

УДК. 631.363

Д.Дмитрів, канд.техн.наук; О.Дудін; О.Рогатинська

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ КОРМОЗМІШУВАЧІВ

У статті розглянуто задачу нелінійного програмування для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів кормозмішувача. За цільову функцію прийнято вагу кормозмішувача, яка відповідно пов'язана із розмірами та собівартістю та є важливим фактором його конкурентоспроможності.

Умовні позначення

- Q - продуктивність кормозмішувача;
 m_y - вага кормозмішувача;
 $l_{в.отв}$ - довжина вивантажувального отвору кожуха;
 L - довжина змішувальної частини від закінчення суцільного шнеку зони завантаження до початку суцільного шнеку зони транспортування;
 S_k та S_e - відповідно товщина кожуха та порожнистого валу робочого органу;
 k_0 - коефіцієнт, що враховує нахил спіралі та технологію виготовлення

На шляху проведення комплексної механізації та автоматизації сільського господарства одним з найважливіших завдань є оптимізація конструктивно-технологічних параметрів сільськогосподарської техніки, що значною мірою впливає на її економічність.

Велика частка сільськогосподарської техніки у структурі кормовиробництва припадає на кормозмішувачі. Від оптимального підбору конструктивно-технологічних параметрів їх робочих органів в кінцевому результаті залежить якість приготування комбікормів. Оптимізація параметрів кормозмішувачів викликає певні труднощі, які пов'язані з тим, що технологічному процесу змішування притаманна хаотичність руху складників суміші, що важко піддається опису. Метою даної роботи є оптимізація конструктивно-технологічних параметрів робочих органів кормозмішувачів та розробка методики їх інженерного розрахунку.

Питання оптимізації конструктивно-технологічних параметрів гвинтових робочих органів сільськогосподарської техніки висвітлені в працях [1-6]. Однак, в згаданих працях питання оптимізації розглянуті в контексті гвинтових транспортерів або змішувачів, робочі органи яких є суцільними. Конструкція робочого органу кормозмішувача, яка розглядається в цій роботі, має поділ на три зони, а саме: завантажувальної, змішувальної та транспортуючої, це дозволяє поєднувати декілька технологічних процесів в одному.

В процесі проектування робочих органів кормозмішувачів вихідними даними є їх продуктивність та реологічні властивості компонентів суміші. Оскільки вплив конструктивних параметрів на якість приготування кормових сумішей в основному визначалась експериментально, то за цільову функцію при постановці оптимізаційної задачі доцільно прийняти вагу кормозмішувача, а вимоги із забезпечення необхідного рівня якості приготування кормів поряд із іншими розглядати у функціях обмеження.

Параметри завантажувальної зони визначаються із умови рівномірного захоплення компонентів забезпечення стабільності гідравлічного їх витікання і їх визначення, доцільно винести в окрему задачу.

Транспортувальна частина кормозмішувача із суцільним гвинтовим конвеєром виготовляється згідно з цільовим призначенням, наприклад, із умови завантаження транспортних засобів і т.п. За умов відсутності таких вимог, в т.ч. її довжина, приймається:

$$l_{mp} \geq 1,3l_{e.ome} = (1,7...2,0)D.$$

Отже, за цільову функцію доцільно прийняти вагу змішувальної частини кормозмішувача, яка визначає його габарити та конструктивне виконання:

$$F = m_y = \pi L \left[D_k S_k + 2RS_e + \frac{k_0 \theta R t_l (D - 2z_D - 2R)}{\pi(b_e + h_e)} \right]. \quad (1)$$

Товщини S_k та S_e функціонально не зв'язані з іншими параметрами і однозначно визначаються за допомогою навантаження відповідно розходу кормозмішувача, а тому не включались в число змінних параметрів. Товщина лопаті t_l приймається за результатами розрахунків на міцність і виноситься за межі оптимізації задачі, як і значення кутового монтажного зміщення w лопатей одна відносно іншої, яке приймається рівним $w = \pi/4 - \pi/2$ за результатами експериментальних досліджень.

Відповідно за змінні параметри будемо приймати такі величини: кутову швидкість $x_1 = \omega$; радіус валу $x_2 = R$; діаметр прохідного перетину кожуха $x_3 = D_k$; осьову довжину лопаті $x_4 = b_e$, кутовий параметр лопаті $x_5 = \theta$, довжину осьового проміжку $x_6 = h_e$ та довжину зони змішування $x_7 = L$.

