

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-2>
УДК 621.928

СТАДНІК МИКОЛА

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0003-3895-9607>
e-mail: stadnik1948@gmail.com

СОЛОНА ОЛЕНА

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4596-0449>
e-mail: solona_o_v@ukr.net

БУРЛАКА СЕРГІЙ

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>
e-mail: ipserhiy@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ЗМІШУВАЧА НА КІНЕТИКУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ

У статті досліджується вплив геометрії робочих органів змішувача на кінетику процесу змішування сипких середовищ. Змішування є одним із ключових технологічних процесів у багатьох галузях промисловості, зокрема в харчовій, фармацевтичній, хімічній та будівельній. Висока якість змішування забезпечує однорідність кінцевого продукту, що безпосередньо впливає на його споживчі та експлуатаційні характеристики.

Ключові слова: аналіз, вібрація, змішування, проекція швидкості, сипке середовище, частота, суміш, віброшвидкість.

STADNIK MYKOŁA

SOŁONA OLENA

BURLAKA SERHIY

Vinnitsia National Agrarian University

STUDY OF THE INFLUENCE OF MIXER WORKING BODY GEOMETRY ON THE KINETICS OF BULK MATERIAL MIXING

This article examines the influence of the geometry of mixer working bodies on the kinetics of the bulk material mixing process. Mixing is one of the key technological processes in many industrial sectors, including the food, pharmaceutical, chemical, and construction industries. High-quality mixing ensures the uniformity of the final product, directly affecting its consumer and operational characteristics.

An analysis of various types of mixing elements, including blade, ribbon, screw, and rotor-pulsation systems, was conducted. Particular attention was paid to their structural features, such as shape, size, inclination angle, and positioning within the mixing chamber. It was determined that the kinetics of mixing largely depend on the interaction between bulk material particles and the working bodies, as well as on aerodynamic and mechanical factors influencing particle movement during the mixing process.

The study employed mathematical modeling methods and experimental analysis. Numerical simulations of particle motion dynamics were performed using the Discrete Element Method (DEM), allowing for the assessment of particle distribution uniformity within the mixing volume. Additionally, experimental tests of mixers with different designs were conducted to verify the theoretical results.

The research findings indicate that modifying the geometry of the mixer's working bodies can significantly impact mixing quality, process speed, and energy consumption levels. Optimizing the shape and arrangement of mixing elements improves mixture homogeneity, reduces mixing time, and decreases mechanical stress on equipment.

The obtained results can be utilized for the modernization of industrial mixers to enhance their performance, reduce energy consumption, and improve the final product's characteristics. In particular, the proposed recommendations may be applied in the design of new mixing systems and in the improvement of existing technological lines.

This study is relevant in the context of developing innovative mixing technologies and increasing the efficiency of production processes across various industries. Future research may focus on a more detailed investigation of the influence of the physical and mechanical properties of bulk materials on mixing kinetics, as well as on the development of new structural solutions to improve mixing uniformity and reduce wear on mixing elements.

Keywords: analysis, vibration, mixing, velocity projection, bulk medium, frequency, mixture, vibration velocity.

Постановка проблеми

Змішування сипких матеріалів є одним із найважливіших технологічних процесів у багатьох галузях промисловості, зокрема у хімічній, будівельній, фармацевтичній та харчовій. Висока якість змішування забезпечує рівномірність розподілу компонентів у суміші, що впливає на фізико-хімічні властивості кінцевого продукту, його стабільність і експлуатаційні характеристики. Однак досягнення однорідності змішування сипких середовищ є складним завданням через різні фактори, що впливають на процес, серед яких розмір і форма частинок, їхня щільність, вологість та схильність до агломерації.

Одним із ключових аспектів, що визначає ефективність змішування, є геометрія робочих органів змішувача. Форма, розмір, кут нахилу та розташування лопатей, шнеків або інших змішувальних елементів впливають на кінетику руху частинок, їхню траєкторію та рівномірність перемішування. Недостатньо оптимізована геометрія може призводити до утворення застійних зон, нерівномірного розподілу компонентів та збільшення часу змішування, що, своєю чергою, знижує продуктивність процесу та підвищує енерговитрати.

Наразі існує потреба у розробці та верифікації математичних моделей, що дозволяють прогнозувати вплив геометрії змішувальних елементів на процес змішування. Також важливим є експериментальний аналіз ефективності різних конструктивних рішень з метою оптимізації технологічних

параметрів змішувачів. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу геометрії робочих органів змішувачів на кінетику змішування сипких середовищ, що дозволить розробити рекомендації щодо покращення конструкції змішувального обладнання та підвищення ефективності процесу.

