

УДК 631.365

© Р.В. Кірчук, к.т.н., Р.Я. Максимук  
Луцький національний технічний університет  
А.В. Хомич, к.т.н., В.О. Хвесик  
Любешівський технологічний коледж Луцького НТУ

## **АНАЛІЗ ЗАСОБІВ РОЗПУШУВАННЯ СИПКИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ**

*У статті проведено аналіз існуючих засобів змішування та розпушування сипких сільськогосподарських матеріалів, що застосовується як спосіб інтенсифікації процесу сушіння. Розглянуто конструкції робочих органів для розпушування зернового шару, запропоновано методику оцінки якості виконання операції, обґрунтовано методику експериментальних досліджень.*

### **СИПКИЙ МАТЕРІАЛ, РОЗПУШУВАННЯ, СУШІННЯ, КАМЕРА СУШІННЯ, КОЕФІЦІЄНТ ПЕРЕМІШУВАННЯ.**

**Постановка проблеми.** В сільськогосподарському виробництві існує потреба у змішуванні і розпушуванні дисперсних матеріалів для забезпечення потреб виконання різноманітних технологічних операцій. Змішування компонентів є одним із основних процесів сільськогосподарського виробництва, який застосовується у всіх його галузях, в тому числі для приготування посівного матеріалу, протруювання у насінництві, приготування кормів і введення мікроелементів в кормові суміші у тваринництві, сушінні тощо.

Розпушування та змішування сільськогосподарських матеріалів в умовах агровиробництва є складними процесами, механізм дії яких, головним чином, залежить від конструкції робочих органів, реологічних властивостей компонентів змішування, і може бути достовірно описаний лише за законами теорії ймовірності [1].

Змішування та розпушування сипких матеріалів і в даний час залишається недостатньо вивченим фізичним процесом. Це пояснюється тим, що змішування сипких матеріалів є більш складним предметом для наукового дослідження, ніж змішування рідких або газоподібних речовин. Процес змішування та розпушування сипких матеріалів є складним механічним процесом, механізм дії якого залежить головним чином від конструкції змішувача [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням вивчення процесів змішування та розпушування, вдосконалення існуючих конструкцій та розробкою нових засобів обробітку дисперсних сільськогосподарських матеріалів присвячено ряд робіт [1-5] Враховуючи дослідження названих авторів, можна дійти однозначного висновку про те, що процес змішування сипких матеріалів є складним механічним процесом, механізм дії якого залежить головним чином від конструкції змішувача. Створення змішувального обладнання базується зараз, в основному, на емпіричних дослідженнях [2].

Окрім того, більшість досліджень щодо змішуванні і розпушування сипких матеріалів стосуються галузі кормовиробництва. Досить мало уваги приділено проблематиці дослідження стану шару матеріалу при виконанні операції сушіння. Розробка та дослідження засобів розпушування шару матеріалу безпосередньо у сушильній камері та його вплив на перебіг процесу сушіння залишається актуальним завданням.

**Мета дослідження** – огляд існуючих засобів змішування та розпушування сипких сільськогосподарських матеріалів задля аналізу та теоретичного опису процесу їх роботи, розробка методики експериментальних досліджень та формування критерію оцінювання процесу розпушування у замкнутому об'ємі.

**Результати дослідження.** Перемішуванням називають процес взаємопроникнення і розподілу частинок однієї речовини в іншій у результаті їх вільного і вимушеного відносного руху [6]. Перемішування здійснюється або в спеціальних апаратах, які називають змішувачами, або безпосередньо в апаратах, де відбуваються процеси масо- чи теплообміну, біохімічні, хімічні та ін. Такі апарати мають відповідні пристрої для перемішування. Залежно від способу перемішування і технологічних вимог до проведення процесу відповідно відрізняються конструктивно.

Під час змішування чи перемішування в робочому об'ємі механізму частинки різних компонентів, які до перемішування існували окремо або перебували у неоднорідному стані, взаємно перемішуються. У результаті перемішування може бути нескінченно різне розміщення частинок у робочому об'ємі змішувача. За таких умов співвідношення компонентів у об'ємах суміші - величина випадкова, тому більшість відомих методів оцінювання однорідності (якості) суміші ґрунтується на методах статистичного аналізу. Такий метод дає змогу оцінити однорідність суміші за допомогою параметрів розподілу однієї випадкової

величини [7]. Критерієм оцінювання якості суміші є коефіцієнт варіації  $V$ , %:

$$v_c = \frac{100}{c} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - c)^2}, \quad (1)$$

де  $c$  - середнє арифметичне значення концентрації головного компонента в усіх  $n$  пробах суміші, %;

$c_i$  - концентрація головного компонента в  $i$ -й пробі суміші, %.

