

$$\frac{\partial F}{\partial x_3} = -a_2;$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_4} = a_2 \frac{(x_1 - x_2) \sqrt{(\pi(x_1 + \sqrt{\phi}x_2)) / (\sqrt{\phi} + 1))^2 + T^2}}{2\beta T}$$

Визначаємо часткові похідні функції Лагранжа:

$$\partial \varphi(x, u) / \partial x_1 = \frac{\partial f}{\partial x_1} - \frac{C_1 u_1}{4} + u_2 + \frac{2\delta(x_1 + x_3 + e) + 1}{(x_1 + x_3 + e)^2} u^3 + C_4 u_4 + u_5 = 0;$$

$$\partial \varphi(x, u) / \partial x_2 = \frac{\partial f}{\partial x_2} - \frac{C_1 u_1}{4} - u_4 - u_5 - \frac{2C_6(2x_2 + B)}{\sqrt{x_2(x_2 + B)}} u_6 = 0; \quad (17)$$

$$\partial \varphi(x, u) / \partial x_3 = \frac{\partial f}{\partial x_3} + u_2 - \delta u_3 (x_1 + 2C_3) \frac{1}{x_3^2} = 0;$$

$$\partial \varphi(x, u) / \partial x_4 = \frac{\partial f}{\partial x_4} - C_5 u_5 = 0.$$

Використовуючи можливі розв'язки, що задовільняють умовам Куна-Таккера і можуть мати місце при розв'язку загальної задачі оптимізації в залежності від вихідних даних, отримаємо наступні системи рівнянь.

1. Знаходимо величини  $D$  і  $d$  із наступної системи рівнянь, враховуючи обмеження 1 і 4:

$$\begin{cases} f_1 = 0 \\ f_4 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} Q_m - C_1/4 (x_1 + x_2) = 0 \\ -x_2 + x_1 C_4 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Розв'язуючи систему рівнянь, отримаємо:

$$x_1 = D = \frac{4Q_m}{B_0 \omega q \left( \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_d^2}}{\pi \phi_d} + 1 \right)}, \quad x_2 = d = \frac{4Q_m \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_d^2}}{\pi \phi_d}}{B_0 \omega q \left( \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_d^2}}{\pi \phi_d} + 1 \right)} \quad (19)$$

2. Для знаходження наступних параметрів  $S$  і  $H$  скористаємося наступними обмеженнями 2, 3 і 5:

$$x_3 = S = \frac{A_{\max} a_{\min}}{2\delta} - a_{\min} - e - r_{cp}; \quad (20)$$

$$x_4 = H = \delta \left( \frac{4Q_m \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_d^2}}{\pi \phi_d}}{2B_0 \omega q \left( \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_d^2}}{\pi \phi_d} + 1 \right)} - \frac{4Q_m \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_d^2}}{\pi \phi_d}}{2B_0 \omega q \left( \frac{\sqrt{\pi^2 + 1 - \phi_d^2}}{\pi \phi_d} + 1 \right)} \right) \quad (21)$$

За допомогою отриманих залежностей можна з достатньою точністю обчислити значення шуканих параметрів.

При оптимізації шнекових очисників, коли їх можна виготовити різними способами, економічнішим може бути більш матеріаломісткий проект. Тому в таких випадках доцільно впровадити всесторонній аналіз і вибирати прийнятні варіанти конструкцій і технологій.

Поza межі оптимізації винесено ряд додаткових параметрів, визначення яких раніше обґрунтовані і не входить в область оптимізації. До таких параметрів відноситься величина ексцентриситета, маса і місце встановлення противаг для очисника для усунення дисбалансу, а також міцнісні параметри конструкції.

#### Список літератури

1. Транспортно-очисний пристрій коренеплодів. Патент України №40286А. Гевко І.Б., Вивюрка Н.Є. Бюл. №6, 2001.
2. Бойко И.В, Бублик Б.Н., Зицько П.Н. Методы и алгоритмы решений задач оптимизации. К.: 1983.