Аналіз останніх джерел

Наукові дослідження у сфері змішування сипких матеріалів зосереджені на вивченні механізмів руху частинок у змішувачах, впливу геометричних параметрів робочих органів на якість змішування, а також на розробці математичних моделей для прогнозування процесів.

Значний внесок у вивчення кінетики змішування сипких середовищ зробили роботи, присвячені застосуванню чисельного моделювання, зокрема методу дискретних елементів (DEM). Дослідження показали, що цей метод дозволяє ефективно оцінювати траєкторії руху частинок, утворення застійних зон та рівномірність змішування. Наприклад, у роботі [1] продемонстровано, що зміна форми та розташування лопатей у лопатевих змішувачах може суттєво впливати на інтенсивність перемішування та зменшення часу досягнення гомогенності.

Інші дослідження були спрямовані на експериментальне визначення ефективності різних типів змішувачів. У роботах [2,3] проведено порівняльний аналіз стрічкових, шнекових та конусних змішувачів за показниками рівномірності змішування та енерговитрат. Встановлено, що шнекові змішувачі забезпечують кращу гомогенізацію для матеріалів із різною густиною, тоді як стрічкові механізми є більш ефективними для змішування порошкових сумішей з низькою схильністю до агломерації.

Окрему увагу у сучасних дослідженнях приділяють удосконаленню конструктивних елементів змішувачів. У роботі [4] досліджено вплив використання комбінованих змішувальних елементів (наприклад, лопатевих та шнекових у одному змішувачі), що дозволяє покращити ефективність змішування за рахунок поєднання різних механізмів руху частинок.

Попри значні досягнення в цій сфері, залишається низка невирішених питань. Зокрема, недостатньо вивчено вплив взаємодії між частинками різного розміру та форми на процес змішування, що є важливим для проектування універсальних змішувачів. Також потребують подальшого дослідження питання оптимізації енергоспоживання змішувачів без зниження якості змішування.

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що подальший розвиток у цій сфері має бути спрямований на розробку нових конструктивних рішень, удосконалення математичних моделей змішування та впровадження сучасних технологій, що дозволять покращити продуктивність і якість змішувальних процесів.

Метою роботи є: аналіз впливу геометрії робочих органів змішувача на кінетику змішування сипких середовищ. Зокрема, досліджується взаємозв'язок між формою, розташуванням та конструктивними параметрами змішувальних елементів і рівномірністю розподілу частинок у робочому об'ємі. Для досягнення цієї мети використовуються методи математичного моделювання, чисельного аналізу та експериментальних досліджень, що дозволяють оцінити ефективність різних конструктивних рішень змішувачів.

Виклад основного матеріалу

Процес змішування сипких матеріалів є складним фізико-механічним явищем, що залежить від багатьох факторів, зокрема від розміру, форми та щільності частинок, кута тертя між ними, а також конструкції робочих органів змішувача. Відомо, що ефективність змішування визначається динамікою руху частинок у змішувальному об'ємі, що обумовлює рівномірність розподілу компонентів.

Змішувачі різних конструкцій створюють різні траєкторії руху частинок. Наприклад, у лопатевих змішувачах частинки переважно переміщуються по турбулентних потоках, тоді як у стрічкових і шнекових – за рахунок поступального або спірального переміщення [5]. Відповідно, оптимізація форми і розташування змішувальних елементів може значно покращити ефективність процесу.

Метод дискретних елементів (DEM) використовується для чисельного аналізу руху та взаємодії частинок сипкого середовища у змішувачі. Основу методу становлять рівняння руху Ньютона для кожної окремої частинки, а також моделі контактної взаємодії між частинками та з поверхнею змішувального обладнання [6].

Рух кожної частинки описується системою диференціальних рівнянь другого порядку, що базуються на другому законі Ньютона:

$$\begin{aligned} m_i \frac{dv_i}{dt} &= \sum F_{ij} + F_i^{ext} \\ I_i \frac{dw_i}{dt} &= \sum M_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

де:

- m_i – маса i -ї частинки,
- v_i – швидкість i -ї частинки,
- F_{ij} – сила взаємодії між частинками та ,
- F_i^{ext} – зовнішні сили (наприклад, сила тяжіння),
- I_i – тензор моменту інерції частинки,
- w_i – кутова швидкість частинки,
- M_{ij} – момент сил, що діє на частинку від інших частинок або поверхонь.