На зміну вказаних параметрів накладаються експлуатаційні, конструктивно-технологічні та інші обмеження [7,8] що записуються нерівностями $f_i < 0$.

1. Умова забезпечення необхідної продуктивності Q_3 :

$$Q = \varphi_0 \omega T [D^2 - (2R)^2] / 8 \geq Q_3.$$

2. Умова відсутності протидії з боку обертового руху шнека під час засипання вантажу:

$$k_\omega \omega^2 D / 2 < g,$$

де $k_\omega = 1,2 - 1,4$.

3. Умова забезпечення гідравлічного витікання [9], $v_z > v_{\delta 0}$, звідки:

$$\omega T / (2\pi) \geq v_{\delta 0}.$$

4. Умова за зміною безрозмірної концентрації індикатора на виході визначається за С-кривою із умови, що за критерій рівномірності розподілу індикатора чи контрольного компонента можна прийняти величину безрозмірної концентрації на виході змішувача за час $n_p = n_k$, тобто, коли індикатор мав би появитись на виході при відсутності згладжування ($p_k = 1$).

$$C_e(n_p = n_k) \leq C_{e0}.$$

Аналіз С-кривих показує, що величина $C_{e0} = 0,008...0,01$ забезпечує задовільний розподіл індикатора за комірками. Тоді вказана умова матиме вигляд $p_k^{n_k} \leq C_{e0} = 0,008...0,01$, а із врахуванням того, що $n_k = L / (b_e + h_e)$:

$$L / (b_e + h_e) > \ln C_{e0} / \ln p_k.$$

5. Умова посилення згладжувальної функції кормозмішувача за рахунок забірної частини, яка полягає у тому, що періодичність подачі компонента із найменшим вмістом $t = T / v_z = 2\pi / \omega$ повинен бути меншим від часу проходження індикатора в комірці:

$$t = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{(b_g + h_g)p_k}{\varphi_0 T}$$

Відповідно $(b_g + h_g) \geq \varphi_0 T / p_k$.

6. Максимальний кут нахилу лопаті доцільно приймати:

$$\alpha_1 \leq \pi/4 - \varphi_2/2,$$

де φ_2 - кут внутрішнього тертя компонентів в суміші.

Враховуючи те, що $\operatorname{tg} \alpha_1 = T/\pi D_k = b_g/\theta D_k$, ця умова прийме вигляд:

$$b_g \leq 2\theta D \operatorname{tg}(\pi/4 - \varphi_2/2).$$

7. Крок гвинтових насадок не повинен бути меншим від кроку шнеку:

$$b_g \geq \theta D k_T / \pi.$$

8. Перекривання поперечного перерізу двома лопатями повинне бути більше третини, звідки:

$$\theta \geq \theta_{\min} = \pi/6 - \pi/4,$$

де більше значення приймається для більш штучних матеріалів.

9. Із умови забезпечення захоплення компонента із мінімальним вмістом, як впливає із рівняння регресії, величина осьового проміжку між секціями не повинна перевищувати мінімальної величини, а відповідна умова має вид:

$$h_g < h_{g\max} = (A_0 - \varepsilon_k) / A_h,$$

де ε_k - величина допустимого зменшення компонента порівняно із розрахунковим A_0 та A_h - коефіцієнти, які визначені за регресією і залежать від параметрів α_k , w , що не входять в число змінних даної задачі.

10. Умова забезпечення жорсткості гвинтової секції в місці кріплення до валу може враховуватись опосередковано:

$$TR\theta^2 > k_\theta (D_k - 2R)^2.$$

11. За умови виготовлення змішувачів малими партіями важливим є технологічне обмеження на виготовлення суцільних гвинтових стрічок транспортувальних ділянок [2]:

$$-2R < D\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_{don}^2} / (\pi\phi_{don}) \leq 0,$$

де ϕ_{don} - граничний коефіцієнт нерівномірності витягання, $\phi_{don} = 2,5 - 2,7$.

12. Величина осьового проміжку h_g не повинна бути більшою основи кута відкосу насипної суміші висотою $k_\alpha D$ при нахиленому конвеєрі:

$$k_\alpha D / h_g \leq \operatorname{tg}(\alpha_k + \varphi_2).$$

Умову на міцність лопаті будемо використовувати для визначення товщини лопаті.

