

Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра інжинірингу технічних систем

**Пояснювальна записка**  
до дипломної роботи  
освітнього ступеня "Магістр" на тему:  
**Чисельне моделювання та порівняння ефективності змішувачів сипких  
кормів**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МГАІ-4-24  
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Сеніков Дмитро Андрійович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Алієв Ельчин Бахтияр огли

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Луц Павло Михайлович

Дніпро, 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем  
Освітній ступінь: «Магістр»  
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Сенікову Дмитру Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання та порівняння ефективності змішувачів сипких кормів

керівник роботи Алієв Ельчин Бахтияр огли, д-р техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 05.12.2025 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі механізації тваринництва та існуючих технічних засобів для приготування кормів. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Стан і напрями досліджень. 2. Аналітичні дослідження процесу змішування сипких кормів. 3. Методика чисельного моделювання процесу змішування сипких кормів. 4. Результати чисельного моделювання процесу змішування сипких кормів. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність змішувачів кормів. Висновки. Список використаних джерел. Додатки





Сеніков Д.А. Чисельне моделювання та порівняння ефективності змішувачів сипких кормів. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У роботі проведено комплексне дослідження процесу змішування сипких кормів із використанням чисельного моделювання для оцінки ефективності різних типів змішувачів. Розглянуто фізико-механічні властивості сипучих кормів, типи та способи змішування, класифікацію обладнання, а також застосування сучасних методів моделювання у кормовиробництві. Аналітична частина досліджень включає числові схеми та застосування методу дискретних елементів (DEM) і методу укрупнення частинок (CGM) для відтворення динаміки руху частинок у змішувачах. Розроблено методику чисельного моделювання, що передбачає моделювання частинок, визначення індексу змішування Лейсі (LMI) та зон відбору проб для оцінки якості змішування. У результатах моделювання проаналізовано ефективність змішування у V-подібному барабанному, стрічковому, лопатовому, вертикальному лопатовому та конічно-гвинтовому змішувачах. Встановлено, що тип змішувача суттєво впливає на швидкість та однорідність суміші. Додатково розглянуто питання охорони праці, безпеки в надзвичайних ситуаціях та економічної ефективності змішувачів, включаючи розрахунок питомих експлуатаційних та приведених витрат.

**Ключові слова:** змішування сипких кормів, чисельне моделювання, DEM, CGM, індекс Лейсі, ефективність змішувачів, економічна оцінка, безпека праці.

**Апробація.** Сеніков Д.А. (2025). Порівняння ефективності змішувачів сипких кормів. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 263–266.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	10
1.1 Властивості сипучих кормів.....	10
1.2 Типи та способи змішування сипких кормів .....	12
1.3 Класифікація обладнання для змішування сипких кормів .....	16
1.4 Використання моделювання при дослідженні процесів змішування .....	18
1.5 Висновки з розділу.....	24
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ КОРМІВ .....	26
2.1 Числова схема.....	26
2.2 Метод дискретних елементів (DEM).....	26
2.3 Метод укрупнення частинок (CGM) .....	29
2.4 Висновки з розділу.....	31
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ КОРМІВ.....	33
3.1 Вибір змішувальних процесів .....	33
3.2 Моделювання частинок .....	39
3.3 Індекс змішування Лейсі (LMI).....	42
3.4 Визначення зон відбору проб для розрахунку LMI .....	44
3.5 Висновки з розділу.....	48
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ КОРМІВ.....	50
4.1 Аналіз ефективності змішування у V-подібному барабанному змішувачі ....	50
4.2 Аналіз ефективності змішування у стрічковому змішувачі .....	54
4.3 Аналіз ефективності змішування у лопатевому змішувачі .....	57
4.4 Аналіз ефективності змішування у вертикальному лопатевому змішувачі ...	60

	7
4.5 Аналіз ефективності змішування у конічно-гвинтовому змішувачі .....	63
4.6 Підсумок результатів .....	67
4.7 Висновки з розділу.....	68
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	72
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМІШУВАЧІВ КОРМІВ .....	75
ВИСНОВКИ .....	81
Бібліографія.....	83
Додатки .....	88

## ВСТУП

Забезпечення високої якості комбікормів є одним із ключових факторів ефективного функціонування тваринницьких підприємств. Одним із важливих етапів технологічного процесу виробництва кормів є змішування компонентів, яке визначає однорідність суміші, її поживну цінність та безпеку для тварин. Неefективне змішування призводить до нерівномірного розподілу компонентів, погіршення якості корму та збільшення витрат на виробництво.

У сучасних кормових підприємствах застосовуються різні типи змішувачів – V-подібні, лопатеві, стрічково-лопатеві та вертикально-лопатеві – які відрізняються конструкцією, продуктивністю, споживанням енергії та економічною ефективністю. Вибір оптимального обладнання вимагає комплексного аналізу технічних, технологічних і економічних параметрів.

Чисельне моделювання дозволяє здійснювати детальне дослідження процесу змішування, оцінювати розподіл компонентів у суміші, швидкість та ефективність роботи змішувачів без необхідності проведення дорогих і тривалих експериментальних випробувань. Це дає змогу порівнювати різні конструкції змішувачів та обирати найбільш раціональні для конкретних умов виробництва.

**Метою даної роботи** є чисельне моделювання та порівняння ефективності різних типів змішувачів сипких кормів з метою визначення оптимального обладнання для підвищення якості суміші та зниження експлуатаційних витрат. У ході дослідження розглядаються технічні характеристики змішувачів, економічна доцільність їх використання та параметри, що впливають на ефективність змішування.

**Об'єкт дослідження:** процес змішування сипких кормів у різних типах змішувачів, що застосовуються у виробництві комбікормів.

**Предмет дослідження:** ефективність та параметри роботи змішувачів сипких кормів, оцінені за допомогою чисельного моделювання, фізико-механічних властивостей кормових компонентів та економічних показників.

**Завдання дослідження:**

1. Проаналізувати властивості сипких кормів та їх вплив на процес змішування.
2. Охарактеризувати типи та способи змішування, а також класифікацію змішувального обладнання.
3. Дослідити можливості чисельного моделювання процесів змішування, застосовуючи методи DEM та CGM.
4. Розробити методику чисельного моделювання змішування кормових компонентів із визначенням індексу змішування Лейсі (LMI).
5. Провести чисельне моделювання процесів змішування у різних типах змішувачів та порівняти їх ефективність.
6. Оцінити економічну доцільність використання різних змішувачів за питомими та приведеними витратами.
7. Розглянути питання охорони праці та безпеки під час роботи зі змішувачами сипких кормів.

## 1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Властивості сипучих кормів

Насипний корм характеризується низкою взаємопов'язаних фізичних і хімічних властивостей, які впливають на його транспортування, зберігання та ефективність у забезпеченні тварин поживними речовинами. Однією з ключових характеристик є щільність, від якої залежить, скільки корму можна розмістити в певному об'ємі. Вища насипна щільність забезпечує ефективніше транспортування та знижує витрати на зберігання. Вміст вологи повинен залишатися в оптимальних межах – зазвичай близько 10–14%, – щоб запобігти розвитку мікроорганізмів, злежуванню чи бродінню, які знижують якість корму. Важливою властивістю є також розподіл частинок за розміром: однорідна фракція сприяє рівномірному змішуванню, стабільному споживанню поживних речовин і добрій плинності в автоматизованих системах годівлі.

Плинність насипного корму залежить від форми та текстури поверхні частинок: гладкі, округлі частинки рухаються легше, ніж волокнисті чи неправильної форми. Цю властивість відображає показник кута природного укусу – чим менший цей кут, тим краща сипкість. Корм із низькою плинністю може утворювати зводи чи закупорки в силосах і бункерах, порушуючи роботу обладнання. Важливим чинником є й схильність до розшарування: під час транспортування або вібрацій дрібніші та важчі частинки можуть осідати окремими шарами, що призводить до нерівномірного надходження поживних речовин тваринам.