Контактна взаємодія між частинками та їх взаємодія зі змішувальними елементами враховує нормальні та тангенціальні сили. Для контакту двох частинок використовується модель Герца:

$$F_n = k_n \delta_n^{3/2} - \gamma_n v_n, \quad (2)$$

де:

k_n – коефіцієнт жорсткості при нормальному стисканні,

$\delta_n^{3/2}$ – глибина проникнення однієї частинки в іншу,

γ_n – коефіцієнт демпфування,

v_n – нормальна швидкість відносного переміщення частинок.

Тангенціальна взаємодія між частинками моделюється згідно з законом Кулона та моделлю пружного контакту Мінліна-Дерага:

$$F_t = -\min(k_t \delta_t - \gamma_t v_t, \mu F_n), \quad (3)$$

де:

k_t – тангенціальний коефіцієнт жорсткості,

δ_t – тангенціальна деформація,

γ_t – тангенціальний коефіцієнт демпфування,

v_t – тангенціальна швидкість ковзання,

μ – коефіцієнт тертя між частинками.

Для чисельного моделювання використовується метод інтегрування рівнянь руху, наприклад, метод Верле:

$$\begin{aligned} r_i(t + \Delta t) &= r_i(t) + v_i(t)\Delta t + \frac{1}{2} \frac{F_i t}{m_i} (\Delta t)^2, \\ v_i(t + \Delta t) &= v_i(t) + \frac{1}{2} \left(\frac{F_i t}{m_i} + \frac{F_i(t+\Delta t)}{m_i} \right) \Delta t, \end{aligned} \quad (4)$$

де:

$r_i(t)$ – положення частинки у момент часу,

$F_i(t)$ – результуюча сила, що діє на частинку у момент часу,

Δt – часовий крок інтегрування.

Робочі органи змішувача розглядаються як тверді межі, які взаємодіють із частинками за аналогічними законами контакту [7]. Їхня форма і рух визначаються аналітичними рівняннями або тривимірною дискретизацією:

$$F_{wall} = -k_n \delta_n^{3/2} - \gamma_n v_n. \quad (5)$$

Для кількісної оцінки ступеня змішування використовується коефіцієнт варіації концентрації:

$$CV = \frac{\sigma_C}{C}, \quad (6)$$

CV – коефіцієнт варіації,

σ_C – стандартне відхилення концентрації компонентів у вибірці,

C – середнє значення концентрації.

Результати чисельного моделювання показали, що зміна форми та кута нахилу робочих органів дозволяє суттєво покращити рівномірність змішування. Використання оптимізованої геометрії сприяє зменшенню застійних зон, що покращує якість готової суміші. Крім того, виявлено, що швидкість обертання лопатей відіграє вирішальну роль у формуванні кінетики змішування. Збільшення швидкості обертання до певного рівня сприяє інтенсивнішому перемішуванню частинок, проте надмірне підвищення швидкості може призводити до розшарування матеріалу.

Аналіз взаємодії частинок показав, що нормальні сили змінюються відповідно до моделі Герца, тобто сила зростає зі збільшенням деформації. Також було досліджено зміну тангенціальної сили, яка визначається коефіцієнтом тертя між частинками [8]. Ці фактори мають безпосередній вплив на рівномірність розподілу матеріалу у змішувачі.

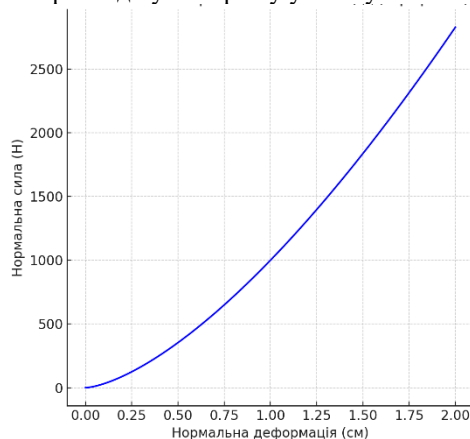


Рис. 1. Графік нормальної сили від деформації показує, як сила змінюється при зростанні деформації