Оскільки в обмеження входить параметр кроку T подаючого та транспортного кута, то для спрощення розв'язку оптимізаційної задачі введемо додаткову рівність для його рекомендованого значення:

$$T = k_T D_k = (0,8 \dots 1,1) D_k,$$

де k_T - коефіцієнт кроку, що залежить від властивостей суміші.

Функції обмеження, із відповідними перетвореннями, приймуть вигляд:

1. $f_1 = -x_1 x_3 (x_3^2 - 4x_2^2) + 8Q_3 / k_T \varphi_0 \leq 0$;
2. $f_2 = x_1^2 x_3 - 2g / k_\omega \leq 0$;
3. $f_3 = -x_1 x_3 + 2\pi v_{\delta 0} / k_T \leq 0$;
4. $f_4 = -x_7 + \ln C_{e0} (x_4 + x_6) / \ln p_k \leq 0$;
5. $f_5 = -(x_4 + x_6) + p_k \varphi_0 k_T x_3 \leq 0$;
6. $f_6 = x_4 - x_3 x_5 \operatorname{tg}(\pi/4 - \varphi_2/2) \leq 0$;
7. $f_7 = -x_4 - k_T x_3 x_5 / 2\pi \leq 0$;
8. $f_8 = -x_5 + \theta_{\min} \leq 0$;
9. $f_9 = x_6 - h_{\max} \leq 0$;
10. $f_{10} = -x_3 x_2 x_5^2 + k_\theta (x_3 - 2x_2)^2 \leq 0$;
11. $f_{11} = -x_2 + \frac{x_3 \sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_{\text{don}}^2}}{2\pi \phi_{\text{don}}} \leq 0$;
12. $f_{12} = -x_6 + k_\alpha x_3 / \operatorname{tg}(\alpha_k + \varphi_2) \leq 0$.

Знаходження параметрів x_j за заданими цільовою функцією F_0 та функціями обмежень $f_i \leq 0$ належить до класу задач нелінійного програмування, аналіз якої проводимо за допомогою умов Куна Таккера із використанням методу множників Лагранжа [10,11], із якого випливає, що існують множники $u_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, 11$, такі, що:

$$u_i f_i = 0 \text{ і } \partial \varphi(x_j, u_i) / \partial x_j = 0, \text{ де } \varphi(x_j, u_i) = F_0 + \sum_{i=1}^{11} u_i f_i.$$

Визначаємо часткові похідні цільової функції:

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial f_0}{\partial x_2} = 2\pi S_\theta x_7 - \frac{2kt_\lambda x_5 x_7}{(x_4 + x_6)};$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_3} = \pi S_k x_7 + \frac{kt_\lambda x_5 x_7}{(x_4 + x_6)};$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_4} = \frac{kt_\lambda x_5 (x_3 - 2x_2 - 2z_D)}{(x_4 + x_6)^2};$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_5} = \frac{kt_\lambda (x_3 - 2x_2 - 2z_D)}{x_4 + x_6};$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_6} = \frac{k \pm x_5 (x_3 - 2x_2 - 2z_D)}{(x_4 + x_6)^2};$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_7} = 2\pi S_\theta x_2 + \pi S_k x_3 + \frac{kt_\lambda x_5 (x_3 - 2x_2 - 2z_D)}{x_4 + x_6}.$$

Часткові похідні функції Лагранжа:

$$\frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial x_1} = \frac{\partial f_0}{\partial x_1} - u_1 x_3 (x_3^2 - 4x_2^2) + u_2 2x_1 x_3 - u_3 x_3 = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial x_2} = \frac{\partial f_0}{\partial x_2} - u_{10} [x_3 x_5^2 + 4k_\theta (x_3 - 2x_2)] - u_{11} = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial x_3} = & \frac{\partial f_0}{\partial x_3} - u_1 x_1 (3x_3^2 - 4x_2^2) + u_2 x_1^2 - u_3 x_1 + u_5 p_k \varphi_0 k_T - u_6 x_5 \operatorname{tg}(\pi/4 - \varphi_2/2) + \\ & + u_7 k_T x_5 / 2\pi - u_{10} [x_2 x_5^2 - 2k_\theta (x_3 - 2x_2)] + u_{11} \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_{\text{дон}}^2}}{2\pi \phi_{\text{дон}}} + \frac{u_{12} k_{3p}}{\operatorname{tg}(\alpha_k + \varphi_2)} = 0 \end{aligned};$$

$$\frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial x_4} = \frac{\partial f_0}{\partial x_4} + \frac{u_4 \ln C_{e0}}{\ln p_k} - u_5 + u_6 - u_7 = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial x_5} = \frac{\partial f_0}{\partial x_5} - u_6 x_3 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2}\right) + \frac{u_7 k_T x_3}{2\pi} - u_8 - 2u_{10} x_2 x_3 x_5 = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial x_6} = \frac{\partial f_0}{\partial x_6} + \frac{u_4 \ln C_{e0}}{\ln p_k} - u_5 + u_9 - u_{12} = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi(x, u)}{\partial x_7} = \frac{\partial f_0}{\partial x_7} - u_7 = 0.$$

