

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ЧАСТИНОК СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ПЕРЕМІШУВАННЯ У РОТОРІ ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІШУВАЧА БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

У роботі представлено результати дослідження руху частинок сипких матеріалів всередині конічного ротора відцентрового змішувача безперервної дії. Наведено математичні моделі руху частинок у різних зонах ротора. Показано траєкторії руху частинок. Досліджено вплив початкового положення частинок у роторі на їх розподілення при виході з ротора. Проаналізовано фактори, що впливають на положення вхідних компонентів суміші всередині ротора. Визначено вплив параметрів потоків вхідних компонентів на однорідність суміші.

Ключові слова: ротор, відцентровий змішувач, однорідність суміші, сипкий матеріал, математичне моделювання.

V.V. STATSENKO, O.P. BURMISTENKOV, T.Y. BILA

Kyiv National University of Technologies and Design

DETERMINATION OF THE BULK MATERIALS PARTICLES DISTRIBUTION DURING MIXING IN THE CONTINUOUS ACTION CENTRIFUGAL MIXERS ROTOR

The article presents the results of the bulk materials particles movement study in continuous centrifugal mixers with conical rotors. Mathematical models of particle motion in the rotor are developed. The systems of differential equations that describe the particles motion on the rotor bottom and side surface are given. Particle trajectories are shown. The effect of the particle flow initial position in the rotor on the particles distribution at the rotor exit is studied. A relationship is established between the particles distribution at the rotor exit and the mixture homogeneity, which was estimated using the coefficient of variation. The mathematical modelling results of a two-component mixture particles distribution under various initial motion conditions of these components are presented. Four variants of the mixture components movement inside the rotor are considered. The initial conditions for the particles motion differed in the initial components flows position at the rotor bottom, as well as in these flows number. For all cases, histograms of the particles distribution along the rotor outer edge with a 150 step were plotted. In all zones, the particles number of each mixture component was calculated and its percentage composition was determined. Based on the data obtained, the mixture homogeneity was determined. It was found that the mixture homogeneity increases with a decrease in the difference between the particles flows initial motion conditions in the rotor. It was also found that dividing the flows into parts increases the mixture uniformity.

Key words: rotor, centrifugal mixer, mixture homogeneity, bulk material, mathematical modelling.

Вступ

Технологічні процеси змішування сипких матеріалів застосовуються у різних галузях промисловості, зокрема, в легкій, хімічній, харчовій та будівельній [1, 2]. На сьогодні розроблено сотні конструкцій змішувальних пристроїв, які за принципом руху матеріалу можна умовно поділити на обладнання періодичної та безперервної дії. Найбільш перспективним вважається обладнання безперервної дії, оскільки воно має менші масогабаритні та енергетичні показники, дозволяє знизити вплив робочих органів на частинки матеріалу та забезпечує високу продуктивність [3]. Водночас, процес безперервного змішування ставить підвищені вимоги як до дозування вхідних компонентів, так і до якості їх перемішування. Це пов'язано із тим, що у випадку появи відхилень однорідності або відсоткового складу суміші від заданих значень, матеріал неможливо повернути у змішувач для повторного перемішування. Окрім того, рух сипкого матеріалу носить дискретний характер і положення та швидкості окремих частинок є випадковими величинами, що суттєво ускладнює аналіз роботи та параметрів змішувачів.

Зазначені проблеми зумовлюють актуальність досліджень для виявлення залежностей між конструктивними та технологічними параметрами змішувачів та параметрами, що визначають якість суміші.

Постановка завдання

Завданням дослідження є визначення впливу початкових умов руху частинок сипких матеріалів у конічних роторах відцентрових змішувачів безперервної дії на однорідність суміші. В ході досліджень використані методи математичного моделювання, чисельного розв'язку диференціальних рівнянь.

