**Дмитрів І.В.**

к.т.н., доцент

Саган О.Я.здобувач освітнього ступеня
доктора філософії**Національний
університет «Львівська
політехніка»****Dmytriv I.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Sahan O.**

recipient of the PhD degree

**Lviv Polytechnic National
University****УДК 631.22.014:636.084.74****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-3**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ВІДЦЕНТРОВОМУ ДОЗАТОРІ- ЗМІШУВАЧІ

У роботі наведено результати експериментального дослідження процесу змішування багатокомпонентних сипких матеріалів у відцентровому дозаторі-змішувачі безперервної дії. Метою було кількісно оцінити ступінь однорідності сумішей і встановити вплив конструкційно-режимних параметрів на якість змішування шляхом поєднання класичних статистичних індикаторів із методами цифрового аналізу зображень. Для перевірки гіпотези про здатність змішувача забезпечувати високий рівень гомогенності проведено планований трифакторний експеримент із варіюванням частоти обертання дозуючого диска, кута твірної диска та надлишкового тиску у робочій зоні.

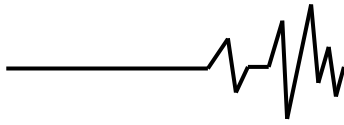
Методика оцінювання базувалася на введенні для кожного компонента суміші кольорових маркерів, відборі контрольних проб після змішування та їх фотофіксації за сталих умов освітлення і геометрії зйомки. Комп'ютерна обробка передбачала корекцію зображень, сегментацію за кольором, визначення часток компонентів у кадрі та статистичне узагальнення для серій вимірювань. За сформованим масивом даних розраховано інтегральні показники однорідності й виконано порівняння їх значень для різних поєднань факторів, що дало змогу виявити характерні тенденції зміни якості змішування залежно від режиму роботи.

Отримані результати засвідчили стабільно високий рівень змішування в широкому діапазоні режимів, а вплив досліджуваних параметрів має закономірний характер, що створює передумови для подальшої оптимізації конструкції й налаштувань. Запропонований підхід дозволяє експериментально підтвердити ефективність відцентрового дозатора-змішувача та формує відтворявану методику кількісної оцінки якості змішування, придатну для практичного застосування у харчовій, фармацевтичній, хімічній і будівельній промисловості, а також для лабораторного контролю та задач процесної аналітичної технології.

Ключові слова: відцентровий дозатор-змішувач, сипкі матеріали, однорідність, коефіцієнт варіації, планований експеримент.

Вступ. Забезпечення високої однорідності сипких сумішей є однією з ключових передумов стабільності технологічних процесів у харчовій, фармацевтичній, хімічній та будівельній промисловості. Порушення рівномірності розподілу компонентів призводить до коливань

якості готової продукції, зниження ефективності виробництва та додаткових витрат на корекцію рецептур. Особливої актуальності проблема набуває у випадку багатокомпонентних систем, де навіть незначна неоднорідність може суттєво вплинути на кінцеві властивості продукту.



Традиційні методи оцінювання однорідності, що ґрунтуються на пробовідборі та статистичному аналізі, мають обмеження: вони трудомісткі, малопридатні для оперативного контролю й не враховують просторового розподілу компонентів. Це ускладнює отримання достовірної інформації про динаміку змішування, особливо у безперервних процесах.

Сучасні тенденції у машинобудуванні та технологіях змішування спрямовані на створення обладнання, здатного не лише забезпечувати необхідну продуктивність, а й формувати стабільно високу однорідність сумішей. Відцентрові дозатори-змішувачі належать до перспективних конструкцій завдяки простоті, компактності та можливості працювати з широким спектром сипких матеріалів. Проте питання підтвердження їх ефективності з позицій однорідності залишається недостатньо дослідженим.