*Приведена методика оптимизации конструктивных и технологических параметров шнекового очистителя коренеплодов цилиндрического поперечного сечения со смещенной осью вращения при шести ограничениях. Выведены аналитические зависимости для определения оптимальных параметров: диаметра, шага, высоты рифа и кинематики.*

*The technique of optimization of constructive and technological parameters of separator screw conveyor from the cyclic cross-section with displaced axis of rotation under six restrictions is substantiated. The analytical dependences to determine the optimum parameters of diameters, steps, height of raffle and kinematics are developed.*

УДК 621.87

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

І.Б.ГЕВКО, О.Я.ГУРИК, В.Б.ЛЕВЕНЕЦЬ

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

*Виведено теоретичні залежності для визначення якості змішування сипких матеріалів під час транспортування їх за допомогою шнекового механізму з зазором між гвинтовою спіраллю та валом шнека. Наведено результати теоретичних розрахунків та експериментального дослідження впливу параметрів шнекового механізму на якість перемішування сипких матеріалів.*

Під час транспортування сипких вантажів за допомогою шнека відбувається інтенсивне перемішування складників суміші, що дає можливість використати шнек як один із найбільш ефективних засобів для перемішування сипких сумішей.

© І.Б.Гевко, О.Я.Гурик, В.Б.Левенець, 2003

Якість роботи змішувача оцінюють за рівномірністю концентрації складників суміші в кінцевому продукті. Для більшості із змішувачів неперервної дії можна застосувати дифузійну модель змішування [1], яка описує процес перемішування компонентів суміші в припущенні, що конструкція змішувача і наявні компоненти суміші можуть утворити псевдозріджений шар, частинки якого рухаються за законами броунівського руху.

У цьому випадку загальне рівняння зміни концентрації основного компонента в суміші описується таким диференціальним рівнянням [1] :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -W \frac{\partial c}{\partial x} + \overline{D}_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\overline{D}_R}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial c}{\partial R} \right), \quad (1)$$

де  $c$  - концентрація компонента;

$\overline{D}_L, \overline{D}_R$  - відповідно, коефіцієнти поздовжнього та поперечного змішування;

$W$  - швидкість переміщення суміші вздовж шнека;

$x$  - координата, направлена вздовж осі шнека;

$R$  - радіальна координата шнека.

Внаслідок малого співвідношення радіуса шнека до його довжини

( $\frac{R}{L} \ll 1$ ) можна вважати, що перемішування суміші вздовж радіальної координати відбувається набагато швидше, ніж вздовж напрямку транспортування, а тому, з достатньою для практики точністю, можна вважати, що концентрація компонента при певному значенні координати  $x$  визначається лише цією координатою і не залежить від  $R$ . У цьому випадку задача стає однопараметричною і рівняння набуває вигляду:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -W \frac{\partial c}{\partial x} + \overline{D}_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Дослідження якісних характеристик процесу змішування, як правило, базується на встановленні реакції моделі на стандартне збурення, яке часто описується як імпульс за допомогою дельта - функції Дірака:

$$p = \frac{m}{M} \delta(t), \quad (3)$$

де  $m$  - маса введеної речовини на вході;

$M$  - загальна маса речовини у змішувачі.

В результаті розв'язку задачі отримуємо характерний розмір пристрою (довжину шнекового змішувача), при якому вплив початкового збурення  $p$  на неоднорідність вихідної концентрації  $\Delta c$  не перевищує заданого значення. Очевидно, що нескінченний змішувач зведе збурення до нуля, але незначні коливання концентрації в межах допустимої норми можуть бути досягнуті при певних, розумних з конструктивної точки зору, значеннях габаритних розмірів змішувача. При цьому значну роль відіграють конструктивні особливості змішувача, коефіцієнт заповнення шнека матеріалом, величина зазору між валом і шнеком, кут нахилу

гвинтової лінії, швидкість обертання тощо. Їх сумарний вплив на процес змішування характеризується зведеним коефіцієнтом  $\overline{D}_L$ , збільшення якого інтенсифікує процес змішування і сприяє зменшенню загальної довжини робочої частини змішувача.