Результати та їх обговорення

Відцентрові змішувачі сипких матеріалів безперервної дії із конічними роторами є одними з найбільш розповсюджених. Це пов'язано із відносною простотою та технологічністю конструкції та, водночас, високими експлуатаційними якостями. Змішувачі цього типу переважно використовуються у складі змішувальних комплексів, що включають бункери, живильники вхідних компонентів та змішувач [3]. На рис. 1 показано структурну схему такого комплексу, що дозволяє виготовляти суміші двох компонентів: основного та ключового.

Перед початком роботи вхідні компоненти завантажуються у бункери (1, 10), що містять датчики рівня (2, 11). Із бункерів матеріал надходить до живильників тарілчастого типу (3, 12), які забезпечують формування потоків сипкого матеріалу, що надходить у змішувач. Обидва живильники забезпечують можливість керування потоком частинок за рахунок зміни положення ножів (5, 9), що знімають сипкий

матеріал з поверхні тарелів, які обертаються із постійними швидкостями ω_1 та ω_2 . Керування положенням ножа здійснюється сервоприводами M2 та M4. Контроль параметрів потоків забезпечується за допомогою датчиків маси (4 та 8), що встановлені під поверхнею формувачів потоків (6, 7).

В результаті компоненти сипкого матеріалу із заданою інтенсивністю надходять всередину відцентрового змішувача безперервної дії [6], який складається із корпусу (13), конічного ротора (14), який обертається навколо вертикальної осі, привода (15, 17) та вихідного патрубку (16). Переміщення частинок всередині ротора відбувається за рахунок дії на них відцентрових сил інерції.