З хімічної точки зору, насипний корм має зберігати стабільність поживних компонентів — вітамінів, жирів і білків, які повинні протистояти руйнуванню з часом. Вплив кисню, тепла та світла може спричиняти окиснення, особливо у кормах, що містять жири або олії. Тому важливо забезпечити належні умови

зберігання – прохолодне, сухе місце, захищене від прямих сонячних променів. Запах і колір насипного корму є показниками його свіжості та відсутності псування.

З практичної точки зору, властивості насипного корму роблять його придатним для механізованих систем подачі – таких як шнеки, транспортери чи пневматичні лінії, що використовуються у промисловому тваринництві. Це дозволяє отримувати великі обсяги корму безпосередньо в силос, зменшуючи кількість пакувальних відходів і трудові витрати. Водночас він потребує ретельного контролю, щоб запобігти забрудненню пилом, вологою або шкідниками.

Отже, насипний корм поєднує фізичні властивості – такі як щільність, розмір частинок і плинність – із хімічними характеристиками, зокрема стабільністю вологи та поживних речовин. У сукупності ці параметри визначають, наскільки ефективно корм можна зберігати, транспортувати й подавати, зберігаючи при цьому його поживну цінність і безпечність для тварин.

Таблиця 1.1 – Поживний склад та фізичні характеристики кормових інгредієнтів

Інгредієнти	Суха речовина	Сира зола	Сирий жир	Сира протеїна	Стисливість (%)	Насипна густина (кг/м <sup>3</sup> )	Утрамбована густина (кг/м <sup>3</sup> )	Середня насипна густина (кг/м <sup>3</sup> )	Кут природного укосу (°)
Плющений ячмінь	89,94	2,23	2,27	9,99	48,39	362,9	703,13	533,01	32,16
Ячмінь	88,37	2,16	1,91	12,11	41,8	368,85	633,8	501,33	30,79
Кукурудза	89,44	0,92	5,07	8,0	27,68	488,51	668,69	578,6	28,89
Кукурудза (повножирна)	96,88	2,9	12,59	18,73	33,65	432,69	652,17	542,43	31,79
Овес	91,62	3,76	7,75	12,49	45,38	346,15	633,8	489,98	33,2
Пшениця	88,53	1,45	2,18	11,61	29,15	514,3	726,0	620,15	30,2
Пшеничні висівки	87,05	0,81	4,97	8,53	27,82	338,35	468,75	403,55	32,97
Кукурудзяний глютенівий корм	91,54	4,64	17,05	18,95	24,44	500,0	661,76	580,88	38,71
Кукурудзяне глютеніве борошно	91,56	1,75	2,37	62,27	7,35	661,76	714,29	688,03	24,18

Інгредієнти	Суша речовина	Сира зола	Сирий жир	Сира протеїна	Стисливість (%)	Насипна густина (кг/м <sup>3</sup> )	Утрамбована густина (кг/м <sup>3</sup> )	Середня насипна густина (кг/м <sup>3</sup> )	Кут природного укосу (°)
Кукурудзяні DDGS	88,31	5,04	7,54	30,68	24,76	483,93	644,0	563,98	28,19
Пшеничні DDGS	90,06	4,02	3,16	32,65	21,98	494,51	633,8	564,15	26,86
Пшеничні висівки (інші)	90,04	4,54	3,06	16,13	29,49	370,96	523,8	447,38	27,35
Пшеничні мідлінґс	91,43	3,21	4,44	16,21	31,45	362,9	529,41	446,16	34,48
Насіння соняшнику	94,89	3,17	44,92	15,7	39,78	483,87	803,57	643,72	27,66
Бавовняний шрот	88,84	5,74	2,15	35,12	43,67	342,08	596,12	469,1	30,88
Макуха гарбузова	93,82	6,79	12,19	22,43	36,13	378,15	592,11	485,13	26,67
Макуха сафлорового насіння	92,45	3,86	0,2	20,65	28,57	494,51	692,31	593,41	21,96
Соєвий шрот	90,51	6,96	2,24	36,72	20,93	591,74	748,59	670,16	25,08
Соняшниковий шрот	89,7	6,36	1,19	32,8	30,82	429,84	540,86	485,35	24,68
Соняшникова макуха (повножирна)	95,94	7,43	7,42	41,36	43,7	378,15	671,64	524,9	29,97
Буряковий жом	86,94	4,27	0,82	9,47	27,21	306,12	420,56	363,34	28,28
Какаові оболонки	92,44	8,02	4,47	12,8	27,18	436,89	600,0	518,45	29,99
Соєві оболонки	90,8	4,92	1,5	10,33	26,47	441,18	600,0	520,59	22,07
Лушпиння соняшнику	91,04	3,5	1,08	6,85	34,31	295,71	445,02	370,36	27,32
М'ясо-кісткове борошно	93,83	33,19	17,48	41,59	41,38	517,24	882,35	699,8	27,47
Люцерна	90,95	10,37	1,4	16,74	24,97	409,23	545,47	477,33	29,76

## 1.2 Типи та способи змішування сипких кормів

Насипний корм може змішуватися за допомогою різних типів міксерів і методів, залежно від складу корму, розміру частинок та рівня однорідності, якого потрібно досягти. Основними видами змішування є партійне (batch mixing) і безперервне (continuous mixing). У партійному змішуванні певна кількість інгредієнтів завантажується в міксер, перемішується протягом заданого часу, після чого суміш вивантажується перед початком нового циклу. Такий метод забезпечує

точний контроль співвідношення компонентів і часто використовується на комбікормових заводах, де виготовляють різні рецептури для різних видів тварин. Безперервне змішування, навпаки, передбачає постійне надходження та вихід інгредієнтів із мікзера, підтримуючи стабільний процес змішування. Цей спосіб підходить для великомасштабного виробництва з високою продуктивністю, коли необхідно отримати однорідний корм протягом тривалого часу.

Найпоширенішими типами міксерів для насипного корму є горизонтальні та вертикальні. У горизонтальному міксері використовуються лопаті або стрічкові елементи, закріплені на горизонтальному валу. Вони рухають корм у протилежних напрямках, забезпечуючи швидке та ретельне перемішування. Горизонтальні стрічкові міксери особливо ефективні для дрібних або порошкоподібних компонентів і здатні досягати високої однорідності за короткий час. Вертикальні міксери, навпаки, мають вертикальну конструкцію: корм піднімається шнеком або гвинтом із дна вгору, а потім під дією сили тяжіння падає вниз. Цикл повторюється, доки суміш не стане рівномірною. Вертикальні міксери є більш економічними та простими в експлуатації, проте процес змішування триває довше, а дрібні компоненти перемішуються менш ефективно, ніж у горизонтальних моделях.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд горизонтально мікзера



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд вертикального міксер



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд барабанного міксер

Інший важливий тип – барабанний міксер, що являє собою обертовий циліндр, у якому кормові інгредієнти перемішуються шляхом перекочування. Такий міксер часто використовують для грубих або волокнистих кормів, оскільки він забезпечує м'яке перемішування без пошкодження частинок. У великих

комбікормових виробництвах також застосовують пневматичні або псевдозріджені (fluidized-bed) міксери, які використовують потоки повітря для перемішування легких частинок. Це дозволяє досягти високої рівномірності без механічного зношування.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд пневматичного міксера

Процес змішування зазвичай проходить кілька етапів: завантаження сухих інгредієнтів (зернових, білкових шротів тощо), перемішування протягом певного часу, додавання рідких компонентів – таких як олії, патока чи добавки, – і, нарешті, вивантаження готового корму. Тривалість змішування має вирішальне значення: недостатнє перемішування призводить до нерівномірного розподілу поживних речовин, а надмірне – до розшарування або руйнування чутливих компонентів.

У сучасному виробництві кормів автоматизовані системи контролюють параметри змішування – час, швидкість обертання та співвідношення інгредієнтів – для забезпечення стабільної якості. Правильне технічне обслуговування, регулярне очищення міксера та калібрування дозаторів інгредієнтів є необхідними

для запобігання забрудненню між партіями й забезпечення точності рецептур. Таким чином, вибір типу та методу змішування в процесі виробництва насипного корму залежить від масштабів виробництва, фізичних властивостей компонентів і бажаного рівня однорідності кінцевого продукту.