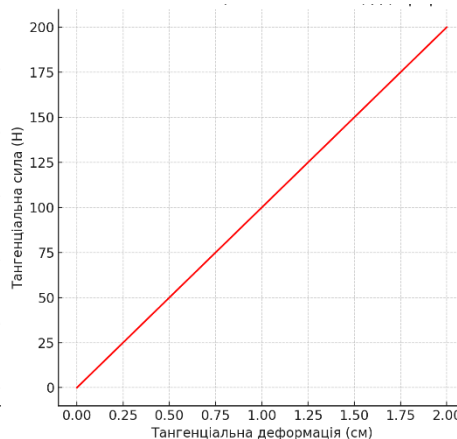


Рис. 2. Графік тангенціальної сили від деформації демонструє зміну тангенціальної сили за аналогічною моделлю, враховуючи коефіцієнт тертя

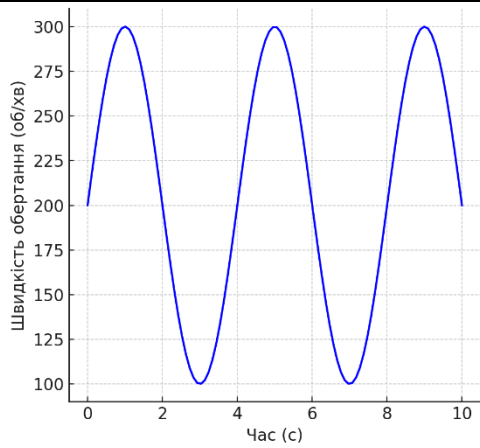


Рис. 3. Зміна швидкості обертання лопатей

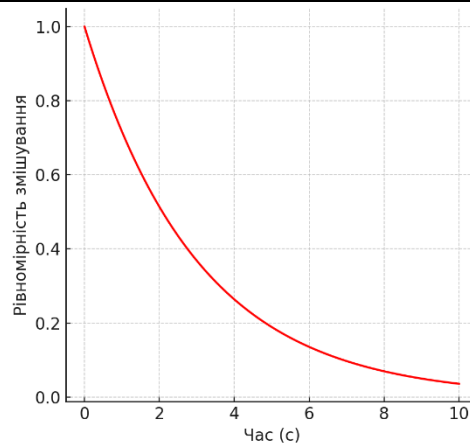


Рис. 4. Рівномірність змішування сипкого середовища

Дослідження коефіцієнта варіації (CV) у залежності від стандартного відхилення концентрації (σ_C) продемонструвало, що зростання σ_C призводить до лінійного збільшення CV. Якщо значення CV є меншим за одиницю, це свідчить про рівномірний розподіл частинок у суміші, тоді як перевищення цього порогу вказує на недостатню якість змішування.

Ось графік залежності коефіцієнта варіації CV від стандартного відхилення σ_C . Він показує, що при збільшенні σ_C коефіцієнт варіації зростає лінійно. Червона пунктирна лінія позначає $CV=1$, а зелена – $\sigma_C=C$.

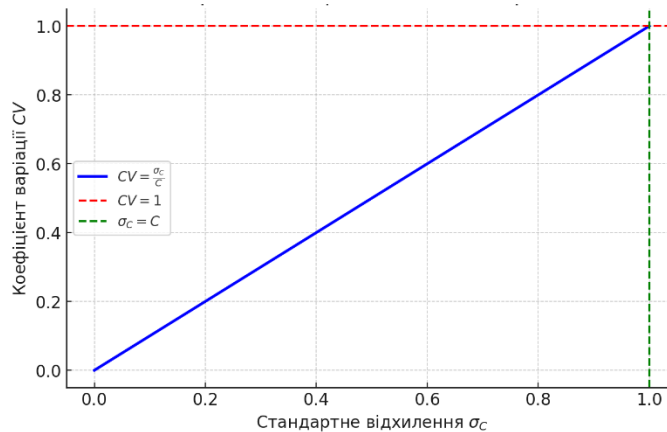


Рис. 5. Залежність коефіцієнта варіації від стандартного відхилення

Графік показує, як змінюється коефіцієнт варіації залежно від стандартного відхилення концентрації при постійному середньому значенні концентрації. Лінія графіка має прямолінійну форму, оскільки коефіцієнт варіації є відношенням стандартного відхилення до середнього значення.

Чим більше стандартне відхилення, тим вище коефіцієнт варіації, що свідчить про більшу нерівномірність суміші. Якщо коефіцієнт варіації менший за одиницю, це означає, що концентрація рівномірно розподілена. Якщо він перевищує одиницю, розподіл стає нерівномірним, а змішування – недостатнім.

Графік допомагає оцінити ступінь неоднорідності суміші: чим вищий коефіцієнт варіації, тим гірше проходить процес змішування.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що конструктивна оптимізація змішувальних елементів дозволяє суттєво покращити ефективність процесу змішування сипких середовищ. Використання отриманих математичних моделей та чисельних результатів може слугувати основою для розробки більш продуктивних та енергоефективних змішувачів, здатних забезпечити високу якість змішування у промислових умовах.