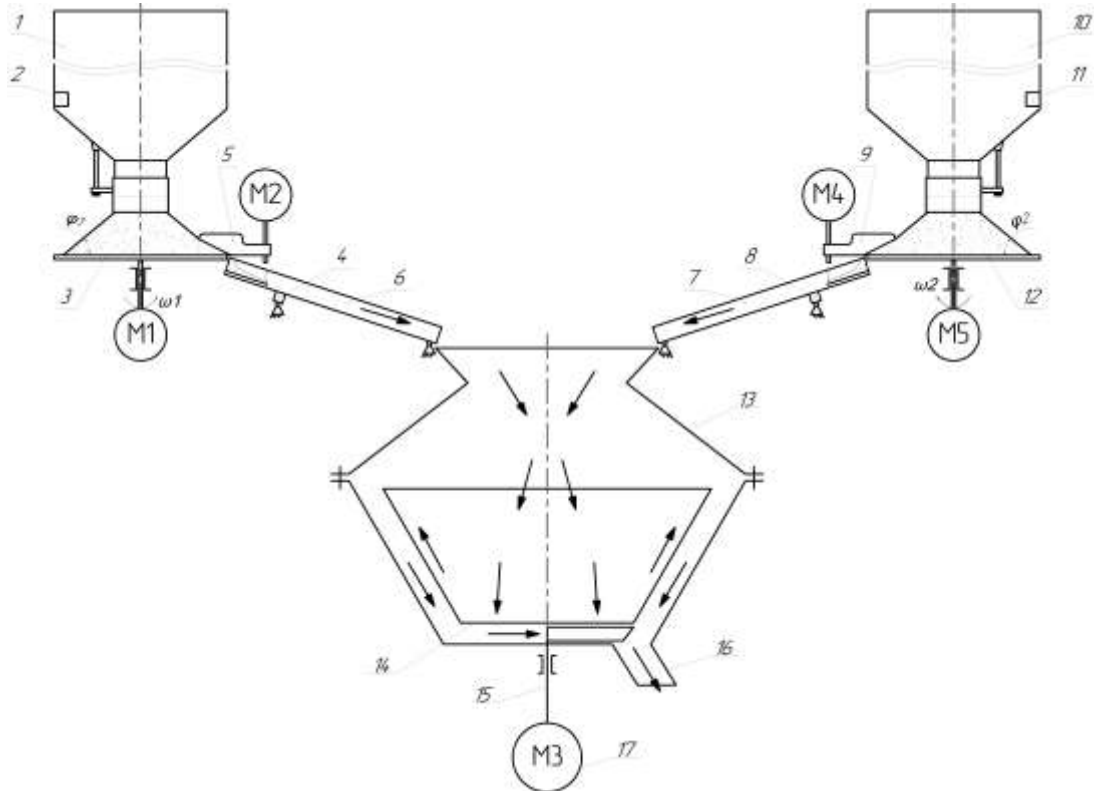


Рис. 1. Структурна схема змішувального комплексу

Рух частинок починається на дні ротора. Далі вони піднімаються вздовж бічної стінки ротора, вилітають з нього та потрапляють у нижню частину корпусу, де збираються ножем та надходять до вихідного патрубку. Початкові положення частинок та їх швидкості є випадковими величинами, які визначаються розташуванням формувача потоку та його параметрами. У крайній точці формувача частинки мають не нульову горизонтальну складову швидкості, яка призводить до зміщення потоків компонентів відносно центру ротора. Також на фактичне положення частинок впливають вібрації та флуктації швидкості обертання ротора, які виникають під час роботи змішувача. На рис. 1 стрілками показано рух частинок ключового та основного компонентів.

Будемо вважати, що координати частинок на дні ротора є випадковими величинами, які мають нормальний розподіл та відомі середнє значення та дисперсію.

$$A(x_A, y_A) = rand(O(x_0, y_0), \sigma), \tag{1}$$

де x_A, y_A – координати частинки A; x_0, y_0 – координати центральної точки потоку; σ – дисперсія розподілу.

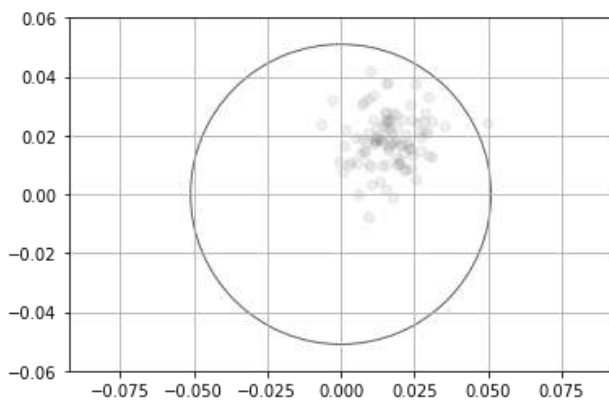


Рис. 2. Розташування частинок на дні ротора

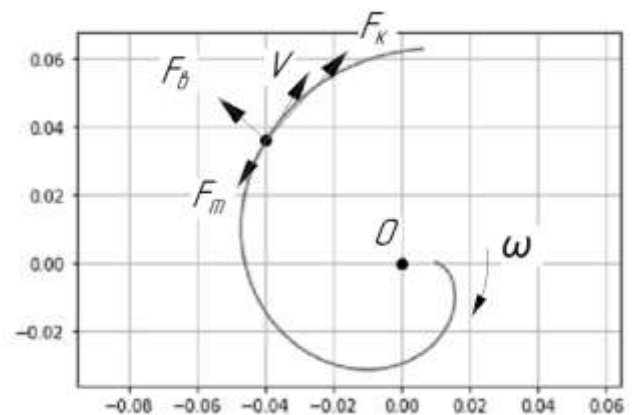


Рис. 3. Схема сил, що діють на частинку під час руху у роторі

Випадкове розташування 100 частинок на дні ротора із центральною точкою з координатами (0,017; 0,017) та дисперсією 0,0085 показано на рис. 2. Суцільною лінією показана границя дна ротора, що має радіус $R = 0,051$ м.

Під час руху частинок по поверхні ротора, що обертається, на них діють сили тяжіння, тертя та коріолісова сили [5] (рис. 3).

Траєкторію руху частинок по поверхні дна ротора можна описати за допомогою наступної системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_x \\ \frac{dV_x}{dt} &= x \cdot \omega^2 + 2V_y \omega - \frac{Ktr \cdot g}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} V_x \\ \frac{dy}{dt} &= V_y \\ \frac{dV_y}{dt} &= y \cdot \omega^2 - 2V_x \omega - \frac{Ktr \cdot g}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} V_y \end{aligned} \right. \quad (2)$$

де ω – частота обертання ротора; Ktr – коефіцієнт тертя між частинками та поверхнею ротора; x, y – координати частинки; V_x, V_y – складові швидкості руху частинок по осях X та Y .