### **1.3 Класифікація обладнання для змішування сипких кормів**

Обладнання для змішування сипучих кормів можна класифікувати за кількома критеріями, включаючи режим роботи, конструкцію змішувача, напрямок руху матеріалу та тип механізму змішування. Залежно від режиму роботи змішувачі поділяються на періодичні та безперервні. Періодичні змішувачі обробляють фіксовану кількість інгредієнтів за один раз, забезпечуючи точний контроль пропорцій та часу змішування, що ідеально підходить для виробництва різних кормових сумішей. Безперервні змішувачі працюють без перерв, де інгредієнти постійно подаються і змішуються, а готовий корм одночасно вивантажується, що робить їх придатними для великомасштабного промислового виробництва.

Залежно від конструкції та орієнтації змішувальної камери, змішувачі зазвичай класифікуються як горизонтальні або вертикальні. Горизонтальні змішувачі, такі як стрічкові або лопатеві змішувачі, мають горизонтальний вал, оснащений лопатями, які переміщують корм у протилежних напрямках для створення однорідної суміші. Ці змішувачі є ефективними і швидкими, особливо для порошкоподібних або гранульованих інгредієнтів корму. На відміну від них, вертикальні змішувачі мають гвинт або шнек, який піднімає корм від дна до верху резервуара, дозволяючи йому падати назад під дією сили тяжіння. Цей процес триває доти, доки корм не буде рівномірно змішаний. Вертикальні конструкції є простішими і економічнішими, хоча вони можуть вимагати більш тривалого часу змішування і є менш ефективними з дуже дрібними матеріалами.

Змішувачі також можна класифікувати за типом механізму змішування. Стрічкові змішувачі використовують гвинтові стрічки для переміщення матеріалу в протилежних напрямках, досягаючи ретельного і однорідного змішування. Лопаткові змішувачі використовують плоскі або вигнуті лопатки, які піднімають і перевертають матеріал, забезпечуючи хороше змішування і мінімальне пошкодження делікатних компонентів. Барабанні або роторні змішувачі складаються з обертового циліндричного барабана, який перевертає корм, забезпечуючи м'яке змішування, яке підходить для грубих або волокнистих матеріалів. Змішувачі шнекового типу використовують один або кілька гвинтів для переміщення та змішування корму по довжині змішувальної камери, зазвичай використовуються в кормових вагонах та переносних установках.

Інша класифікація базується на методі змішування. Деякі змішувачі працюють за принципом конвекції, де матеріал фізично переміщується лопатками або лопатками; інші використовують дифузію, де дрібніші частинки заповнюють простір між більшими частинками шляхом випадкового руху. Більш досконалі типи, такі як пневматичні змішувачі або змішувачі з псевдозрідженим шаром, використовують повітряні потоки для підвішування та рівномірного змішування легких частинок без механічного перемішування.

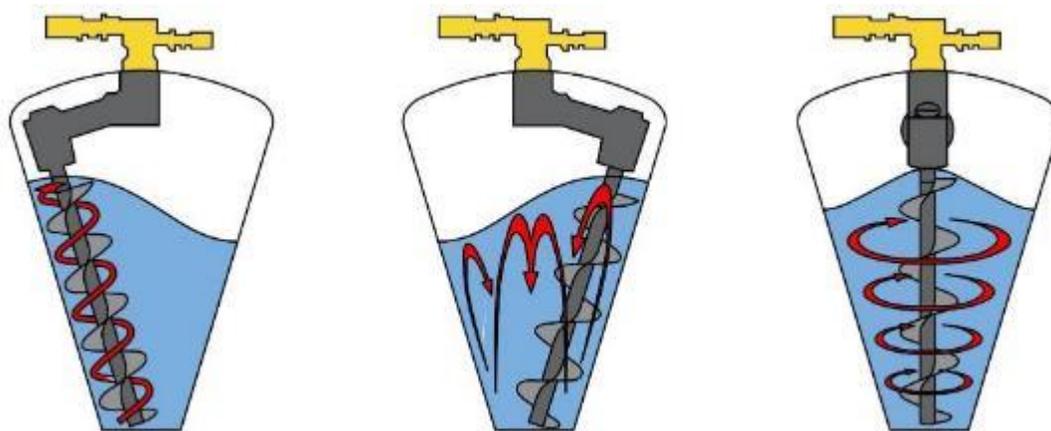


Рисунок 1.5 – Конвекційне змішування



Рисунок 1.6 – Дифузійне змішування

Крім того, обладнання можна групувати за ступенем автоматизації. Ручні або напівавтоматичні змішувачі використовуються на невеликих фермах, тоді як повністю автоматизовані системи на комбикормових заводах можуть з високою точністю контролювати дозування інгредієнтів, час змішування та вивантаження за допомогою комп'ютерних систем.

Загалом, класифікація обладнання для змішування сипучих кормів відображає відмінності в конструкції, принципах роботи та призначенні. Вибір змішувача залежить від таких факторів, як тип інгредієнтів корму, необхідна однорідність, виробнича потужність та наявний простір на підприємстві з переробки кормів.

#### **1.4 Використання моделювання при дослідженні процесів змішування**

Використання моделювання при дослідженні процесів змішування сипких кормів стало одним з ключових напрямів розвитку сучасної кормової технології, оскільки дозволяє аналізувати структуру потоку частинок, час змішування, енерговитрати та ризики сегрегації без проведення великої кількості дорогих та тривалих експериментів. Для сипких кормів, що за своїми властивостями належать до зернистих та порошкоподібних матеріалів, особливо актуальними є методи,

здатні описати поведінку окремих частинок або локальних об'ємів суміші у складній геометрії змішувача, а також кількісно оцінити ступінь однорідності суміші. У науковій практиці застосовують три взаємодоповнювальні підходи: дискретно-частинкове моделювання (метод дискретних елементів, DEM), методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) та моделі на основі рівнянь балансу населення (population balance models, PBM), які у різних комбінаціях дають змогу описати як мікрорівень (рух окремих гранул), так і макрорівень (розподіл концентрацій компонентів у робочому об'ємі змішувача).

Метод дискретних елементів (DEM) є базовим інструментом для моделювання змішування сипких кормів, оскільки розглядає кожну частинку як окреме тверде тіло з власними масою, розмірами, формою, коефіцієнтами тертя й відновлення. Рух *i*-ої частинки описується рівняннями Ньютона для поступального та обертального руху:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{F}_{ij} + m_i \mathbf{g}, \quad I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{M}_{ij}, \quad (1.1)$$

де  $m_i$  – маса частинки,  $\mathbf{r}_i$  – радіус-вектор її центру,  $\mathbf{F}_{ij}$  – сумарна контактна сила між частинками *i* та *j* (та стінками апарата),  $\mathbf{g}$  – вектор прискорення вільного падіння,  $I_i$  – тензор інерції частинки,  $\boldsymbol{\omega}_i$  – кутова швидкість,  $\mathbf{M}_{ij}$  – контактні моменти. Для контактних взаємодій зазвичай використовують моделі типу Герца–Міндліна з урахуванням нормальної та тангенціальної деформації, сухого тертя та, за потреби, когезії. Такий підхід дозволяє відтворити траєкторії кожної частинки корму, дослідити формування зон застою, каналів протікання, локальних скупчень важких або дрібних фракцій та проаналізувати механізми сегрегації, що особливо важливо для вітамінно-мінеральних преміксів.

На основі DEM-моделей виконано велику кількість досліджень змішування зернистих матеріалів у барабанних, планетарних, стрічкових і лопатевих змішувачах. Показано, що DEM дозволяє кількісно описати вплив заповнення барабана, частоти обертання, геометрії робочих органів та різниці густини частинок

на швидкість та якість змішування, а також прогнозувати виникнення сегрегації за розміром і густиною. Для сипких кормів та преміксів особливо показовими є роботи, де змішувачі моделюються з реальною або наближеною до реальної геометрією. Наприклад, вітчизняні дослідження числового моделювання Y-подібного змішувача кормових преміксів методом дискретних елементів показали можливість оцінювати рівномірність розподілу мікрокомпонентів, вплив кута розгалуження каналів, швидкості подачі та шорсткості стінок на якість суміші, що дозволяє оптимізувати конструкцію змішувача ще на етапі проектування.