Актуальність роботи також зумовлюється потребою у впровадженні нових методів контролю якості змішування. Зокрема, застосування аналізу зображень у поєднанні зі статистичними методами відкриває можливість комплексної та кількісної оцінки ступеня змішування. Це дозволяє перейти від суб'єктивних або трудомістких методик до більш об'єктивних, швидких та відтворюваних способів контролю, що відповідає сучасним вимогам індустрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема визначення однорідності сумішей сипких матеріалів активно досліджується впродовж останніх десятиліть. Ще у класичних роботах [1] було запропоновано вводити поняття «інтенсивності» та «масштабу сегрегації» для характеристики ступеня змішування. Ці показники стали основою для подальшого розвитку теоретичних підходів у цій галузі. У свою чергу, [2] розробив індекс однорідності, який враховує співвідношення між експериментально визначеною дисперсією концентрацій та її граничними значеннями. Даний показник став стандартним інструментом у багатьох прикладних дослідженнях змішування сипких матеріалів, гранульованих систем.

Подальший розвиток отримали статистичні методи аналізу. Зокрема, у роботах [3] узагальнено механізми змішування (конвективний, дифузійний, зсувний) та наведено приклади використання різних індексів для оцінки гомогенності. Ці дослідження заклали фундамент для сучасних моделей та чисельних симуляцій процесів змішування.

В останні роки значна увага приділяється оглядовим роботам, які систематизують підходи до визначення однорідності. Група дослідників [4] представили широкий спектр методів — від класичних до новітніх сенсорних технологій, таких як NIR-спектроскопія, електрична томографія.

Автори підкреслили, що жоден метод не є універсальним: вибір залежить від характеристик суміші, вимог точності та умов експерименту.

У сучасних експериментах широко застосовуються методи комп'ютерного зору. Автори [5] запропонували використовувати аналіз (PCA) для обробки зображень сумішей. Виявлено, що PCA дозволяє виділяти найбільш інформативні ознаки та формувати інтегральний показник однорідності. Цей підхід довів свою ефективність при аналізі багатокомпонентних систем і став основою для подальших досліджень. Автори [6] застосували більш простий підхід, заснований на аналізі гістограм яскравості зображення. Автори показали, що відстеження гістограми в часі дозволяє ефективно визначати момент досягнення гомогенності у двокомпонентних сумішах.

Розвиваються й багаторівневі підходи, [7] продемонстрували необхідність врахування різних масштабів спостереження при оцінюванні однорідності. В їхніх дослідженнях було показано, що результати оцінки можуть значно відрізнятися залежно від розміру контрольованої області, що особливо важливо для промислових масштабів змішування.

Окремий напрям досліджень становлять роботи з використанням чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM). [8] застосували індекс однорідності для аналізу змішування у стрічкових міксерах, показавши можливість моделювання для прогнозування ефективності обладнання. Подібні результати наведено у роботах [9] та [10], де аналізували інтенсивність і масштаб сегрегації для кількісного опису процесів змішування.

Таким чином, аналіз літератури показує, що сьогодні найбільш перспективним є поєднання класичних статистичних методів з сучасними підходами. Такий інтегрований підхід забезпечує комплексну, достовірну та оперативну оцінку ступеня однорідності сумішей, що й визначає новизну нашого дослідження.

Формулювання мети дослідження.

Метою дослідження є комплексна оцінка однорідності змішування сипких матеріалів у відцентровому дозаторі-змішувачі та апробація методики, що поєднує цифровий аналіз зображень із використанням статистичних показників якості змішування. Запропонований підхід забезпечує кількісну та об'єктивну оцінку гомогенності й дозволяє встановити вплив конструкційно-технологічних параметрів на процес змішування.

Викладення основного матеріалу.

Дослідження проводилось з метою встановлення закономірностей впливу конструкційно-технологічних параметрів відцентрового дозатора-змішувача на ступінь однорідності змішування сипких компонентів у присутності надлишкового тиску в зоні подачі.