Рух частинки по бічній поверхні конуса відбувається під дією тих самих сил, але система рівнянь змінюється з урахуванням нахилу бічної поверхні та переміщення частинки вздовж вісі Z :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_x \\ \frac{dV_x}{dt} &= x \cdot \omega^2 + 2V_y \omega - \frac{Ktr \cdot g}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} V_x a_{Nx} + a_{Nx} \\ \frac{dy}{dt} &= V_y \\ \frac{dV_y}{dt} &= y \cdot \omega^2 - 2V_x \omega - \frac{Ktr \cdot g}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} V_y a_{Ny} + a_{Ny} \\ \frac{dz}{dt} &= V_z \\ \frac{dV_z}{dt} &= -g + \left(\sqrt{x\omega^2 + y\omega^2} \cos \alpha + g \sin \alpha \right) \sin \alpha - \left(\sqrt{x\omega^2 + y\omega^2} \cos \alpha + g \sin \alpha \right) \frac{Ktr \cdot g}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \cos \alpha \end{aligned} \right. \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння; α – половина кута розтрубу ротора; a_{Nx}, a_{Ny} – складові прискорення, що створюються силою реакції поверхні ротора, вздовж осей X та Y , відповідно.

На рис.4 показані результати моделювання траєкторій руху частинок за системами рівнянь (2, 3) у роторі, що має наступні параметри: радіус дна $R_0 = 0,051$ м, висота $H = 0,17$ м; половина кута розтрубу $\alpha = 35^\circ$; частота обертання $\omega = 20$ об/с. Коефіцієнт тертя між частинками та матеріалом ротора прийнятий рівним 0,3.

На рис. 5 та 6 показано положення частинок перед початком їх руху вздовж бічної стінки ротора та у момент виходу з ротора.

Розподілення частинок вздовж зовнішньої кромки ротора можна представити у вигляді гістограми (рис. 7). Для цього розділимо коло на зони із кроком 15° та визначимо кількість частинок, що знаходяться у кожній із зон.

Отримані результати свідчать, що частинки згруповані у секторі з кутовим розміром приблизно 100° (від -50° до -150°). Це означає, що після виходу з ротора частинки потрапляють на дно корпусу також у цьому секторі, оскільки перемішування після виходу з ротора практично не відбувається.

Якщо потік частинок ключового компоненту виходитиме через інший сектор, який не перетинається із сектором основного компоненту, то перемішування компонентів буде мінімальним.

В ідеальному випадку частинки всіх компонентів мають бути розподілені рівномірно вздовж зовнішньої кромки ротора. В цьому випадку відсотковий склад у кожному з секторів відповідатиме заданому, а однорідність суміші буде максимальною. Кількість частинок у кожному з секторів буде однаковою та визначатиметься за формулою:

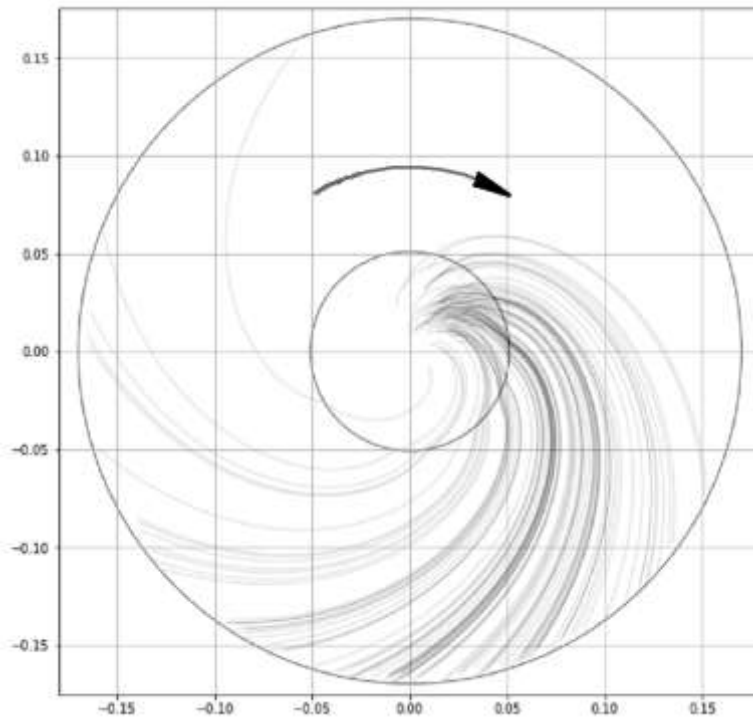


Рис. 4. Траскторії руху частинок у кінцічному роторі (вигляд згори)