Для оцінювання якості змішування у DEM-моделях широко застосовуються статистичні індекси змішування. Класичним є показник Лейсі, який базується на аналізі дисперсії концентрації цільового компонента у вибірках з об'єму суміші. Математично індекс Лейсі записують у вигляді

$$M_L = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2}, \quad (1.2)$$

де  $\sigma^2$  – вимірjana дисперсія масової частки компонента в пробах,  $\sigma_0^2$  – дисперсія для повністю розшарованої (сегрегованої) системи,  $\sigma_r^2$  – дисперсія для ідеально перемішаної системи. Значення  $M_L \rightarrow 0$  відповідає повній сегрегації,  $M_L \rightarrow 1$  – майже ідеальному змішуванню. Сучасні дослідження показують, що індекс Лейсі має певні обмеження (наприклад, може перевищувати одиницю при складних початкових конфігураціях), тому запропоновано альтернативні критерії – координатний індекс змішування, середньодистанційний індекс та «cell mixing index», які також обчислюються на основі статистики розподілу частинок у контрольних комірках розрахункової сітки. Для кормових сумішей ці індекси дозволяють кількісно порівнювати ефективність різних типів змішувачів (стрічкових, лопатевих, Y-подібних, планетарних тощо), режимів завантаження та тривалості циклу змішування.

Останніми роками з'являється все більше робіт, де DEM застосовують безпосередньо до харчових і кормових частинок. При числовому дослідженні

змішування харчових частинок у тривимірному рухомому змішувачі за допомогою програм EDEM та ADAMS було показано, що зростання швидкості обертання активного вала до певного оптимуму суттєво покращує однорідність суміші, а вибір форми барабана (квадратний, циліндричний, еліптичний) істотно впливає на час досягнення заданого індексу змішування. Аналогічні результати отримано при моделюванні роботи безперервних змішувачів для гранульованих матеріалів: DEM-дослідження дозволили встановити вплив швидкості подачі, профілю лопатей та перепаду рівнів матеріалу у камері на осьову і радіальну складові змішування. Такі підходи безпосередньо переносні на лінії підготовки комбікормів і преміксів, де критичними є як однорідність, так і пропускна здатність обладнання.

Другим важливим напрямом є застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для опису псевдозріджених, гідравлічних і пневматичних систем змішування, а також для аналізу течії газу чи рідини, які транспортують і частково перемішують сипкий компонент. CFD базується на числовому розв'язанні рівнянь Нав'є–Стокса для багатофазного середовища, де тверда фаза може моделюватися як дисперсна (Eulerian–Eulerian) або як сукупність частинок (Eulerian–Lagrangian). Для сумішей «тверде тіло – рідина» загальний масообмін у елементі об'єму описується рівнянням

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s) = S_s, \quad (1.3)$$

де  $\alpha_s$  – об'ємна частка твердої фази,  $\rho_s$  – її густина,  $\mathbf{u}_s$  – вектор швидкості твердої фази,  $S_s$  – джерела маси, пов'язані з введенням або видаленням частинок. Численні оглядові та прикладні роботи показують, що CFD можна успішно використовувати для аналізу формування «хмари» твердих частинок у змішувальних апаратах, оцінки зон відриву потоку, мертвих зон, локальних вихорів та енергетичної ефективності різних типів мішалок, у тому числі за складних форм лопатей. Для виробництва рідких або пастоподібних кормів, а також для зволоження сухих кормів перед гранулюванням CFD-моделі дають змогу оптимізувати геометрію

апаратів та режими роботи з урахуванням одночасної присутності твердих частинок і рідини.

Особливе місце займають комбіновані CFD–DEM моделі, в яких газова чи рідка фаза описується методами CFD, а тверді частинки – DEM, а обмін імпульсом між фазами враховується через термін опору у рівняннях руху. Такі підходи застосовують для дослідження змішування у псевдозріджених шарах, барботажних апаратах, а також у змішувачах, де важливо відтворити взаємодію частинок корму з бульбашками газу або струменями рідини. Для кормової промисловості це перспективно, наприклад, при розпилювальному нанесенні жирів, ферментних препаратів або лікувальних добавок на поверхню гранул, де якість змішування визначається не лише механічним перемішуванням, а й гідродинамікою двофазного потоку.

Третім важливим класом моделей є рівняння балансу населення (population balance equations, PBE), які описують зміну розподілу частинок за певними ознаками (розмір, маса, вміст активної речовини) в часі та просторі. У загальному вигляді рівняння балансу населення можна подати як

$$\frac{\partial n(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, t)}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot (n\mathbf{u}) + \nabla_{\boldsymbol{\xi}} \cdot (n\mathbf{G}) = B(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, t) - D(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, t), \quad (1.4)$$

де  $n(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, t)$ – функція густини частинок, що залежать від координати  $\mathbf{x}$ , вектору внутрішніх властивостей  $\boldsymbol{\xi}$  (наприклад, розміру) та часу  $t$ ,  $\mathbf{u}$ – поле швидкості потоку,  $\mathbf{G}$ – швидкість зміни внутрішніх координат (росту, розчинення, агрегації),  $B$  і  $D$ – члени народження та зникнення частинок відповідно. У контексті змішування сипких кормів такі моделі придатні для опису суміщених процесів змішування та гранулювання, агрегації, руйнування гранул у барабанних або псевдозріджених апаратах, коли важливо відстежити еволюцію гранулометричного складу разом з однорідністю розподілу компонентів.

Застосування PBE-моделей у поєднанні з CFD та DEM дозволяє будувати каскадні або багатокамерні моделі потоку, в яких змішувач розглядають як систему об'ємів з різним ступенем перемішування та часом перебування матеріалу. Це дає

змогу моделювати промислові лінії безперервного виробництва комбікормів, де кормовий потік проходить послідовно через декілька вузлів (дозування, попереднє змішування, основне змішування, зволоження, гранулювання, охолодження), а макро- та мікрозмішування впливають як на харчову однорідність, так і на стабільність гранул.

Важливо відзначити, що моделювання змішування сипких кормів не обмежується суто фізичними моделями. З розвитком обчислювальних ресурсів активно розвиваються методи оптимізації та машинного навчання, які використовуються для пошуку оптимальних режимів роботи змішувачів на основі результатів DEM та CFD-симуляцій. У сучасних роботах пропонується автоматизований підбір конструктивних параметрів (форма та кут атаки лопатей, конфігурація перегородок, профіль барабана) з метою забезпечення заданого індексу змішування за мінімальної тривалості циклу та енерговитрат. Для кормової промисловості це відкриває перспективи швидкого проектування нових типів змішувачів для преміксів, стартерних та високопротеїнових комбікормів, де вкрай важлива висока рівномірність розподілу мікрокомпонентів.

Отже, використання моделювання при дослідженні процесів змішування сипких кормів забезпечує перехід від емпіричного підходу «спроб і помилок» до науково обґрунтованого проектування обладнання та режимів роботи. DEM дозволяє відтворити детальну картину руху окремих частинок та оцінити індекси змішування; CFD забезпечує аналіз гідродинаміки багатофазних потоків та енергетичної ефективності апаратів; моделі на основі рівнянь балансу населення описують еволюцію розподілу частинок у комплексних процесах типу «змішування–гранулювання». Їх поєднання, підтвержене великою кількістю останніх наукових робіт, у тому числі для кормових і харчових систем, є основою для створення високоефективних змішувальних систем нового покоління, здатних забезпечити стабільну якість і однорідність сипких кормів на всіх стадіях технологічного процесу.

## 1.5 Висновки з розділу

1. Властивості сипучих кормів визначають їхню технологічну придатність, впливаючи на процеси транспортування, зберігання, дозування та змішування. Аналіз фізичних і хімічних характеристик показує, що насипна та утрамбована густина, ступінь стисливості й кут природного укосу є ключовими параметрами, які визначають сипкість, схильність до злежування та поведінку корму в механізованих системах. Оптимальний вміст вологи (10–14%) забезпечує стабільність продукту, запобігаючи мікробіологічному псуванню, злипанням та небажаним фізичним змінам структури частинок. Важливу роль відіграє розподіл частинок за розміром: однорідна структура забезпечує рівномірне змішування і стабільну подачу, тоді як широкий гранулометричний склад сприяє розшаруванню суміші під час транспортування чи вібрацій.