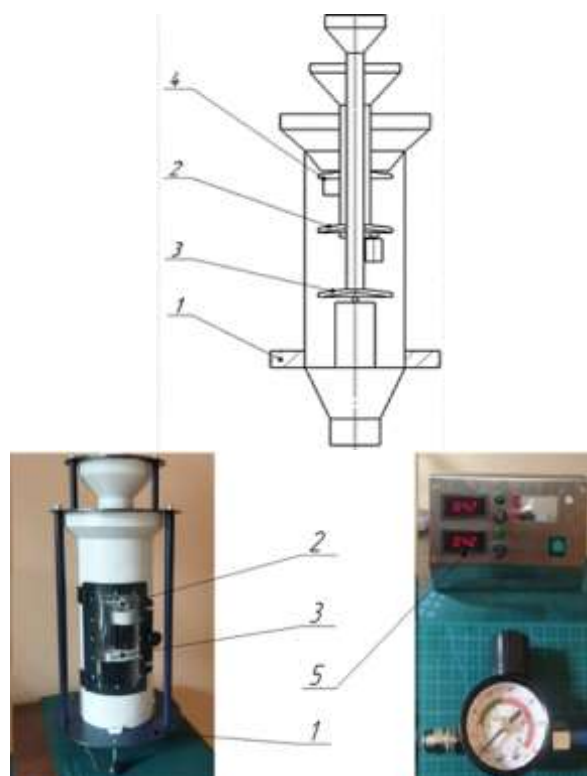
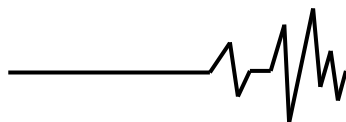


Рис. 1. Загальний вигляд лабораторного обладнання: 1 – основа; 2 – дозатора основного компоненту; 3, 4 – дозаторів компонентів що вводяться; 5 – блоку керування

Змішування здійснювалося за рахунок поєднаної дії відцентрової сили, що виникає під час обертання дозуючого диска, та додаткового тиску у робочій камері, який забезпечує більш інтенсивний розподіл матеріалу по периметру. Основними параметрами, що впливають на рівень однорідності змішування, визначено:

- частоту обертання диска – регулює величину відцентрової сили та інтенсивність руху частинок;

- кут твірної дозуючого диска – формує траєкторію переміщення матеріалу й визначає характер його розподілу у робочому об'ємі;

- надлишковий тиск у зоні виходу сипкого матеріалу – впливає на рівномірність подачі та стабільність потоку частинок.

Для встановлення закономірностей було проведено планований трифакторний експеримент за повною факторною схемою. Як критерії відгуку прийнято показники однорідності суміші.

Таблиця 1

Інтервали і рівні варіювання факторів

Фактор	Позначення	Розмірність	Рівні факторів			Інтервал варіювання ε
			верхній	нульовий	нижній	
			Кодові значення			
			+1	0	-1	
Кутова частота обертання диска, ω .	x_1	хв ⁻¹	1400	900	400	500
Кут твірної дозуючого диска, α .	x_2	град.	15	10	5	5
Надлишковий тиск, P	x_3	кПа.	100	50	0	50

Процедура досліджень передбачала формування сумішей із використанням кольорових маркерів компонентів. Після кожного досліду суміш фотографувалась у умовах однакового освітлення. Обробка зображень здійснювалася у колірному просторі з подальшою сегментацією пікселів за кольором, схема установки для аналізу суміші показана на рис. 2. На основі отриманих даних визначали концентрації кожного компонента. Схема установки для вимірювання складається з камери, розміщеної над сумішею сипких матеріалів, а також комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням.

Фотографування зразків змішаних сипких матеріалів здійснювалося за допомогою цифрової камери 50 MP Samsung ISOCELL GN9 (OIS, f/1.9,

PDAF), що забезпечувала високу якість зображень та можливість відтворення кольорових відтінків компонентів без суттєвих спотворень. Отримані фотознімки використовувалися як вихідні дані для подальшого комп'ютерного аналізу. Попередня обробка та підготовка зображень виконувалася у програмному середовищі Fiji (Fiji Is Just ImageJ), яке дало змогу здійснити сегментацію компонентів за кольоровими ознаками, розбивку зображення на контрольні області та розрахунок локальних показників розподілу.

Схема установки для вимірювання складається з камери, розміщеної над сумішею сипких матеріалів, а також комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням.