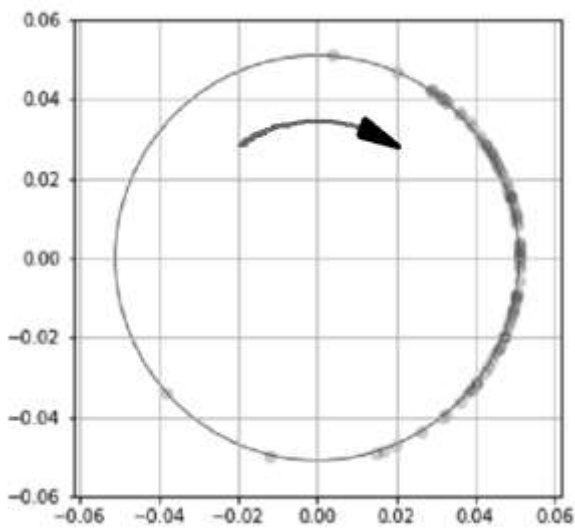


Рис. 5. Положення частинок перед початком руху вздовж бічної стінки ротора

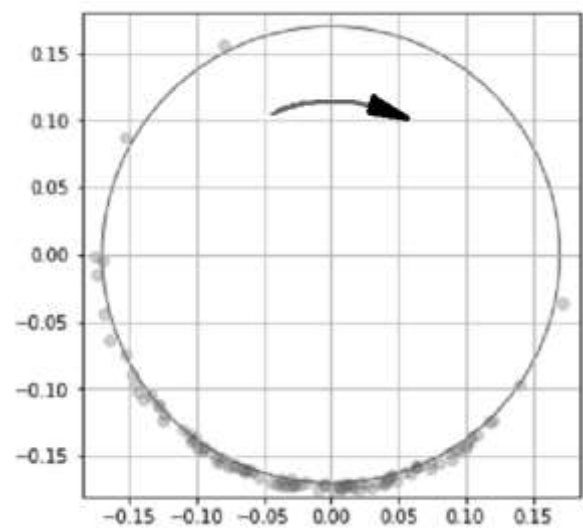


Рис. 6. Положення частинок у момент їх виходу із ротора

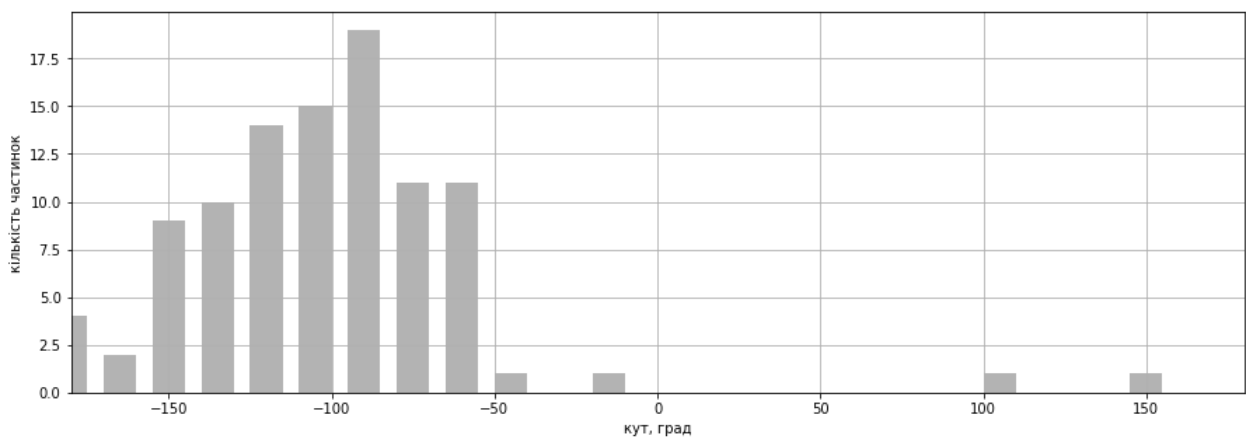


Рис. 7. Гістограма розподілення частинок на виході з ротора

$$N_c = \frac{N}{n}, \tag{4}$$

де N – загальна кількість частинок; N_c – кількість частинок у секторі; n – кількість секторів.

Оцінити різницю між фактичним розподіленням частинок та ідеальним можна за допомогою середньоквадратичного відхилення фактичної кількості частинок у кожному з секторів від середнього значення:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - N_c)^2}, \tag{5}$$

де N_i – кількість частинок у i -му секторі.

Також важливо визначити взаємне розташування частинок компонентів суміші на виході з ротора. Найбільш розповсюдженим методом визначення однорідності є порівняння відсоткового складу окремих об'ємів (проб) готової суміші. Кількісну оцінку однорідності суміші здійснюють за допомогою коефіцієнту варіації V_c , %:

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \tag{6}$$

де \bar{c} – середнє арифметичне значення концентрації ключового компонента в усіх n пробах суміші, %; c_i – концентрація ключового компонента i -ї пробі суміші, %.

Під час дослідження руху частинок у роторі, окремими пробами вважатимемо частинки, що знаходяться у певному секторі. Співвідношення кількості частинок ключового та основного компонентів у цьому секторі визначатиме концентрацію ключового компонента даної пробі:

$$c = \frac{N_{KK}}{N_{KK} + N_{OK}} 100\%, \tag{7}$$

де N_{KK}, N_{OK} – кількості частинок ключового та основного компонентів, відповідно.

Оскільки під час проектування змішувального комплексу ми можемо впливати на траєкторію руху частинок, наприклад, за рахунок зміни положення формувачів, проведемо моделювання декількох можливих розташувань потоків вхідних компонентів, а саме:

- 1) потік основного компонента (400 частинок) надходить у перший квадрант, потік ключового компонента (100 частинок) – у другий квадрант;
- 2) потік основного компонента (400 частинок) надходить у перший квадрант, потік ключового компонента (100 частинок) – у третій квадрант;
- 3) основний компонент надходить двома потоками, що складаються з 200 частинок кожний та надходять у перший та другий квадранти, ключовий компонент надходить двома потоками по 50 частинок, що надходять у третій та четвертий квадранти;
- 4) основний компонент надходить двома потоками, що складаються з 200 частинок кожний та надходять у перший та третій квадранти, ключовий компонент надходить двома потоками по 50 частинок, що надходять у другий та четвертий квадранти.

Після проведення дослідів 3 та 4 вважаємо, що на вході у змішувач встановлено додатковий пристрій (турбулізатор), що дозволяє розділити потік частинок на дві складові, які матимуть різні напрямки руху.

Результати моделювання руху частинок представлені у вигляді гістограм на рис. 8–11.