Висновки

Результати проведеного дослідження підтверджують, що геометрія робочих органів змішувача має вирішальний вплив на кінетику змішування сипких середовищ. Оптимізація форми та кута нахилу змішувальних елементів дозволяє зменшити застійні зони та забезпечити рівномірний розподіл компонентів. Також встановлено, що швидкість обертання лопатей є критичним параметром, який визначає ефективність змішування: надмірне збільшення швидкості може призводити до нерівномірності розподілу матеріалу.

Отримані чисельні результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкцій змішувачів, що дозволить підвищити якість змішування, зменшити енергетичні витрати та покращити загальну продуктивність обладнання. Використання математичних моделей, отриманих у

межах дослідження, сприятиме розробці нових високоефективних змішувачів для промислового застосування.

Література

1. Алієв, Е. Б. (2023). *Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник*. Київ: Аграрна наука.
2. Амосов, В. В., Сало, В. М., & Свірень, М. О. (2022). *Математичне моделювання процесів і машин: навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей*. Харків: Мачулін.
3. Андруник, В. А., Висоцька, В. А., Пасічник, В. В., та ін. (2017). *Чисельні методи в комп'ютерних науках: навчальний посібник*. Львів: Новий світ – 2000.
4. Полевода, Ю. А., & Волинець, Є. О. (2021). Дослідження віброреологічних моделей шару сипкого середовища. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 1(112), 60–69. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-1-8>
5. Полевода, Ю. А., Волинець, Є. О., & Бистрицький, О. П. (2022). Математична модель руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Вібрації в техніці та технологіях*, 4(107), 20–25. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-4-3>
6. Honcharuk, I., Kupchuk, I., Solona, O., Tokarchuk, O., & Telekalo, N. (2021). Experimental research of oscillation parameters of vibrating-rotor crusher. *Przegląd Elektrotechniczny*, 97(3), 97–100. <https://doi.org/10.15199/48.2021.03.19>
7. Солоня, О. В., & Ковбаса, В. П. (2019). Статика та динаміка взаємодії абсолютно твердих конкретій із сипучим середовищем. *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(92), 12–22. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2019-1-2>
8. Омелянов, О. М., & Токарчук, О. А. (2022). Обґрунтування амплітудно-частотних характеристик та конструктивних параметрів сепаратора з вібраційним приводом збудження просторових коливань. *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(104).

References

1. Aliiev, E. B. (2023). *Chyselne modeliuвання protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva: pidruchnyk*. Kyiv: Ahrarna nauka.
2. Amosov, V. V., Salo, V. M., & Sviren, M. O. (2022). *Matematychnе modeliuвання protsesiv i mashyn: navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei*. Kharkiv: Machulin.
3. Andrunyk, V. A., Vysotska, V. A., Pasichnyk, V. V., ta in. (2017). *Chyselni metody v kompiuternykh nauках: navchalnyi posibnyk*. Lviv: Novyi svit – 2000.
4. Polievoda, Yu. A., & Volynets, Ye. O. (2021). *Doslidzhennia vibroreolohichnykh modelei sharu sypkoho seredovyshcha*. Tekhnika, enerhetyka, transport APK, 1(112), 60–69. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-1-8>
5. Polievoda, Yu. A., Volynets, Ye. O., & Bystrytskyi, O. P. (2022). *Matematychna model rukhu chastynok v tsylindrychnomu konteineri vibrozmiшuvacha*. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh, 4(107), 20–25. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-4-3>
6. Honcharuk, I., Kupchuk, I., Solona, O., Tokarchuk, O., & Telekalo, N. (2021). *Experimental research of oscillation parameters of vibrating-rotor crusher*. Przegląd Elektrotechniczny, 97(3), 97–100. <https://doi.org/10.15199/48.2021.03.19>
7. Solona, O. V., & Kovbasa, V. P. (2019). *Statyka ta dynamika vzaiemodii absolutno tverdykh konkretni iz sypuchym seredovyshchem*. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh, 1(92), 12–22. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2019-1-2>
8. Omelianov, O. M., & Tokarchuk, O. A. (2022). *Obgruntuvannia amplitudno-chastotnykh kharakterystyk ta konstruktyvnykh parametriv separatora z vibratsiynym pryvodom zbudzhennia prostorovykh kolyvan*