Аналіз експериментальних залежностей [7] типу  $v_c = f(\tau)$ , (де  $\tau$  - час змішування), отриманих при дослідженнях змішувачів періодичної дії різних конструкцій, показав, що крива процесу змішування має три характерні ділянки (рис. 1).

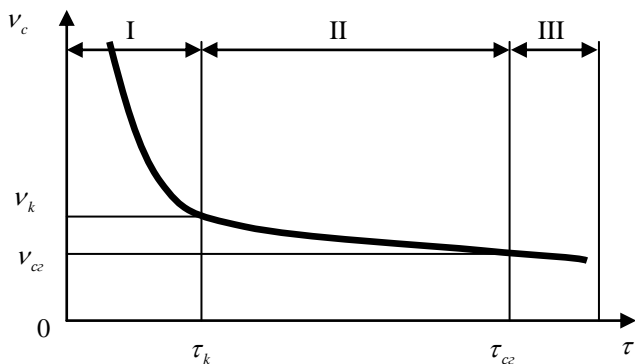


Рис.1 – Зміна неоднорідності суміші з часом

Аналізуючи отримані емпіричні залежності [7] можна зробити висновок, що у періоді I переважає процес змішування за рахунок перенесення компонентів у внутрішньому об'ємі змішувача. Процес сегрегації порівняно з процесом переміщення має невелику швидкість. Через це у періоді I  $v_c$  різко зменшується до певного значення  $v_k$ .

У періоді II швидкість змішування порівнюється зі швидкістю сегрегації, тобто значення  $v_c$  з часом змінюється незначно. Сам процес змішування реалізується в основному завдяки переміщенню окремих частинок одна відносно іншої. Через зовнішню подібність із процесом дифузії молекул цей процес перемішування називають дифузійним.

У періоді III швидкість змішування дорівнює швидкості сегрегації. Найменше значення коефіцієнта неоднорідності називають граничним коефіцієнтом неоднорідності  $v_{ce}$ . Час  $\tau_{ce}$ , при досягненні якого суміш стає однорідною, є оптимальним часом змішування, оскільки при подальшому перемішуванні  $v_c$  не змінюється.

Фізика процесу перемішування у механізмах безперервної дії дещо відрізняється від розглянутого вище процесу, оскільки у таких машинах подача компонентів для перемішування і видача готової суміші здійснюються безперервно. Зважаючи на це, якість перемішування залежить не тільки від швидкості перемішування у робочому об'ємі змішувача, а й від характеру живлення (наприклад, сушильної камери). Практично жоден живильник не може забезпечити безперервний потік матеріалу в точно заданій кількості у кожний момент часу. Описати процес перемішування, що відбувається у механізмах безперервної дії, можна як систему з вхідними та вихідними потоками на основі теорії автоматизованого управління (ТАУ).

Як правило, математичні моделі переміщень у потоках записують переважно у вигляді рівнянь, що описують зміну концентрації речовини в потоці, яка зумовлена рухом потоку. Щодо процесів перемішування сипких матеріалів можна використати кілька моделей (дифузійну, чарункову та ін.). Проте найпоширенішою є дифузійна модель з урахуванням поздовжнього та поперечного перемішування частинок [7]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -g \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{D_R}{R} \cdot \frac{\partial \left( R \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{\partial R}, \quad (2)$$

де  $g$  - лінійна швидкість потоку;

$x$  - координата за довжиною потоку;

$D_L$  та  $D_R$  - коефіцієнти, відповідно, поздовжнього та поперечного перемішування (аналогі коефіцієнтів дифузії);

$R$  - радіус поперечного перерізу потоку.

Це рівняння описує двопараметричну дифузійну модель. Через складність розв'язку рівняння (2) його спрощують, узявши  $D_R = 0$ . Спрощене рівняння називають однопараметричною дифузійною моделлю. Значення  $D_L$  та  $D_R$  визначають

експериментально на моделях змішувача. Розв'язок рівняння (2) матиме вигляд:

$$v_c(\tau) = a \cdot v_{cn} \cdot e^{-\Phi\tau}, \quad (3)$$

де  $v_c(\tau)$  - значення коефіцієнта неоднорідності в момент часу  $\tau$  ;

$a$  - коефіцієнт пропорційності;

$v_{cn}$  - початкове значення коефіцієнта неоднорідності суміші (визначається співвідношенням компонентів суміші);

$\Phi$  - функція (або параметр), що залежить від геометричних і режимних параметрів змішувача, а також від фізико-механічних властивостей суміші.