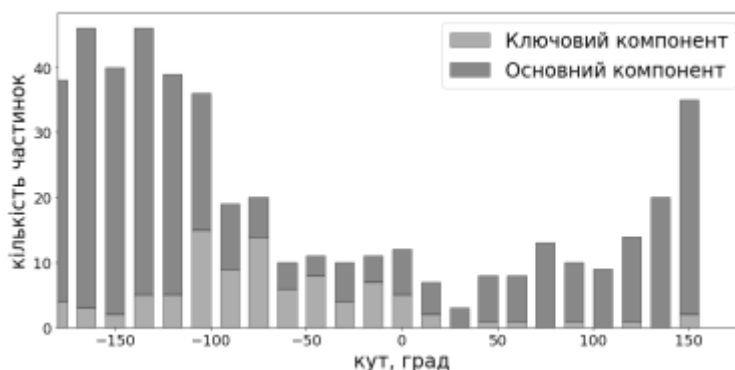


Рис. 8. Гістограма розподілу частинок на виході ротора (дослід 1)

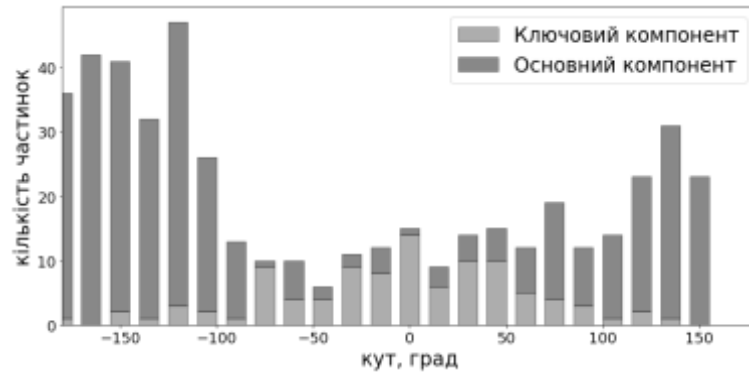


Рис. 9. Гістограма розподілу частинок на виході ротора (дослід 2)

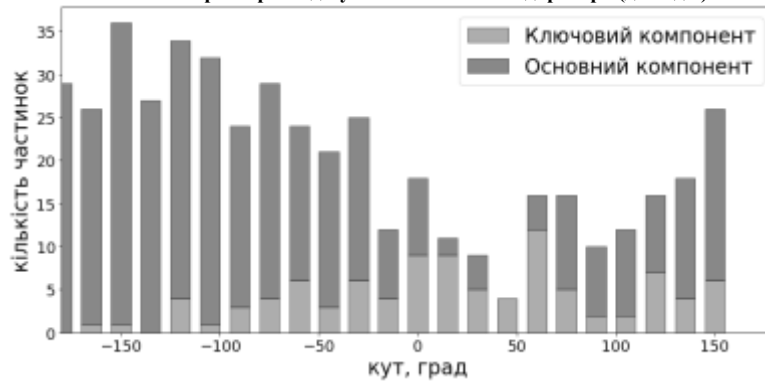


Рис.10. Гістограма розподілу частинок на виході ротора (дослід 3)

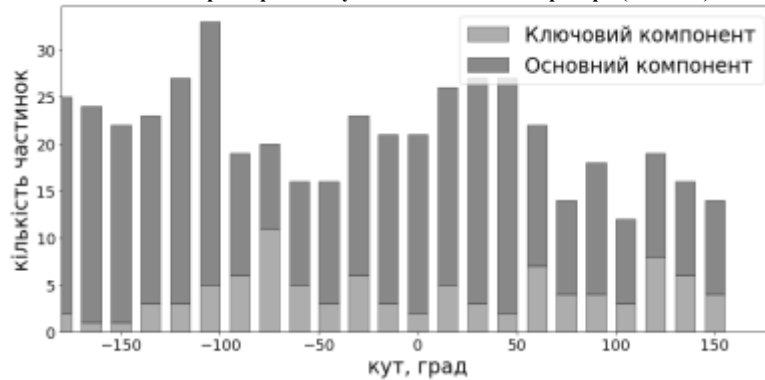


Рис. 11. Гістограма розподілу частинок на виході ротора (дослід 4)

У табл. 1 наведено результати розрахунків коефіцієнту варіації за формулою (6).