2. Розглянуто основні типи та способи змішування сипких кормів, які застосовуються у сучасному кормовиробництві. Аналіз показав, що вибір оптимального методу змішування визначається фізичними властивостями компонентів, вимогами до однорідності та масштабом виробництва. Партиїне змішування забезпечує високу точність дотримання рецептур і гнучкість у виготовленні різних кормових сумішей, тоді як безперервні системи змішування придатні для великотоннажного виробництва з постійним виходом готового продукту. Досліджено особливості роботи найпоширеніших типів міксерів – горизонтальних, вертикальних, барабанних та пневматичних. Показано, що горизонтальні міксери мають найвищу ефективність змішування і забезпечують швидке досягнення однорідності, тоді як вертикальні відзначаються простотою та економічністю, але потребують тривалішого часу роботи. Барабанні конструкції доцільні для грубих і крихких кормів, оскільки забезпечують м'яке перемішування без руйнування частинок. Пневматичні міксери демонструють ефективність при роботі з легкими, дрібнодисперсними компонентами.

3. Проаналізовано конструкції та принципи роботи основних типів змішувачів, що застосовуються у технологіях приготування сипких кормів. Дослідження показало, що кожен тип змішувального обладнання має свої конструктивні особливості, які визначають інтенсивність перемішування, енергоємність процесу та якість кінцевої суміші. Вертикальні змішувачі характеризуються відносною простотою конструкції, низькою енергоємністю та зручністю обслуговування, проте забезпечують довший час змішування і можуть мати меншу однорідність при роботі з компонентами різної густини. Горизонтальні шнекові та лопатеві змішувачі, навпаки, демонструють високу інтенсивність процесу, рівномірність руху продукту та можливість введення рідких добавок, що робить їх ефективними у виробництві комбікормів широкого асортименту. Барабанні змішувачі є найбільш щадним варіантом для крихких або волокнистих інгредієнтів, оскільки мінімізують руйнування частинок. Пневмомеханічні змішувачі забезпечують активне перемішування за рахунок повітряних потоків, що особливо ефективно при роботі з легкими, дрібнодисперсними матеріалами. Разом з тим, такі системи потребують точного регулювання та мають підвищені вимоги до герметичності та очищення.

## 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ КОРМІВ

### 2.1 Числова схема

Для дослідження різних процесів змішування частинок та визначення, чи призводить укрупнення частинок методом CGM до значних похибок у DEM-симуляціях, було проведено серію числових розрахунків. Точне відтворення поведінки частинок є критично важливим для достовірного моделювання ефективності змішування кормових компонентів. З цією метою використано метод дискретних елементів (DEM), який дозволяє відстежувати рух кожної окремої частинки з малим часовим кроком.

Усі моделювання виконано в програмному середовищі Star-CCM+. У DEM-моделюванні зменшення розміру частинок потребує пропорційного зменшення тривалості часових кроків для забезпечення числової стабільності. Крім того, збереження сталої маси матеріалу за умов зменшення розміру частинок призводить до експоненційного збільшення їх кількості, що створює надмірне обчислювальне навантаження.

Метод укрупнення частинок (Coarse-Grain Modeling, CGM) вирішує цю проблему завдяки зменшенню кількості частинок у моделі та відповідному зниженню обчислювальної складності. У цьому дослідженні було детально оцінено, як різні коефіцієнти укрупнення CGM впливають на точність DEM-моделювання змішування компонентів сипких кормів.

### 2.2 Метод дискретних елементів (DEM)

Метод дискретних елементів (DEM) – це числовий підхід для відстеження руху великої кількості окремих частинок. У DEM-моделюванні частинки зазнають

як контактних, так і неконтактних сил. Неконтактні сили (такі як сила тяжіння або опір навколишнього газового середовища) діють безперервно незалежно від зіткнень і переважно впливають на інерційний рух частинок. Натомість контактні сили виникають під час зіткнень і, як правило, розкладаються на нормальну та тангенціальну складові. Ці сили обчислюються ітеративно на кожному часовому кроці та відіграють ключову роль у дисипації енергії та формуванні траєкторій руху частинок усередині змішувача кормових компонентів.

У цьому дослідженні нормальні контактні сили моделювалися за допомогою моделі HLS, яка враховує еластопластичну поведінку під час зіткнення частинок. Модель HLS окремо визначає жорсткість під час завантаження (стискання) та жорсткість під час розвантаження (відновлення). Пластична деформація проявляється у вигляді залишкового перекриття частинок після розвантаження, а площа між кривими завантаження та розвантаження відповідає втратам енергії через внутрішнє тертя, тепло чи звук. На рисунку 2.1 показано залежність сили від перекриття, а її математичні формулювання наведено у рівняннях (2.1)–(2.6).

Для моделювання тангенціальних контактних сил застосовано модель LSCL, яка удосконалює базову модель тертя Кулона, включаючи ковзну жорсткість та тангенціальне перекриття. Класична модель Кулона визначає тангенціальну силу як добуток коефіцієнта тертя ( $\mu$ ) на нормальну силу ( $F_n$ ), при цьому ігнорує деформацію контактної зони та пружне відновлення. На відміну від неї, модель LSCL враховує тангенціальну жорсткість і точніше описує динамічну поведінку сил тертя. Концептуальну залежність перекриття та жорсткості подано на рисунку 2.2, а відповідні формули наведено в рівняннях (2.7)–(2.9).

Нормальна сила  $F_n^t$  у моделі HLS обчислюється залежно від того, чи зростає перекриття частинок ( $\Delta S_n \geq 0$ ), чи зменшується ( $\Delta S_n < 0$ ). Якщо перекриття збільшується, сила визначається за допомогою завантажувальної жорсткості  $F_n^1$ . Якщо перекриття зменшується, використовується розвантажувальна жорсткість  $F_n^2$  з мінімально допустимим значенням, визначеним демпфувальним параметром  $\gamma$ :

$$F_n^t = \min (K_n^l S_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_n^u \Delta S_n), \text{if } \Delta S_n \geq 0, \tag{2.1}$$

$$F_n^t = \max (F_n^{t-\Delta t} + K_n^u \Delta S_n, \gamma K_n^l S_n^t), \text{if } \Delta S_n < 0, \tag{2.2}$$