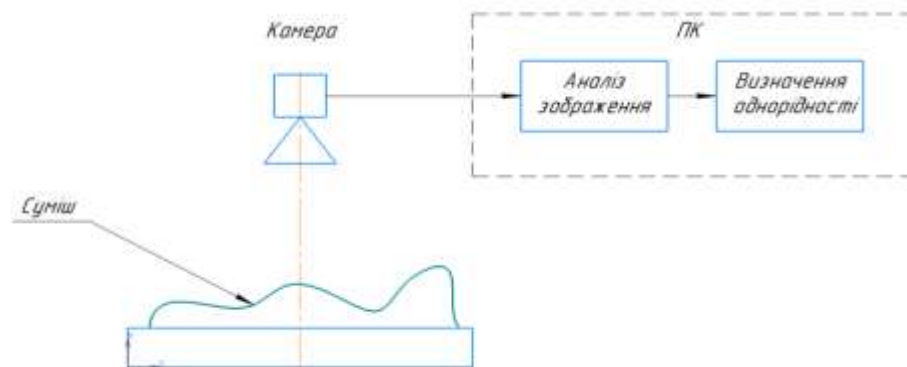
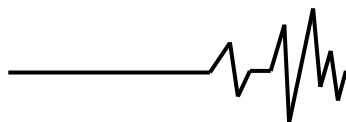


Рис. 2. Принципова схема установки аналізу однорідності суміші

Дана методика та приладозабезпечення дають змогу для дослідження та обґрунтування трикомпонентного дозатора-змішувача сипких матеріалів в потоці.

З урахуванням реальних режимів експлуатації багатокомпонентного відцентрового дозатора-змішувача нами було застосовано поліном другого порядку, який дозволив ефективно систематизувати експериментальні дані та дослідити поверхню відгуку за критерієм

однорідності змішування. Для реалізації планованого трифакторного експерименту було обрано змінні фактори: частоту обертання дозуючого диска, кут його твірної поверхні та величину надлишкового тиску у зоні подачі матеріалу.

На рис. 3 подано зразки багатокомпонентної суміші після проведення експерименту у відцентровому дозаторі-змішувачі.



Рис. 3. Зразки багатокомпонентної суміші в різних ділянках робочої камери

Для ілюстрації застосованої методики наведено приклади обробки фотографій сумішей у програмному середовищі Fiji. На рисунку показано три етапи сегментації, де окремі компоненти суміші виділено різними

кольорами. Такий підхід дозволяє візуально оцінити рівномірність просторового розподілу зерен та використати дані для подальшого кількісного аналізу однорідності.

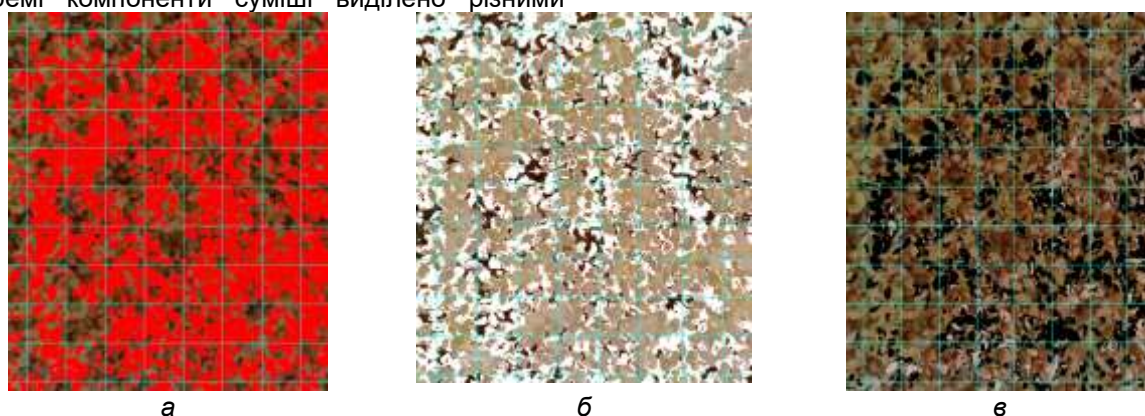
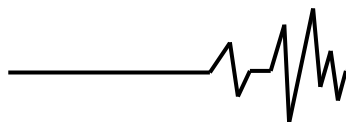
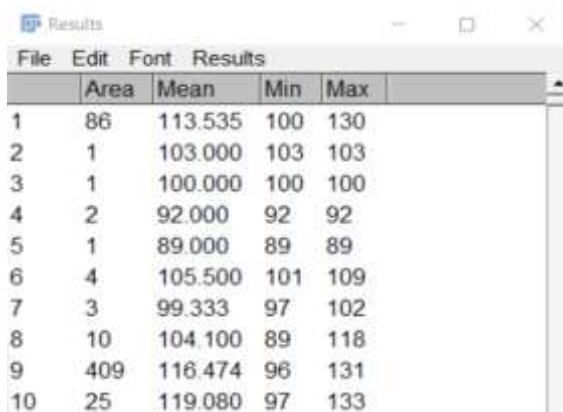