Змішувачі класифікуються за призначенням, способом і режимом роботи [7]. Може бути також класифікація, в основі якої є склад і характер взаємодії суміші й робочого органа та особливості конструкції змішувачів:

- фізичний стан сипкого середовища;
- характер перебігу процесу змішування у часі (змішувачі періодичної та безперервної дії);
- силовий вплив на частинки (змішувачі гравітаційні, примусові, пневматичні, електромагнітні, відцентрові);
- механізм перемішування частинок (змішувачі циркуляційні, об'ємного та дифузійного змішування);
- конструкція (змішувачі барабанні, лопатеві, шнекові тощо).

На практиці для класифікації змішувачів використовують кожен з цих ознак, проте найчастіше - комбінацію з тих ознак, які для певних умов розрахунку, конструювання та експлуатації найважливіші.

Заслугує на увагу теоретичний аналіз процесу перемішування дисперсного матеріалу (насіння льону) у сушильній камері, що запропоновано у роботі [8]. Для моделювання процесу перемішування, шар матеріалу розглядається як сукупність елементарних шарів та введено поняття  $K_i$  - коефіцієнт масової частки матеріалу.

$$K_i = \sum_{(i)=1}^n K_{i(i)} = 1, \quad (4)$$

де  $K_{i(1..n)}$  – коефіцієнт масової частки матеріалу в  $i$ -му тонкому шарі, заміщеної матеріалом з  $(1..n)$  тонких шарів в результаті перемішування.

Значення коефіцієнта  $K_{i(1..n)}$  для кожного  $i$ -го тонкого шару матеріалу визначається керуючись припущенням, що розсіювання частинок кожного тонкого шару матеріалу між сусідніми шарами відбувається за законом нормального розподілу.

Для плоского шару матеріалу постійної товщини згідно з законом нормального розподілу [9], коефіцієнт  $K_{i(i)}$  знаходиться за формулами:

$$K_i = \frac{k_{i(i)}}{\sum_{(i)=1}^n k_{i(i)}}, \quad (5)$$

$$\text{де } k_{i(i)} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right); \quad (6)$$

$x$  – координата (відстань між тонкими шарами, для яких розраховується коефіцієнт  $k_{i(i)}$ ), м;

$\mu$  – математичне сподівання, м;

$s$  – товщина  $i$ -го тонкого шару матеріалу, м;

$\sigma^2$  – дисперсія випадкової величини;

Величина  $\sigma$  визначає форму функції кривої розсіювання і характеризує інтенсивність перемішування. При  $\sigma = 0$  перемішування не відбувається, при  $\sigma \rightarrow \infty$  перемішування наближається до ідеального. Величина  $\sigma$  залежить від тривалості перемішування, конструктивних і режимних параметрів робочих органів та встановлюється експериментально.

Для сушильної камери, зважаючи на симетричність тонких циліндричних шарів матеріалу, процес перемішування доцільно описати функцією одномірного розподілу в напрямку радіусу сушильної камери.

Відмінність циліндричного шару від плоского (рис. 2) полягає в тому, що об'єм кожного елементарного тонкого шару товщиною  $s$  буде змінюватись прямопропорційно до радіуса. Відповідно, маса частинок, переміщених між будь-якими сусідніми тонкими шарами за одиницю часу також буде не постійною для кожного тонкого шару, тому для циліндричного тонкого шару матеріалу залежність (6) набуде вигляду:

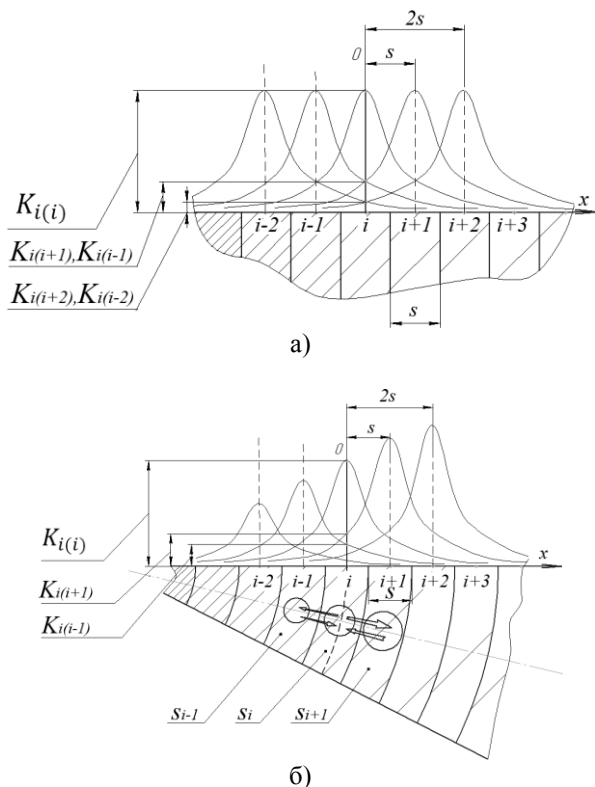


Рис. 2 – Графічна інтерпретація коефіцієнта  $K_i$ :  
 а) – для плоского тонкого шару матеріалу; б) – для циліндричного тонкого шару матеріалу