Розв'язок рівняння (2) проведемо при таких початкових і граничних умовах [1]:

$$\begin{aligned} c &= 0 \quad \text{при } x > 0, \text{ якщо } t = 0; \\ c &= p \quad \text{при } x = 0, \text{ якщо } t \geq 0; \\ c &= 0 \quad \text{при } x = \infty, \text{ якщо } t \geq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Диференціальне рівняння (2) із граничними та початковими умовами (4) має розв'язок у вигляді фундаментального розв'язку рівняння параболічного типу [1,2]:

$$c(x, t) = \frac{mx}{2M\sqrt{\pi D_L t^3}} \exp\left[-\frac{(x - Wt)^2}{4D_L t}\right] \quad (5)$$

З іншого боку, зміна концентрації речовини, яка була миттєво введена у змішувач, може бути обчислена згідно рівняння густини розподілу часу перебування частинок у змішувачі, яке для даного типу змішувача має вигляд[1]:

$$c(t) = \frac{0,43 \frac{m}{M}}{St\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\lg t - \lg \bar{t})^2}{2S^2}\right], \quad (6)$$

де  $S^2$  - відносна дисперсія логарифма часу перебування частинок матеріалу у змішувачі;

$$\bar{t} = \frac{L}{W} - \text{середній час перебування частинок у змішувачі.}$$

Для змішувачів шнекового типу можна записати вираз для відносної дисперсії часу перебування частинок у змішувачі [1]:

$$(S')^2 = \frac{2\overline{D}_L \bar{t}}{L^2}, \quad (7)$$

яка пов'язана із  $S$  такою залежністю:

$$S = 0,43 S'. \quad (8)$$

Після створеного збурення концентрації знайдемо концентрацію компоненту в перерізі  $x = L$ , тобто на виході:

$$c(t) = \frac{mL}{2M\sqrt{\pi D_L t^3}} \exp\left[-\frac{(L - Wt)^2}{4D_L t}\right] \quad (9)$$

Для визначення необхідної довжини змішувача прирівняємо максимальні значення виразів (9) та (6) з врахуванням (7) і (8) при значенні часу  $\bar{t}$ :

$$\frac{m}{M S' \bar{t} \sqrt{2\pi}} = \frac{mL}{2M \sqrt{\pi D_L \bar{t}^3}} \quad (10)$$

Звідки необхідна довжина шнекового змішувача з умови заданої дисперсії часу перебування частинок у змішувачі становить:

$$L = \frac{\sqrt{2 D_L \bar{t}}}{S'} \quad (11)$$

Час, необхідний для зниження збурення на вході до заданої величини  $c(t)_{\max}$ , визначимо із рівняння (10):

$$\bar{t} = \frac{m}{M c(t)_{\max} S' \sqrt{2\pi}} \quad (12)$$

Введемо безрозмірний коефіцієнт згладжування, який позначимо

$$\mu = \frac{M c(t)_{\max}}{m} \quad (13)$$

Він характеризує відношення вхідного збурення до відповідної вихідної величини.

Підставимо значення  $\bar{t}$  із (12) у (11) із врахуванням (13), формула прийме вигляд:

$$L = \frac{W}{\mu S' \sqrt{2\pi}} \quad (14)$$

Вираз (14) дає можливість визначити необхідну довжину змішувача при заданому коефіцієнті згладжування  $\mu$ .

Із аналізу формули (14) слідує, що зменшенню довжини циліндра змішувача сприяє збільшення величини дисперсії  $S'$  або, згідно (6) і (7), значення коефіцієнта поздовжнього змішування  $\bar{D}_L$ :

$$L = \frac{W^3}{4 \mu^2 \pi D_L} \quad (15)$$

При заданих геометричних параметрах змішувача можна оцінити можливий коефіцієнт згладжування нерівномірності концентрації суміші:

$$\mu = 0,5 \sqrt{\frac{W^3}{\pi L D_L}} \quad (16)$$

Конструктивні параметри шнекового змішувача суттєво впливають на величину  $\bar{D}_L$ . Як видно із наведених результатів експерименту, збільшення обертів шнека, коефіцієнта завантаження та кроку шнека збільшує концентрацію контрольного компонента у суміші, що еквівалентно зменшенню коефіцієнта згладжування  $\mu$  і покращенню процесу змішування.