Аналіз приведених залежностей показує, що в межах зміни перемінних x_j цільова функція приймає свої екстремальні значення на границі області визначення у вершинах багатомірного трикутника.

Для нормальних умов експлуатації кормозмішувача, в процесі змішування сипких кормів витими шнеками найбільш вірогідним є варіант, в якому шукані параметри визначаються як перетини функцій, що задають наступні обмеження:

$$f_1 = f_2 = f_4 = f_5 = f_8 = f_9 = f_{11} = 0; \quad f_1 = f_3 = f_4 = f_7 = f_{10} = f_{11} = f_{12} = 0;$$

$$f_1 = f_2 = f_4 = f_7 = f_8 = f_{11} = f_{12} = 0; \quad f_1 = f_3 = f_4 = f_5 = f_8 = f_9 = f_{11} = 0.$$

На рис. 1 показано можливі розміщення точки оптимуму для змінних $x_3 = D_k$ та $x_1 = \omega$ при постійних інших параметрах. Стрілкою показано напрям градієнту цільової функції. Точка оптимуму визначається перетином лінії функцій обмежень f_1 та f_2 відповідно в т. А (для $Q = 4$ м³/год.) та в т. В (для $Q = 1$ м³/год.) і т.і. Настання оптимуму в точці перетину функцій f_1 та f_3 (т. С) можливе тільки для кормозмішувачів продуктивністю менше 1 м³/год., що не має практичного застосування, а тому виключено із подальшого розгляду.

За розв'язком оптимізаційної задачі побудована методика інженерного розрахунку кормозмішувача.

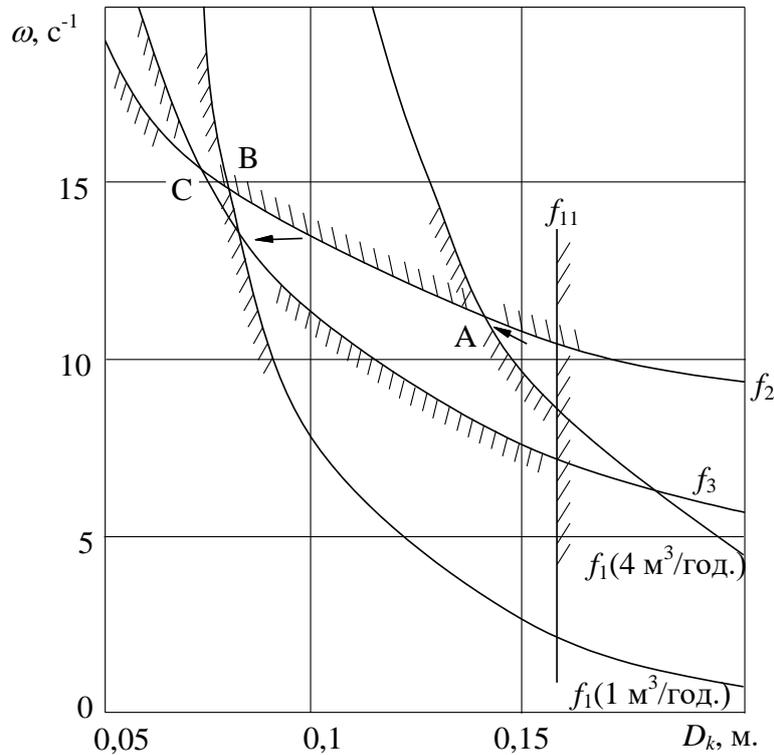


Рис.1. Схема до визначення розміщення точки оптимуму

1. Визначаються співвідношення діаметра валу до діаметра кожуха $k_d = 2R/D$. Для витих гвинтових поверхонь, [2] $k_d = \sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_{oon}^2} / (\pi\phi_{oon})$, для прокатних та штампованих гвинтових елементів приймають $k_d \geq 2$.