$$\Delta S_n = S_n^t - S_n^{\Delta t}. \tag{2.3}$$

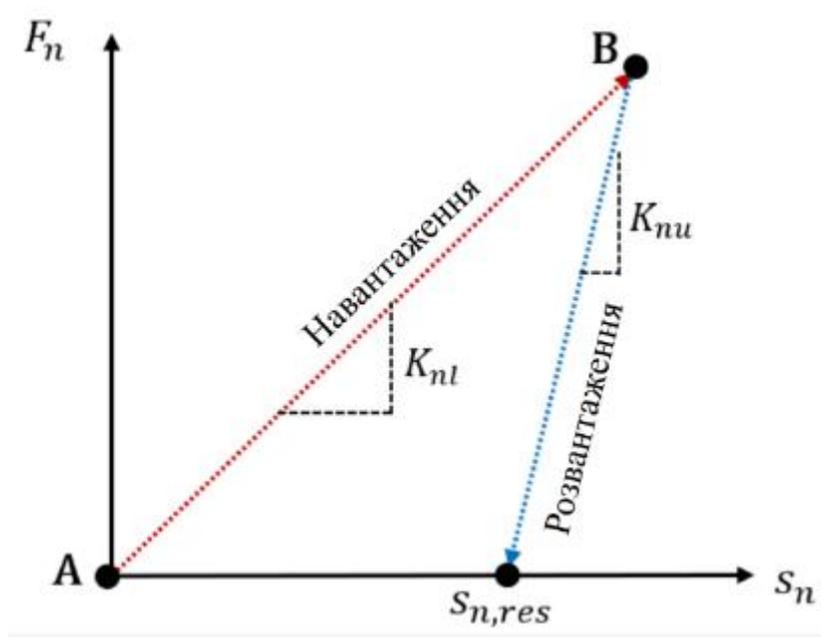


Рисунок 2.1 – Залежність між перекриттям та нормальною силою в моделі HLS

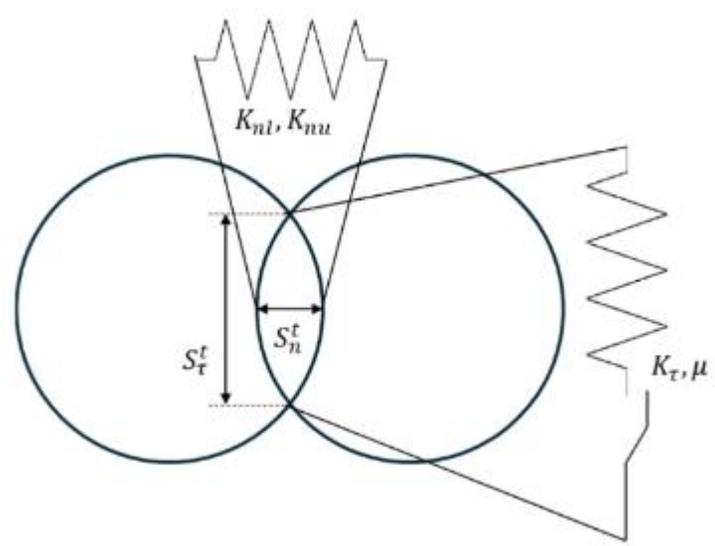


Рисунок 2.2 – Визначення перекриття та жорсткості

Параметри  $F_n^l$  і  $F_{nu}$  визначаються так:

$$\frac{1}{K_n^l} = \frac{1}{K_{n,p1}^l} + \frac{1}{K_{n,p2}^l}, \quad (2.4)$$

$$K_n^u = \frac{K_n^l}{\varepsilon^2}, \quad (2.5)$$

$$K_{n,p}^l = E_p L, \quad (2.6)$$

де  $K_{n,p1}^l$  та  $K_{n,p2}^l$  – жорсткості частинок,  $L$  – розмір частинки,  $E_p$  – модуль Юнга матеріалу частинки, а  $\varepsilon$  – коефіцієнт відновлення, що визначає збереження енергії під час зіткнення.

Тангенціальна сила у моделі LSCL обчислюється таким чином: спочатку визначається пружна складова тангенціальної сили із використанням ковзної жорсткості  $K_\tau$  та зміни тангенціального перекриття  $\Delta S_\tau$ ; потім ця сила обмежується кулонівським порогом  $\mu F_n$ :

$$F_\tau^t = \min(|F_{\tau,e}^t|, \mu F_n^t), \quad (2.7)$$

$$F_\tau^t = F_\tau^{t-\Delta t} - K_\tau \Delta S_\tau. \quad (2.8)$$

Ковзна жорсткість визначається через коефіцієнт співвідношення жорсткостей  $r_K$ :

$$K_T = r_K K_n^l. \quad (9)$$

Завдяки цим залежностям модель LSCL дозволяє більш точно описати розсіювання енергії та динаміку сил тертя при дотичних контактах частинок — що є особливо важливим для моделювання змішування компонентів сипких кормів із різними розмірами, щільністю та вологістю.

### 2.3 Метод укрупнення частинок (CGM)

Метод укрупнення частинок (Coarse-Grain Modeling, CGM) підвищує ефективність DEM-симуляцій завдяки зменшенню кількості частинок та

збільшенню дозволеного кроку інтегрування шляхом масштабування розмірів частинок. У моделюванні CGM група реальних частинок замінюється однією “укрупненою частинкою” (parcel particle), що дає змогу суттєво знизити обчислювальні витрати без втрати точності моделювання.

Основна ідея CGM полягає у збільшенні розміру частинок при збереженні макроскопічних властивостей сипкого середовища. Коефіцієнт укрупнення  $f_{CGM}$  визначають як відношення розміру укрупненої частинки до розміру реальної:

$$f_{CGM} = L_{parcel} / L_{real}, \quad (2.10)$$

де  $L_{real}$  – діаметр реальної частинки, а  $L_{parcel}$  – діаметр укрупненої частинки.

Для збереження динамічної подібності маса, жорсткість та контактні сили мають бути відповідно скориговані. Вони визначаються такими співвідношеннями:

$$m_{parcel} = f_{CGM}^3 m_{real}, \quad (2.11)$$

$$k_{parcel} = \frac{f_{CGM}}{k_{real}}, \quad (2.12)$$

$$F_{contact, parcel} = f_{CGM}^2 F_{contact, real}, \quad (2.13)$$

де  $m$  – маса частинки,  $k$  – її жорсткість, а  $F_{contact}$  – контактна сила. На рисунку 2.3 наведено концептуальну схему масштабування CGM.

CGM особливо корисний для великомасштабних DEM-моделювань, де аналіз реально дрібних частинок є обчислювально непосильним. У контексті моделювання виробництва сипких кормів це дозволяє відтворювати динаміку мільйонів частинок (зерно, премікси, мінерали) через меншу кількість укрупнених об’єктів при збереженні коректної поведінки системи.

Проте застосування CGM потребує ретельного порівняльного аналізу для забезпечення мінімальних похибок. У цьому дослідженні систематично оцінено застосовність та точність CGM у різних промислових змішувачах, щоб визначити ефективні стратегії масштабування для достовірних та обчислювально ефективних DEM-симуляцій змішування компонентів сипких кормів.

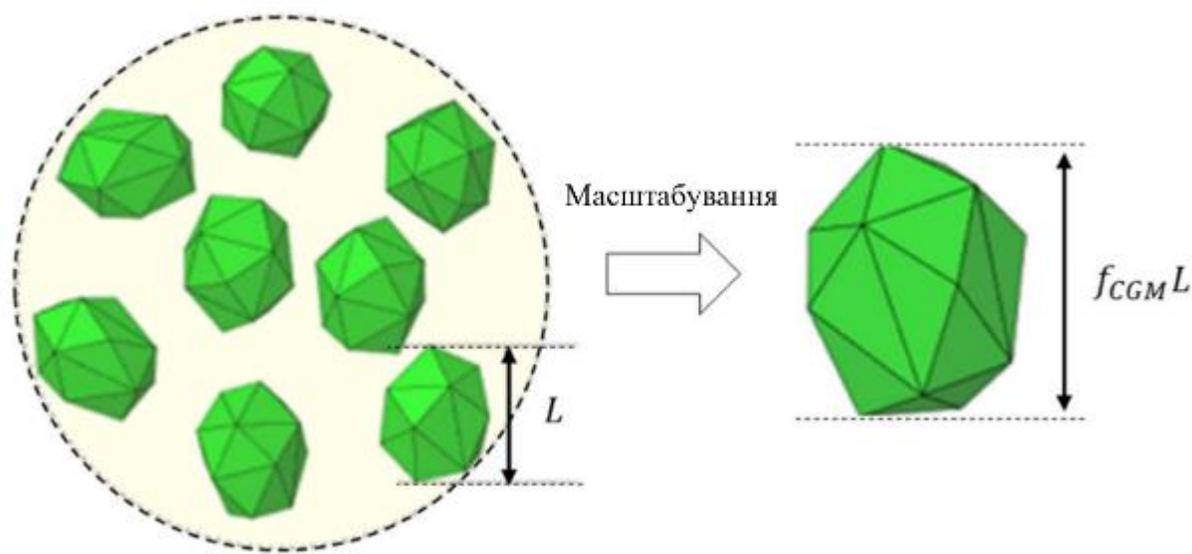


Рисунок 2.3 – Концептуальна схема методу укрупнення частинок (CGM)

## 2.4 Висновки з розділу

1. Визначено числову схему моделювання та обґрунтовано вибір методу дискретних елементів (DEM) як найбільш придатного інструмента для аналізу руху окремих частинок кормових компонентів. Показано, що пряме моделювання реальних дрібних частинок потребує значних обчислювальних ресурсів через високі вимоги до розміру часових кроків та різке зростання кількості частинок. Це обумовлює необхідність застосування методів укрупнення.