Рис. 4. Приклади сегментації зображення суміші за кольоровими компонентами у програмі Fiji (ImageJ): а - виділені зерна основного компонента; б - виділені зерна компонента що вводиться; в - виділені зерна компонента що вводиться



На рисунку 5 наведено фрагмент результатів вимірювань, отриманих у програмному середовищі Fiji (ImageJ distribution) під час обробки фотографій сумішей. Для кожної виділеної області визначали середнє значення інтенсивності кольору (Mean), мінімальне (Min) та максимальне (Max) значення, а також площу аналізованої ділянки (Area). Ці показники використовувалися для подальшого розрахунку однорідності.



	Area	Mean	Min	Max
1	86	113.535	100	130
2	1	103.000	103	103
3	1	100.000	100	100
4	2	92.000	92	92
5	1	89.000	89	89
6	4	105.500	101	109
7	3	99.333	97	102
8	10	104.100	89	118
9	409	116.474	96	131
10	25	119.080	97	133

Рис. 5. Результати вимірювань інтенсивності кольору в контрольних ділянках зображення суміші (програма Fiji/ImageJ)

Запропонована методика на основі фотоаналізу та сегментації кольорових компонентів у середовищі Fiji дозволяє об'єктивно оцінити однорідність змішування сипких матеріалів. Отримані результати підтвердили можливість поєднання візуальної оцінки з кількісними показниками, що робить підхід придатним для наукових досліджень і практичного контролю якості.

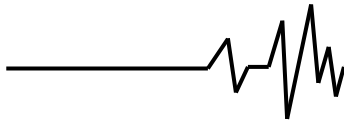
Матриця планування включала закодовані значення незалежних факторів та відповідні результати відгуку, що характеризували якість змішування. У натуральному вигляді рівні факторів наведено у табл. 3.

Експерименти проводилися у стаціонарному режимі з дотриманням сталої подачі сипкого матеріалу. Для підвищення достовірності даних результати кожного досліді фіксувалися у трикратній повторності. Отримані поверхні відгуку дозволили визначити закономірності впливу досліджуваних параметрів на рівень однорідності сумішей та підтвердили здатність змішувача забезпечувати високий рівень гомогенності у широкому діапазоні конструкційно-технологічних режимів.

Таблиця 2

Матриця планованого трифакторного експерименту

№ досліді	Рівні факторів			Однорідність суміші			
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Усер
1	1	1	0	94.766	93.637	93.702	94.035
2	-1	-1	0	92.396	92.719	92.139	92.417
3	1	-1	0	94.670	92.477	92.331	93.160
4	-1	1	0	94.558	92.429	92.025	93.004
5	0	1	1	93.637	92.912	92.654	93.067
6	0	-1	-1	92.993	94.880	92.041	93.305
7	0	1	-1	91.800	93.154	93.637	92.864
8	0	-1	1	92.106	92.058	90.510	91.557
9	1	0	1	94.380	91.123	92.654	92.719
10	-1	0	-1	90.768	90.977	90.961	90.902
11	1	0	-1	92.493	92.122	90.059	91.557
12	-1	0	1	92.041	91.461	92.235	91.912
13	0	0	0	93.670	93.009	92.558	93.079
14	1	1	1	94.282	91.010	91.847	92.380
15	-1	-1	-1	92.751	91.557	91.686	91.999
16	-1	1	1	92.429	91.541	90.380	91.450
17	-1	-1	1	89.961	90.816	89.284	90.020
18	-1	1	-1	92.380	93.492	91.832	92.569
19	1	-1	-1	92.590	92.638	93.541	92.922
20	1	-1	1	91.992	91.058	89.494	90.849
21	1	1	-1	91.945	91.090	91.333	91.456
22	0	0	-1	92.864	93.106	92.880	92.950
23	0	0	1	91.429	91.478	92.623	91.843
24	0	1	0	94.476	93.960	93.154	93.864
25	0	-1	0	92.945	91.364	91.267	91.859
26	1	0	0	94.654	94.670	91.203	93.509
27	-1	0	0	93.203	92.670	92.670	92.848



Відповідно даних табл. 2 результати розрахунків, за загальноприйнятою методикою[11], склали рівняння регресії, яке

$$y = 86,0028 + 0,0049 \cdot \omega + 0,6465 \cdot \alpha - 2,3447 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 + 1,01 \cdot 10^{-5} \cdot \omega \cdot \alpha - 0,0253 \cdot \alpha^2 \quad (1)$$

Графічне представлення залежності наведено на рис. 6.