2. Із спільного розв'язку обмежень f_1 та f_2 визначають D та ω :

$$D = 5 \sqrt{\frac{32Q^2 k_\omega}{g k_T^2 (1 - k_d^2) \phi_0^2}}; \quad \omega = \sqrt{\frac{2g}{k_\omega D}}$$

3. У випадку, коли порушується умова $f_3 < 0$, діаметр кожуха та кутова швидкість визначаються за залежностями:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{\delta 0} (1 - k_d^2) \phi_0}}; \quad \omega = \frac{2\pi v_{\delta 0}}{k_T D}$$

4. Кут сектора лопаті θ повинен вибиратись більшим із двох значень, відповідно за обмеженнями f_8 та f_{10} :

$$\theta = \theta_{\min}; \quad \theta = \sqrt{k_\theta (D - 2R)^2 / (k_T R D)}$$

5. Величина осевого проміжку h_g між лопатевими секціями шукається за експериментальною залежністю (f_9), $h_g = h_{g\max}$ або, за умови відсутності таких даних для певних сумішей, за залежністю f_{12} :

$$h_g = \frac{k_\alpha D_k}{\text{tg}(\alpha_k + \phi_2)}$$

де $k_\alpha = 0,5 - 0,7$.

6. Осьова довжина лопатей секції приймається більшою із значення обчисленого

за обмеженнями f_5 та f_7 :

$$b_g = k_T \theta D / \pi; \quad b_g = k_T \varphi_0 D / p_k - h_g.$$

Довжина змішувальної частини визначається за залежністю:

$$L = (b_g + h_g) \ln C_{e0} / \ln p_k.$$

Значення ймовірності переходу p_k частинок із комірки в комірку приймається рівним коефіцієнту просипання суміші через лопаті ψ і зменшується при збільшенні кута нахилу кормозмішувача α_k . При $\alpha_k = 15 - 30^\circ$ величина $p_k = 0,7 - 0,8$, що є найбільш раціональним значенням, оскільки при подальшому його зниженні суттєво зменшується продуктивність кормозмішувача.

Потужність кормозмішувача приймається рівною потужності гвинтового транспортера з аналогічними параметрами із введенням поправочного коефіцієнту, що враховує потужність, затрачену на ударне змішування.

На основі розв'язку оптимізаційної задачі були визначені обмеження конструктивно-технологічних параметрів робочого органу кормозмішувача і побудована методика його інженерного розрахунку, яка може бути використана при проектуванні та виробництві кормозмішувачів.

Screw-sector type blade power estimation is presented in the paper. Bending line, inertia and resistance of the complex cross-section, bending pressure which appear in it under loading with the given useful moment or capacity are found. Location of the cross-section surface in which shear stress take place, when variation task on minimization in its area is solved, are determined.

Література

1. Григор'єв А.М., Преображенський П.А. Комплексна механізація і автоматизація вантажорозвантажувальних і транспортних робіт в машинобудуванні і приладобудуванні. - К.: Наукова думка, - 1967. - 116 с.
2. Гевко Б.М., Рогатынський Р.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин. - Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. - 176 с.
3. Кукта Г.М., Гуленко В.П. Вероятностные характеристики процесса смешивания кормов. В кн.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. Киев: Урожай, вып. 59, 1984. - С.12 - 16.
4. Куцин Л.М. Механико-технические основы создания транспортирующих, дозирующих и смешивающих устройств для приготовления кормов на животноводческих фермах: Автореф. дис... д-ра техн. наук: / Институт сельхозмашиностроения. - Ростов-на-Дону, 1982. - 38 с.
5. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.
6. Остапчук Н.В. Оптимизация технологических процессов на землереперерабатывающих предприятиях. - М.: Колос, 1974. - 144 с.
7. Бойко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. - К.: Вища школа, 1983. - 420 с.
8. Орлов В.П. Инженерные решения многокритериальных задач. - М.: Наука, 1982. - 257 с.
9. Панченко А.Н. Повышение работоспособности бункеров послонного распределения сыпучих связных материалов сельскохозяйственных и мелиоративных машин. - Днепропетровск: Днепропетр. гос. агр. ун-т., 1995. - 52 с.
10. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Фёдоров В.В. Курс методов оптимизации. - М.: Наука, 1986. - 235 с.
11. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции. - М.: Машиностроение, 1977. - 478 с.

Одержано 14.04.2003 р.