$$k_{i(i)} = k_{r(i)} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(s \cdot (i))^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \quad (7)$$

де  $k_{r(i)}$  – коефіцієнт, що враховує зміну маси тонких шарів матеріалу як функцію від радіуса.

Для  $i$ -го тонкого шару коефіцієнт  $k_{r(i)} = 1$ . Тоді для довільного  $i+n$  – го тонкого шару об'ємом  $v_{i+n}$  коефіцієнт

$$k_{r(i)} = \frac{v_{i+n}}{v_i}, \text{ або } k_{r(i)} = 1 + \frac{n}{\frac{r_0}{s} + i - 0,5}. \quad (8)$$

Підставивши (8) в (7) можна отримати:

$$k_{i(i)} = \left( 1 + \frac{n}{\frac{r_0}{s} + i - 0,5} \right) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left( -\frac{(s \cdot (i))^2}{2 \cdot \sigma^2} \right). \quad (9)$$

Отримані рівняння дозволяють визначити коефіцієнти, необхідні для розрахунку параметрів суміші при її перемішуванні і розпушуванні для циліндричної сушильної камери [8].

Більшість досліджень, що стосуються засобів розпушування дисперсних матеріалів потребує визначення ряду експериментальних коефіцієнтів. Для дослідження впливу параметрів і режимів роботи робочих органів на інтенсивність перемішування насінневого матеріалу, а також обґрунтування раціональних геометричних параметрів і режимів роботи вдосконалено лабораторну установку, яка зображена на рис. 3.

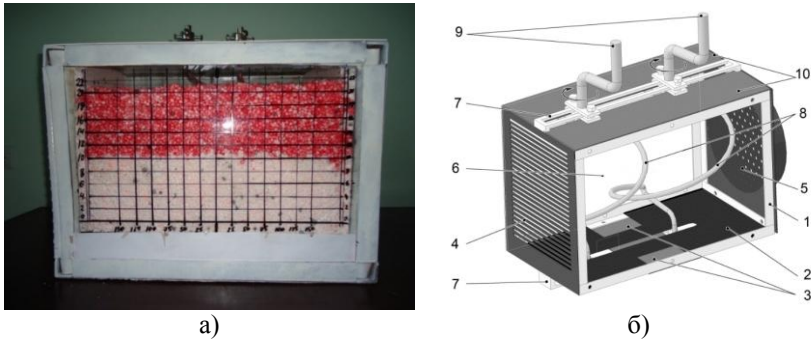


Рис. 3 – Установки для дослідження перемішування матеріалу:

- а) загальний вигляд; б) 3-D зображення: 1 – рама; 2 – днище; 3 – вивантажувальний пристрій; 4 – решітка для відведення повітря; 5 – решітка для підведення повітря з фланцем; 6 – прозора стінка; 7 – направляючі; 8 – змінні активні робочі органи; 9 – рокоятки; 10 – кришка



Конструкція установки для дослідження перемішування матеріалу (див. рис. 3, б) передбачає можливість встановлення змінних активних робочих органів 8 з різним кроком і діаметром спіралі. Також передбачена можливість регулювання міжосьової відстані між робочими органами, що закріплюються на нижній і верхній направляючих 7. Необхідна частота обертання активних робочих органів забезпечується обертанням рукояток 9. Знімні кришки 10 дозволяють завантажувати матеріал у верхній частині установки. Вивантажування здійснюється через вивантажувальний пристрій 3 у нижній частині установки.

Розроблена установка дає можливість дослідити перемішування матеріалу залежно від наступних факторів: крок спіралі робочих органів; діаметр спіралі робочих органів; частота обертання спіралі робочих органів; міжосьова відстань між сусідніми робочими органами; структура сипкого матеріалу і його фізико-механічні властивості.