Дослідимо вплив наявності зазору між полотном шнека та валом, що забезпечує наявність режиму пересипання частини суміші у попередній виток шнека. Режим пересипання суттєво матиме місце лише у випадку, коли коефіцієнт заповнення матеріалу перевищуватиме певне значення, достатнє для того, щоб суміш досягла верхньої відмітки полотна шнека. В реальних режимах заповнення (0,3 .. 0,7) пересипання завжди матиме місце. Збільшення зазору, очевидно, збільшує кількість матеріалу, що пересипається із одного витка на інший, а це, в свою чергу, призводить до більш інтенсивного перемішування суміші, збільшення часу перебування частинки в змішувачі, а також до зменшення продуктивності роботи змішувача. Доцільним є вибір зазору, при якому продуктивність зменшується незначно (до 10 %), а кількість зворотно переміщеного матеріалу становитиме приблизно 10 % на кожному витку шнека.

Вплив зазору можна описати збільшенням коефіцієнта  $\bar{D}_L$  у вигляді:

$$\bar{D}_L = \bar{D}_{L0} (1 + ks^n), \quad (17)$$

де  $\bar{D}_{L0}$  - коефіцієнт змішування без врахування зазору;

$k$  - коефіцієнт впливу зазору на роботу змішувача, залежить від матеріалу суміші, співвідношення зазору та діаметра шнека тощо;

$s$  - зазор;

$n$  - показник степеневі залежності, визначається в основному коефіцієнтом заповнення матеріалу.

Значення коефіцієнтів впливу зазору  $k$  та  $n$  визначається експериментально. Для певного режиму роботи, характеристики матеріалу та конструктивних параметрів змішувача їх можна вважати постійними. Збільшення коефіцієнту поздовжнього змішування  $\bar{D}_L$ , як випливає із формули (15) і (16), покращує якість процесу змішування, що приводить до зменшення довжини шнека при заданому коефіцієнті згладжування нерівномірності концентрації  $\mu$ . При правильно обраних параметрах зазору коефіцієнт  $\bar{D}_L$  може значно збільшитись, що еквівалентно зменшенню довжини шнека.

Аналіз отриманих результатів обчислимо за формулою:

$$c(x, t) = \frac{mx}{2M \sqrt{\pi \bar{D}_L t^3}} \exp \left[ -\frac{(x - Wt)^2}{4 \bar{D}_L t} \right]$$

В процесі дослідження встановлено, що нерівномірність концентрації спадає із часом, і пояснюється перемішуванням суміші в часі, а процес покращується при підвищенні коефіцієнта поздовжнього змішування  $\bar{D}_L$ , який в великій мірі залежить від наявності зазору.

Для підтвердження теоретичних залежностей було проведено ряд експериментальних досліджень, в ході яких визначали залежність якості змішування посівних матеріалів від конструктивних та технологічних параметрів процесу змішування.

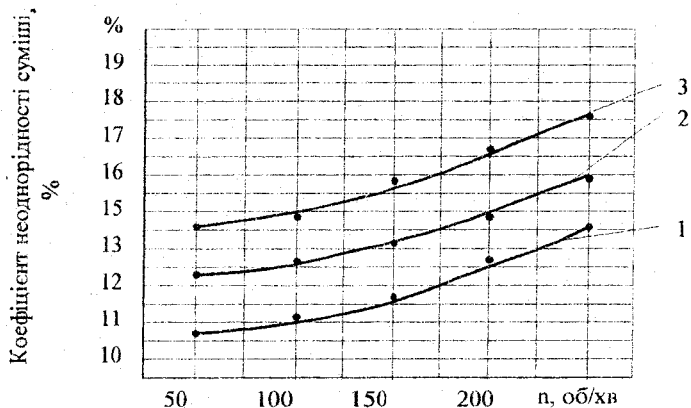


Рис. 1. Зміна коефіцієнту неоднорідності суміші в залежності від частоти обертання робочого органа гвинтового стрічкового змішувача при змішуванні посівних матеріалів.

Необхідний вміст компонентів: вики – 20%, вівса – 80%.