2. Детально розглянуто фізичні моделі контактної взаємодії частинок. Нормальні сили описано моделлю HLS, яка враховує еластичні та пластичні деформації, а також дисипацію енергії. Тангенціальні сили розраховані за моделлю LSCL, що дозволяє значно точніше відтворювати процеси тертя та ковзання частинок порівняно з класичною моделлю Кулона. Використання цих моделей забезпечує реалістичний опис механіки частинок у змішувачі та дозволяє коректно прогнозувати інтенсивність змішування, напрямки потоків та процеси переміщення фракцій різного розміру.

3. Розглянуто метод укрупнення частинок (CGM), який суттєво зменшує обчислювальну складність DEM-розрахунків. Наведено основні співвідношення масштабування маси, жорсткості та контактних сил, що забезпечують динамічну подібність між реальною системою та DEM-моделлю. Показано, що CGM є ефективним підходом для моделювання промислових змішувачів з великою кількістю частинок, проте його застосування потребує перевірки похибок для різних значень коефіцієнта укрупнення.

## 3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ КОРМІВ

### 3.1 Вибір змішувальних процесів

Для перевірки ефективності числового моделювання із застосуванням укрупнених частинок у DEM-симуляціях було обрано п'ять репрезентативних методів змішування, кожен із характерними конструктивними та динамічними особливостями. Ці процеси широко застосовуються в різних галузях промисловості й охоплюють основні типи механізмів перемішування, що також є типовими для виробництва сипких кормів.

*V-подібний барабанний змішувач.* Барабанний змішувач (tumbling mixer) являє собою порожнисту ємність, частково заповнену порошками або гранулами, яка обертається навколо горизонтальної осі (рисунок 3.1). Під час обертання матеріал постійно піднімається та опускається, що забезпечує інтенсивне перемішування й рівномірний розподіл компонентів кормової суміші.

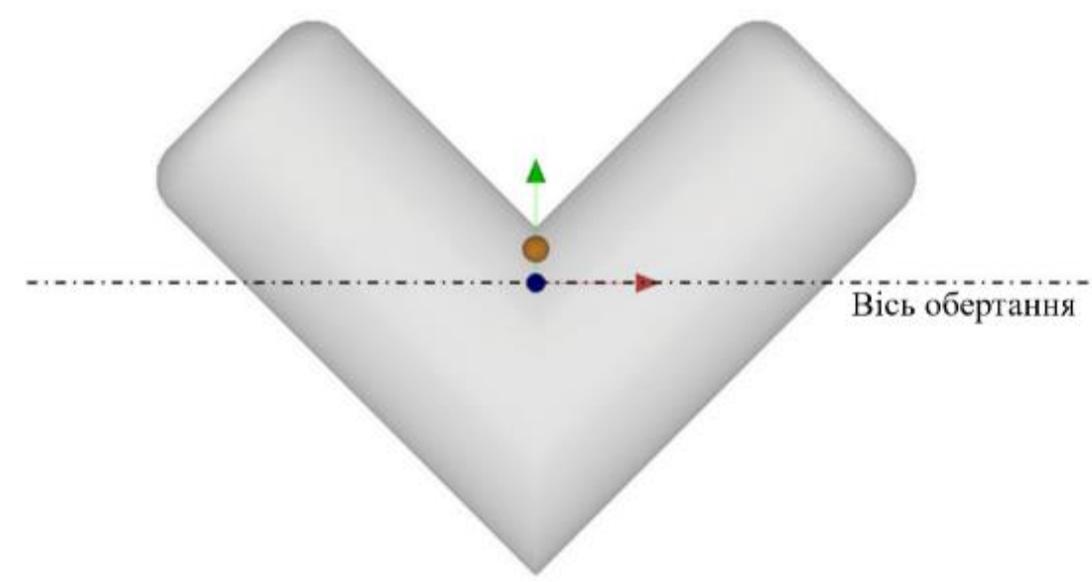


Рисунок 3.1 – V-подібний обертовий змішувач

Швидкість обертання має значний вплив на ефективність змішування. Низькі швидкості забезпечують м'який режим з мінімальним руйнуванням частинок, але потребують довшого часу змішування. Вищі швидкості прискорюють процес, однак можуть спричинити деградацію частинок або розшарування. Надмірно високі швидкості призводять до виникнення центрифугального ефекту: матеріал притискається до стінок камери, що погіршує змішування й знижує якість перемішування компонентів.

V-подібні барабанні змішувачі широко застосовуються у фармацевтичній, хімічній, харчовій та комбікормовій промисловості завдяки простоті конструкції, низькій енергоємності та високій доступності.

У цьому дослідженні для моделювання використано V-подібний змішувач із циліндричною камерою діаметром 600 мм та висотою 1400 мм, що працює зі швидкістю 10 об/хв. Ефективність змішування оцінювалася при різних коефіцієнтах укрупнення SGM для визначення впливу масштабування частинок на точність DEM-симуляцій.

*Стрічковий змішувач (Ribbon-Blade Mixer)*. Стрічковий змішувач оснащений горизонтальним обертовим валом зі спіральними стрічковими лопатями (рисунки 3.2), які забезпечують одночасний аксіальний і радіальний рух матеріалу, створюючи інтенсивні конвективні потоки. Взаємодія внутрішніх та зовнішніх стрічок формує складний режим перемішування, що сприяє швидкому та рівномірному розподілу компонентів сипких кормів.

Геометрія лопатей суттєво впливає на ефективність змішування та може бути адаптована до конкретних властивостей матеріалу – гранулометричного складу, щільності, крихкості та вмісту мікродомішок. Стрічкові змішувачі широко використовуються у фармацевтичній, хімічній, пластмасовій та аграрній промисловості, а також у виробництві комбікормів, преміксів і мінеральних добавок.

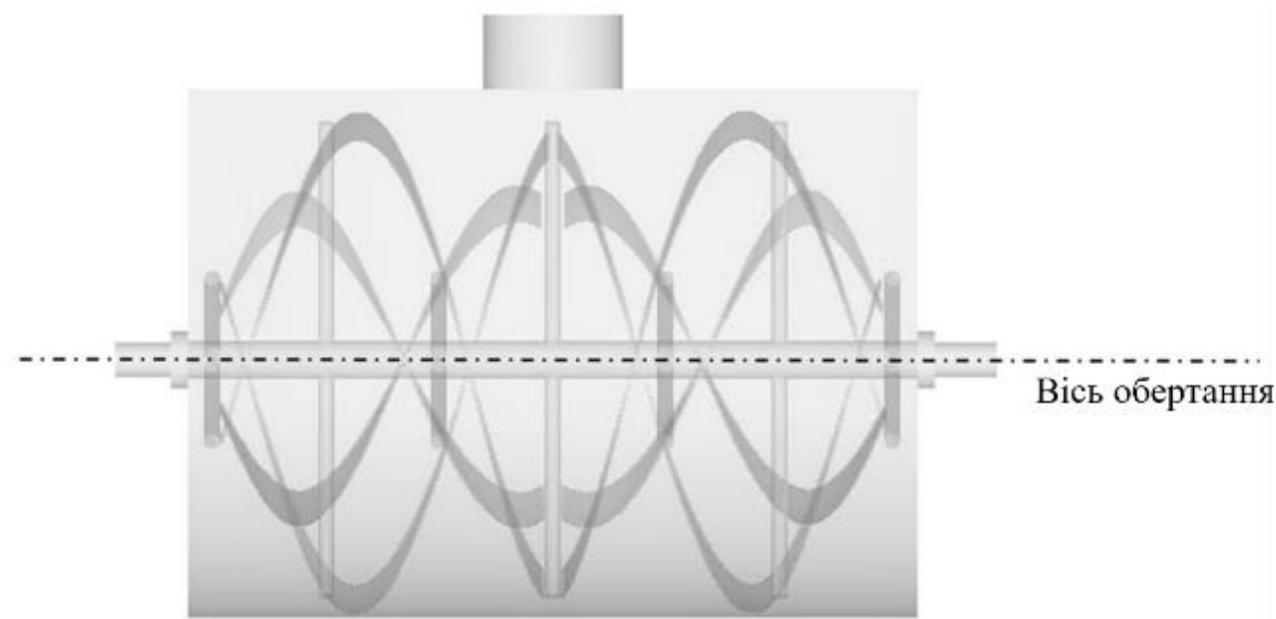


Рисунок 3.2 – Стрічково-лопатевий змішувач

До того ж їх конструкція дозволяє проводити супутні технологічні операції, такі як нагрівання, охолодження, сушіння та нанесення покриттів на частинки кормових компонентів.