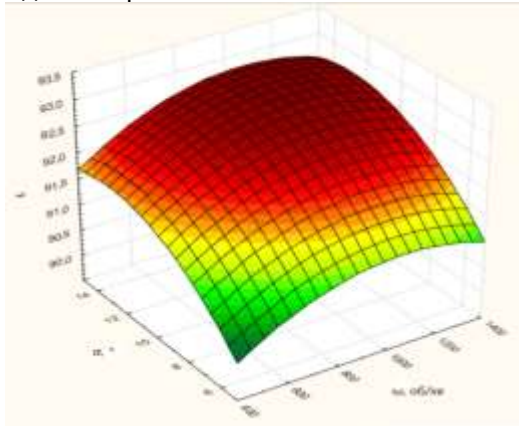


Рис. 6. Залежність однорідності змішування сипких матеріалів у відцентрового дозатора-змішувача від кутової частоти обертання диска ω і кута твірної дозуючого диска α° за надлишкового тиску 100 кПа

$$y = 91,7502 - 0,0011 \cdot \omega + 0,1607 \cdot \alpha + 9,1267 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^2 + 2,88 \cdot 10^{-5} \cdot \omega \cdot \alpha - 0,0036 \cdot \alpha^2 \quad (2)$$

Графічне представлення залежності наведено на рис. 6.

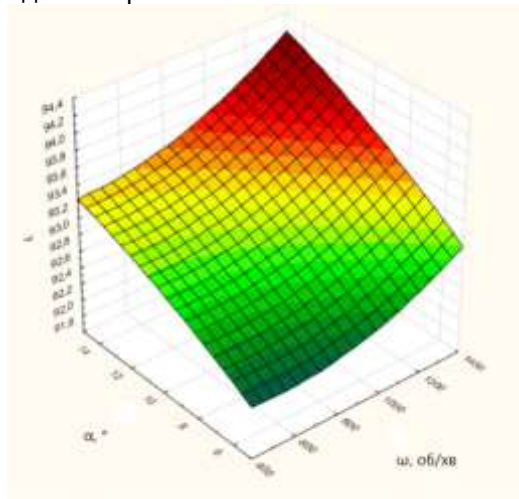


Рис. 7. Залежність однорідності змішування сипких матеріалів у відцентрового дозатора-змішувача від кутової частоти обертання диска ω і кута твірної дозуючого диска α° за надлишкового тиску 50 кПа

З представленої поверхні відгуку видно, що підвищення кутової частоти обертання диска сприяє зростанню однорідності змішування, тоді як зменшення кута твірної

моделює продуктивність дозатора-змішувача в натуральних факторах при надлишковому тиску $P=100$ кПа набуде вигляду:

З аналізу поверхні відгуку видно, що однорідність змішування зростає зі збільшенням кутової частоти обертання диска та досягає максимальних значень у середньому діапазоні кута твірної $10-12^\circ$. Це свідчить, що поєднання підвищених обертів із оптимальним нахилом твірної забезпечує найбільш інтенсивне перемішування сипких матеріалів за сталого надлишкового тиску.

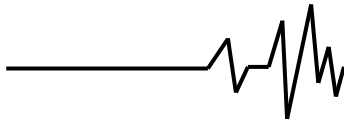
Рівняння регресії, яке моделює продуктивність дозатора-змішувача в натуральних факторах при надлишковому тиску $P=50$ кПа набуде вигляду:

також позитивно впливає на показник гомогенності. Найвищі значення однорідності спостерігаються при поєднанні великих частот обертання з малими кутами твірної, що свідчить про ефективність роботи дозатора за інтенсивних режимів змішування та високого надлишкового тиску.