1 - коефіцієнт завантаження  $K_z = 0,3$ ;

2 - коефіцієнт завантаження  $K_z = 0,5$ ;

3 - коефіцієнт завантаження  $K_z = 0,7$

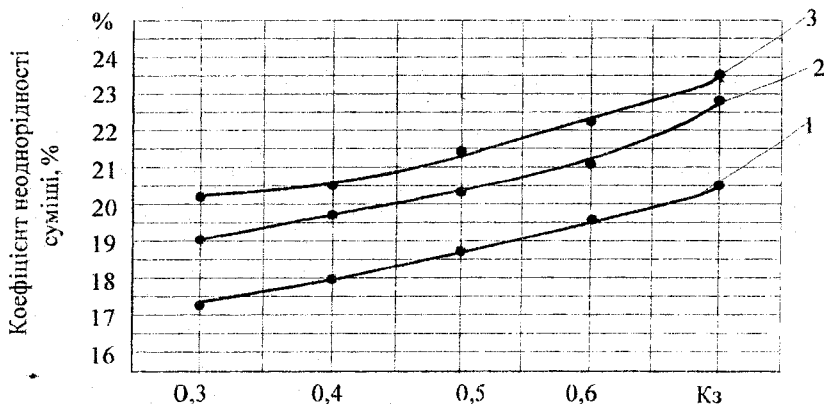


Рис. 2. Залежність коефіцієнту неоднорідності суміші посівних матеріалів від коефіцієнту завантаження стрічкового змішувача.

Необхідний вміст компонентів: вики – 20%, вівса – 80%.

1 - частота обертання робочого органа 50 об/хв;

2 - частота обертання робочого органа 150 об/хв;

3 - частота обертання робочого органа 250 об/хв

В якості сипких змішуваних матеріалів на проведеній серії дослідів було вибрано мішанку – це суміш вівса і вики у співвідношенні 80:20 відповідно. Ці матеріали характеризуються різними фізико-механічними властивостями.

В ході експерименту визначалась якість перемішування компонентів суміші, яку оцінювали за вмістом контрольного компоненту, в ролі якого було вибрано насіння вики. Вміст визначали за його масою у вибірці, що відбиралась у вивантажувальному рукаві гвинтового стрічкового змішувача. В кожному досліді брали 12 вибірок, за якими визначали середній вміст контрольного компоненту у вибірці. Результати експериментальних досліджень зміни вмісту контрольного компоненту в залежності від частоти обертання робочого органа змішувача для трьох значень коефіцієнту завантаження робочого органа у вигляді графічних залежностей наведені на рис. 1. Графічні залежності зміни вмісту контрольного компоненту в залежності від коефіцієнту завантаження робочого органа представлені на рис.2.

Із наведених вище графічних залежностей видно, що якість змішування посівного матеріалу у великій мірі залежить від частоти обертання робочого органа гвинтового стрічкового змішувача. При цьому для покращення якості перемішування компонентів суміші можна рекомендувати частоту обертання в межах 120... 180 об/хв. Вміст контрольного компоненту – насіння вики повинен забезпечуватись в межах 18-22% по відношенню до загальної маси суміші. Тому при вищевказаних обертах робочого органа необхідно забезпечити коефіцієнт завантаження робочого органа в межах 0,5...0,7. При таких технологічних параметрах змішувача забезпечується оптимальне перемішування суміші посівного матеріалу.

При збільшенні зазору між спіраллю робочого органа і валом продуктивність транспортування буде знижуватись (до 10%), однак при цьому можна досягнути підвищення якості змішуваної суміші.

Наведена методика дослідження може мати практичне застосування в різних галузях народного господарства.

### Список літератури

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.
2. Гевко Б.М., Рогатынский Р.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин. - Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. - 176с.
3. Хайлис Г.А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин. - К.: Изд-во УСХА, 1992.-240с.

*Выведены аналитические зависимости для определения качества смешивания сыпучих материалов во время транспортирования их с помощью шнекового механизма с зазором между винтовой спиралью и валом шнекового механизма. Приведены результаты аналитических расчетов и экспериментального исследования влияния параметров шнекового механизма на качество перемешивания сыпучих материалов.*

*The theoretical dependence for determination of mixing quality of bulk materials while transporting them with the help of screw conveyer with a gap between screw spiral and shaft is taken out. The results of theoretical calculations and experimental research of screw conveyer mechanism parameters' influence on the mixing quality of bulk materials are given.*