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта варіації від кількості потоків частинок та їх розташування

№ досліду	Умови дослідження	V _c
1	Потік основного компонента (400 частинок) надходить у перший квадрант, потік ключового компонента (100 частинок) – у другий квадрант.	140,7%
2	Потік основного компонента (400 частинок) надходить у перший квадрант, потік ключового компонента (100 частинок) – у третій квадрант.	152,1%
3	Основний компонент надходить двома потоками, що складаються з 200 частинок кожний та надходять у перший та другий квадранти, ключовий компонент надходить двома потоками по 50 частинок, що надходять у третій та четвертий квадранти.	118,7%
4	Основний компонент надходить двома потоками, що складаються з 200 частинок кожний та надходять у перший та третій квадранти, ключовий компонент надходить двома потоками по 50 частинок, що надходять у другий та четвертий квадранти.	80,4%

Висновки:

- 1) Запропоновані математичні моделі дозволяють оцінити розподілення частинок на виході з ротора та прогнозувати однорідність суміші.
- 2) Встановлено, що однорідність суміші збільшується із зменшенням відстані між центральними

точками потоків вхідних компонентів на дні ротора.

3) Розділення потоків на декілька складових підвищує однорідність суміші.

4) Аналіз отриманих гістограм свідчить, що найкраще розподілення ключового компонента в основному відбувається у випадку розділення потоків на складові частини та максимального їх розподілення у роторі.

5) Взаємне розташування вхідного патрубку змішувача та формувачів потоків компонентів суміші дозволяє корегувати початкове положення частинок на дні ротора, що дає можливість підвищити однорідність суміші.

Література

1. Процеси та обладнання підготовчих виробництв лёгкої промисловості / О. П. Бурмістенков, О.А. Стародуб, В. П. Місяць, Т. Я. Біла, В. В. Стаценко. – К. : КНУТД, 2011. – 137 с.

2. Бурмістенков О. П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості / О. П. Бурмістенков, Б. М. Злотенко, В. П. Коновал, І. В. Панасюк, М.Є. Скиба, О. М. Синюк. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 255 с.

3. Стаценко В.В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів : монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ : КНУТД, 2017. – 220 с.

4. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / Попов В. Л. – М. : Физматлит, 2012.– 348 с.

5. Біла Т. Я. Аналітичне дослідження руху часток суміші у двороторному змішувачі безперервної дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник КНУТД. – 2006. – № 5. – С. 30–34.

6. А. с. СССР № 1165446, 1985. Смеситель непрерывного действия / Бурмистенков А. П., Белая Т. Я., Корзун В. В., Слижевский В. А.

References

1. Protsesy ta obladnannia pidhotovchykh vyrobnytstv lëhkoï promyslovosti / O. P. Burmistenkov, O. A. Starodub, V. P. Misiats, T. Ya. Bila, V. V. Statsenko. – K. : KNUTD, 2011. – 137 s.

2. Burmistenkov O. P. Vyrobnytstvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereinii promyslovosti / O. P. Burmistenkov, B. M. Zlotenko, V. P. Konoval, I. V. Panasiuk, M. Ye. Skyba, O. M. Syniuk. – Khmelnytskyyi : KhNU, 2007. – 255 s.

3. Statsenko V.V. Avtomatyzovani komplekxy bezperernoho pryhotuvannia kompozytsii sypkykh materialiv : monohrafiia / V.V. Statsenko, O.P. Burmistenkov, T.Ia. Bila. – Kyiv : KNUTD, 2017. – 220 s.

4. Popov V. L. Mekhanyka kontaktnoho vzaymodeistviya y fyzyka treniya / Popov V. L. – M. : Fyzmatlyt, 2012.– 348 s.

5. Bila T. Ya. Analitychne doslidzhennia rukhu chastok sumishi u dvorotornomu zmishuvachi bezperervnoi dii / T. Ya. Bila, V.V. Statsenko // Visnyk KNUTD. – 2006. – № 5. – С. 30–34.

6. A. s. SSSR № 1165446, 1985. Smesitel nepreryvnogo deistviia / Burmistenkov A. P., Belaia T. Ya., Korzun V. V., Slizhevskii V.A.

Рецензія/Peer review : 14.1.2020 р.

Надрукована/Printed : 14.2.2020 р.

Стаття рецензована редакційною колегією