Висновки. У роботі проведено експериментальні дослідження однорідності змішування сипких матеріалів у відцентровому дозаторі-змішувачі з використанням планованого трифакторного експерименту. Розроблена методика на основі комп'ютерного аналізу фотографій сумішей у програмному середовищі Fiji (ImageJ) підтвердила свою ефективність для об'єктивного визначення гомогенності.

Отримані результати показали, що на однорідність суміші найбільший вплив має кутова частота обертання дозуючого диска, тоді як кут його твірної та величина надлишкового тиску також відіграють суттєву роль у формуванні рівномірності розподілу частинок. Зростання надлишкового тиску у зоні подачі підвищує стабільність процесу та сприяє досягненню високого рівня змішування.

Загалом встановлено, що досліджуваний відцентровий дозатор-змішувач здатний забезпечувати стабільно високу



однорідність багатокомпонентних сумішей у широкому діапазоні режимів роботи. Запропонований підхід може бути рекомендований як для наукових досліджень процесів змішування, так і для впровадження у виробничих умовах з метою підвищення якості продукції та ефективності технологічних процесів.

Список використаних джерел

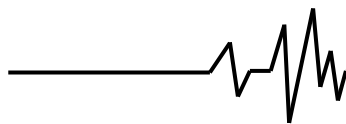
1. Danckwerts P.V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures. *Applied Scientific Research*. 1952. Vol. 3. P. 279–296. <https://doi.org/10.1007/BF03184936>
2. Lacey P.M.C. Developments in the theory of particle mixing // *Journal of Applied Chemistry*. 1954. Vol. 4(5). P. 257–268. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010040505>
3. Rielly C.D., Cullen P.J., Romañach R.J., Abatzoglou N. Mixing Theory. In *Pharmaceutical Blending and Mixing*. 2015. P. 1–24. <https://doi.org/10.1002/9781118682692.ch1>
4. Asachi M., Hassanpour A., Ghadiri M., Bayly A.E. A review of current techniques for the evaluation of powder mixing. *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29(7). P. 1525–1549. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.03.025>
5. Giraud M., Lemieux M., Chaouki J. Multi-scale methodology to quantify homogeneity of co-milled powders. *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 249. P. 117–146. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117146>
6. Berthiaux H., Mosorov V., Tomczak L., Gatumel C., Demeyre J.-F. Principal component analysis for characterising homogeneity in powder mixing using image processing techniques. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2006. Vol. 45(5). P. 397–403. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.11.002>
7. Koç A.B., Dereli H., Yildirim O. Monitoring of dry powder mixing with real-time image processing. *Journal of Applied Sciences*. 2007. 7(8). P. 1218–1223. <https://doi.org/10.3923/jas.2007.1218.1223>
8. Jin X., Gao Y., Zhou Y., Wang S., Li J. DEM simulation of mixing performance in a ribbon mixer using Lacey mixing index. *Powder Technology*. 2022. Vol. 403. Article 117384. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117384>
9. Matos J., Quintanilla M.A.S., Ponce F. Lagrangian analysis of mixing of granular materials in a rotating drum using the scale of segregation. *Powder Technology*. 2018. Vol. 332. P. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.026>
10. Fan Y., Chen X.D., Chen Y. Quantitative assessment of mixing quality of particulate systems using Danckwerts' intensity of

segregation. *Powder Technology*. 2014. Vol. 264. P. 582–590. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.037>

11. Дмитрів В.Т., Дмитрів І.В., Яцунський П.П. Дослідження пневмоелектромагнітного пульсоколектора доїльного апарата методом планованого експерименту. *Науковий журнал "Інженерія природокористування"*. Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2019. № 2 (12). С. 66–720.

