матеріалу решітки.

У разі рівномірно розподіленого навантаження $dr = q = \text{const}$ отримано рішення рівняння (2) у вигляді виразу для пружної лінії (прогину пластини) [1]:

$$w = -\frac{q(R-r)^2 r^2}{8D} + \frac{qb^2(R-r)^2 r^2}{8D} \ln R + \frac{qb^2(R-r)^2 r^2}{8D} \frac{qb^2(R-r)^2 r^2}{8D} \ln r, \quad (12)$$

а також м максимальне значення прогину у вигляді:

$$w_{max} = -\frac{q(R-r)^2}{4D} \left[\frac{(R-r)^2}{2} + r^2 \ln \frac{r}{R} \right], \quad (13)$$

де R, r – радіуси решітки та центрального отвору, Н·м;

D - циліндрична жорсткість решітки, Н·м.

Циліндрична жорсткість решітки визначається за формулою:

$$D = \frac{E\delta_p^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{R-nd-r}{R} \right), \quad (14)$$

де d – діаметр робочих отворів решітки, м;

n – кількість отворів.

Розрахунок рівняння пружної лінії ножа, що працює на вигін, в подібних умовах навантаження та закріплення дає максимальну величину прогину:

$$f_{max} = -\frac{qS(R-r)^4}{8EJ}, \quad (15)$$

де J – момент інерції перерізу ножа при опорі вигину.

Величина J визначається відношенням:

$$J = -\frac{S\delta_H^3}{12}, \quad (16)$$

де δ_H – товщина леза ножа;

S – ширина леза.

Рівняння (16) з урахуванням (17) приймає вид:

$$f_{max} = -\frac{3q(a-b)^4}{2E\delta_H^3}, \quad (17)$$

Умови забезпечення мінімуму концентрації напружень у стику ніж-решітка і, тим самим, зниження зносу має вид:

$$w_{max} = f_{max}. \quad (18)$$

З урахуванням відношень (14) та (16) рівняння (19) має вид:

$$\delta_p = \delta_H \left[1 + \frac{2b^2}{(a-b)^2} \ln \frac{b}{a} \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{a}{a-n_r d-b} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (19)$$

Для забезпечення рівномірного поля контактних напружень в стику ніж-решітка і мінімізації величини зносу, товщина ножа і товщина решітки повинні відповідати співвідношенню (19).

Таким чином, завдання оптимізації процесу подрібнення м'ясної сировини в подрібнювачі можна сформулювати наступним чином: знайти такі значення продуктивності подрібнювача, які б доставляли мінімум критерію (2) при виконанні умов на існування екстремуму (2)-(10) і умов міцності ніж-решітка (11) - (19).

Список використаних джерел

1. Пеленко В.В., Малявко Д.П., Усманов И.И., Екимов В.Г. Оптимизация процесса измельчения пищевых материалов в волчках. *Процессы и аппараты пищевых производств*. 2016. №2.
2. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник, 2-е видання, доп. та випр. Харків: Світ Книг, 2014. 495 с