Для механічного перемішування і розпушування сипкого матеріалу, зокрема при його сушінні, найбільш широке застосування знайшли конструкції барабанного типу [8]. Перемішування і розпушування матеріалу відбувається в результаті обертання барабану навколо осі під деяким кутом до горизонту. Реалізацією даної конструкції є сушарки барабанного типу (рис.4,а). Іншим способом перемішування і розпушування сипкого матеріалу механічним методом є застосування різних рухомих (активних) робочих органів в нерухомому корпусі [8]. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]: лопатеві мішалки, шнеки (рис. 3, б, в). Дані конструкції дозволяють більш ефективно використовувати об'єм камери сушарки, але суттєвим недоліком є пошкодження матеріалу в результаті дії цих робочих органів.

Доцільність застосування активаторів для перемішування і розпушування вразливих матеріалів, таких як насіння, повинна бути обгрунтована низьким ступенем пошкодження цього матеріалу. Тому доцільним є проведення подальших досліджень щодо дослідження процесів змішування і розпушування шарів матеріалу, зокрема при його сушінні.

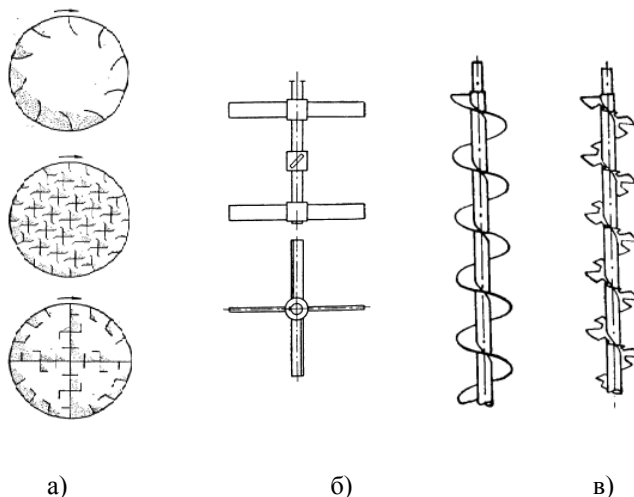


Рис. 4 – Механізми перемішування і розпушування сипких матеріалів: а) переріз сушарки барабанного типу; б) лопаті; в) шнеки

**Висновки.** На основі проведено огляду методів і засобів перемішування і розпушування сипких сільськогосподарських матеріалів встановлено, що теоретичний опис даного процесу ґрунтується на використанні імовірнісних підходів у моделюванні. Для якісної та кількісної оцінки якості виконання процесу розпушування введено коефіцієнт масової частки матеріалу  $K_i$ , що може бути застосований за умови поділу шару сипкого матеріалу на сукупність елементарних шарів. Для уточнення теоретичних положень та перевірки їх адекватності запропоновано удосконалену конструкцію лабораторної установки перемішування та розпушування сипкого матеріалу. Такі експериментальні дослідження дають можливість встановити та обґрунтувати параметри необхідних робочих органів.

### Література

1. Гурик О. Я. Обґрунтування параметрів транспортерів-змішувачів сипких матеріалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 «машини і засоби механізації сільсько-господарського виробництва»/ О.Я.Гурик. - Тернопіль, 2003. - 22 с.

2. Рябов Р.М. Аналіз існуючих засобів механізації для змішування різнодисперсних матеріалів [Електронний ресурс] / Р. М. Рябов, Д.О. Мілько // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: електронне наукове фахове видання. – Електронні дані. — [Харків : Харківський національний техн. Уні-т с-г ім. П. Василенка, 2016]. – № 179. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/index.php/wissn021/article/view/66397> (дата звернення 10.06.2018 р.). – Назва з екрана.
3. Зафрен С. Я. Технология приготовления кормов: Справочное пособие / С. Я. Зафрен. – М.: Колос, 1977. – 240 с.
4. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
5. Ревенко І. І. Механізація тваринництва/ І.І. Ревенко, В.М. Щербак. – К.: Вища освіта, 2004. – 319с.
6. Перемішування. Студопедія - Ваша школопедія [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Режим доступу: [http://studopedia.com.ua/1\\_241781\\_peremishuvannya.html](http://studopedia.com.ua/1_241781_peremishuvannya.html) (дата звернення 10.06.2018). – Назва з екрана.
7. Фізика процесу перемішування та класифікація змішувальних машин [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал Хелпикс.Орг - Інтернет помічник]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://helpiks.org/6-18440.html> (дата звернення 10.06.2018). – Назва з екрана.
8. Ящук А.А. Обґрунтування параметрів сушарки насіння льону олійного : дис. ... канд.техн. наук : 05.05.11 / Ящук Андрій Анатолійович. – Кіровоград, 2014. – 169 с.
9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Висш. шк., 2003. – 479 с.: ил.