References

1. Danckwerts P.V. (1952). Determination and measurement of certain characteristics of mixtures. *Applied Scientific Research*. 3. 279–296. <https://doi.org/10.1007/BF03184936>
2. Lacey P.M.C. (1954). Development of the theory of particle mixing. *Journal of Applied Chemistry*. 4(5). 257–268. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010040505>
12. Rielly C.D., Cullen P.J., Romañach R.J., Abatzoglou N. (2015). Mixing Theory. In *Pharmaceutical Blending and Mixing*. P. 1–24. <https://doi.org/10.1002/0471451452.mix001>
4. Asachi M., Hassanpour A., Ghadiri M., Bayly A.E. (2018). Review of current methods for evaluating powder mixing. *Advanced Powder Technologies*. 29(7). 1525–1549. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.03.025>
5. Giraud M., Lemieux M., Chaouki J. (2022). Multiscale methodology for quantitative assessment of the homogeneity of co-ground powders. *Chemical Engineering Science*. 249. 117–146. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117146>
6. Berthiaux H., Mosorov V., Tomczak L., Gatumel C., Demeyre J.-F. (2006). Principal component analysis for characterising the homogeneity of powder mixtures using image processing techniques // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*.— 45(5). 397–403. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.11.002>
7. Koç A.B., Dereli H., Yildirim O. (2007). Monitoring dry powder mixing with real-time image processing. *Journal of Applied Sciences*. 7(8). 1218–1223. <https://doi.org/10.3923/jas.2007.1218.1223>
8. Jin X., Gao Y., Zhou Y., Wang S., Li J. (2022). DEM modelling of mixing efficiency in a ribbon mixer using the Leahy mixing index. *Powder Technology*. 403. Article 117384. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117384>
9. Matos J., Quintanilla M.A.S., Ponce F. (2018). Lagrangian analysis of mixing granular materials in a rotating drum using a segregation



scale. *Powder Technology*. 332. 109–120.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.026>

10. Fan Y., Chen X.D., Chen Y. (2014). Quantitative assessment of the mixing quality of particle systems using Dankerts segregation intensity. *Powder Technology*. 264. 582–590.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.037>

11. Dmitriv V.T., Dmitriv I.V., Yatsunsky P.P. (2019). Investigation of a pneumatic electromagnetic pulse collector for a milking machine using the planned experiment method. *Scientific journal 'Engineering of Environmental Management'*. Kharkiv: Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, 2(12). 66-720. [in Ukrainian]

EXPERIMENTAL STUDY OF THE HOMOGENEITY OF MIXING BULK MATERIALS IN A CENTRIFUGAL DOSING MIXER

The paper presents the results of an experimental study of multicomponent bulk-material mixing in a continuous centrifugal dispenser-mixer. The objective was to quantitatively evaluate mixture homogeneity and to determine how key design and operating parameters affect mixing quality by combining classical statistical indicators with digital image analysis. To test the hypothesis that the mixer can ensure a high level of homogeneity, a planned three-factor experiment was carried out by varying the dosing disk rotational speed, the disk generatrix angle, and the excess pressure in the working zone.

The assessment procedure relied on introducing color markers for each mixture component, taking control samples after mixing, and photographing them under fixed lighting conditions and a fixed camera geometry. Image processing included correction of the captured frames, color-based segmentation, estimation of component fractions within the image, and statistical aggregation across measurement series. Based on the resulting dataset, integral homogeneity indicators were calculated and compared for different combinations of factors, which made it possible to identify characteristic trends in mixing quality depending on the operating mode.

The experimental results demonstrate a consistently high level of mixing across a wide range of operating conditions, while the influence of the investigated parameters follows a regular pattern, providing a basis for further optimization of the design and settings. The proposed approach not only confirms the efficiency of the centrifugal dispenser-mixer but also establishes a reproducible method for quantitative mixing-quality evaluation based on digital images. The findings can be applied in the food, pharmaceutical, chemical, and construction industries, as well as for laboratory quality control and process analytical technology tasks.

Key words: centrifugal dosing mixer, bulk materials, homogeneity, coefficient of variation, planned experiment.

Відомості про авторів

Дмитрів Ігор Васильович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», 79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, e-mail: Ihor.V.Dmytriv@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

Саган Олег Ярославович – здобувач освітнього ступеня доктора філософії кафедри проєктування машин та автомобільного інжинірингу, Національний університет «Львівська політехніка», 79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, e-mail: Oleh.Y.Sahan@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0004-5116-8679>

Dmytriv Ihor - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automotive Transport, Lviv Polytechnic National University, 79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine, e-mail: Ihor.V.Dmytriv@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

Sahan Oleh - recipient of the PhD degree of Department of Design Machine and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, 79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine, e-mail: Oleh.Y.Sahan@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0004-5116-8679>

Стаття надійшла 28.10.2025

Стаття прийнята 07.11.2025

Опубліковано 25.12.2025