У даному дослідженні використано стрічковий змішувач діаметром 1100 мм і довжиною 1500 мм, у якому стрічкові лопаті обертаються зі швидкістю 42 об/хв. Модель застосовувалася для оцінки ефективності змішування за різних значень коефіцієнта укрупнення CGM.

*Лопатевий змішувач (Paddle-Blade Mixer).* Лопатевий змішувач використовує систему обертових лопатей, які піднімають, перекидають і циркулюють матеріал, забезпечуючи рівномірне перемішування (рисунок 3.3). На відміну від стрічкових змішувачів, що оптимізовані переважно для сухих порошоків, лопатеві змішувачі ефективно працюють із сумішами підвищеної вологості, суспензіями та матеріалами, які потребують безперервного перемішування.

Конфігурація лопатей може гнучко змінюватися відповідно до властивостей матеріалу – щільності, клейкості, вмісту рідких компонентів або структури гранул.

Це дозволяє підвищити ефективність змішування в системах, де необхідно забезпечити делікатне, але інтенсивне перемішування, наприклад під час обробки зволжених кормових сумішей, білкових концентратів або сирих інгредієнтів зі схильністю до злипання.

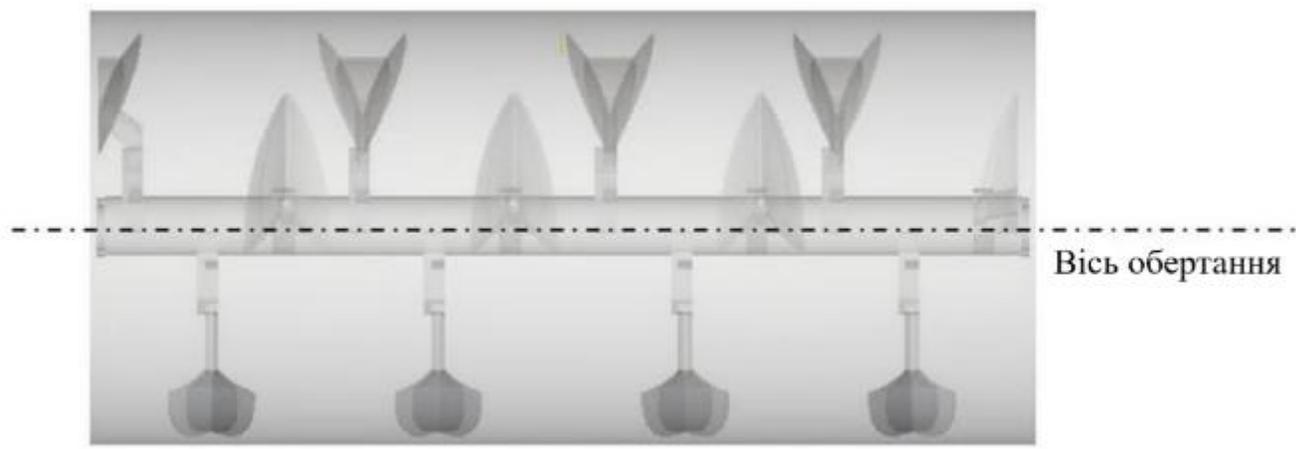


Рисунок 3.3 – Лопатевий змішувач

У цьому дослідженні використано лопатевий змішувач діаметром 960 мм та довжиною 2100 мм, у якому лопаті обертаються зі швидкістю 30 об/хв. Змішувач застосовувався для оцінки роботи системи за різних коефіцієнтів укрупнення SGM з метою вивчення точності DEM-моделювання для складних багатофазних кормових сумішей.

*Вертикальний лопатевий змішувач (Vertical-Blade Mixer).* Вертикальні лопатеві змішувачі використовують високошвидкісні вертикально орієнтовані лопаті, що забезпечують інтенсивне перемішування за знижених енерговитрат у порівнянні з іншими типами обладнання (рисунок 3.4). Такі змішувачі особливо ефективні для матеріалів із підвищеною в'язкістю або у процесах, де змішування поєднується зі зменшенням розміру частинок.

У промисловості вертикальні лопатеві змішувачі застосовуються під час змішування активних катодних матеріалів із зв'язувальними компонентами у

виробництві батарей, а також у хімічній, харчовій, фармацевтичній, косметичній та клейовій промисловості. У виробництві кормів такі змішувачі використовують для обробки вологих, в'язких та складних за структурою матеріалів – наприклад, білково-вітамінних паст, напіввологих кормових заготівель, преміксів із додаванням рідин або жирових компонентів.

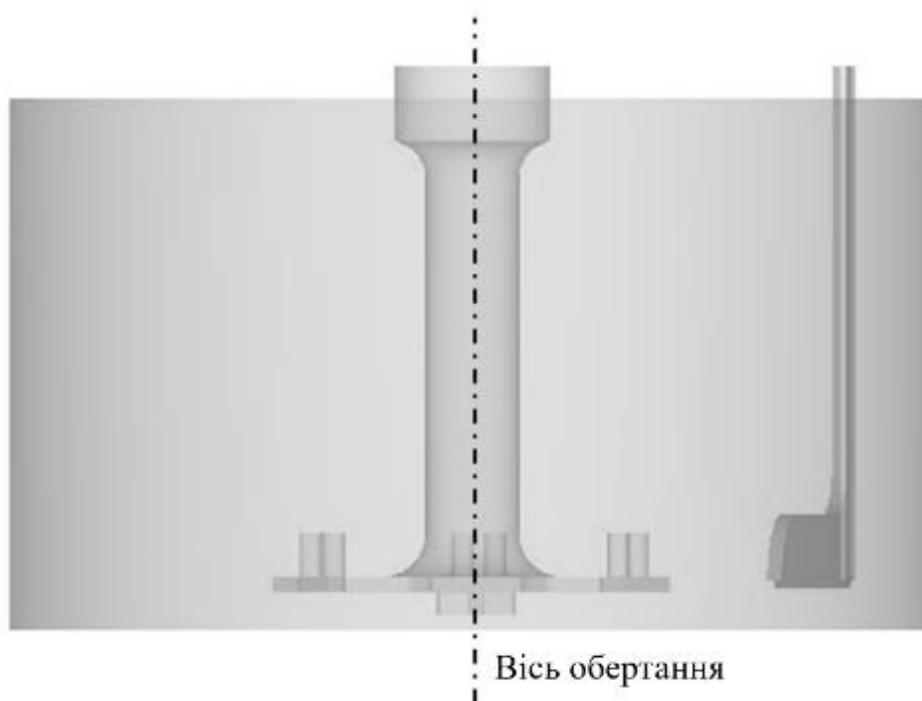


Рисунок 3.4 – Вертикальний лопатевий змішувач

Щоб мінімізувати налипання матеріалу на стінки, конструкції цього типу часто обладнують стаціонарними шкребками, що очищають внутрішню поверхню змішувальної камери.

У цьому дослідженні використано вертикальний лопатевий змішувач із однією вертикальною лопаттю та стаціонарним шкребком. Змішування відбувається у камері діаметром 750 мм і висотою 430 мм. Обертання контейнера становить 15,38 об/хв, тоді як лопать обертається зі швидкістю 225 об/хв. Модель застосовувалася

для оцінки ефективності змішування за різних коефіцієнтів укрупнення CGM, особливо у випадках обробки в'язких та неоднорідних кормових сумішей.

*Конічно-гвинтовий змішувач (Conical-Screw Mixer).* Конічно-гвинтовий змішувач складається зі стаціонарної конічної камери та пари гвинтових елементів, що обертаються навколо осі змішувача, забезпечуючи інтенсивне перемішування матеріалу (рисунок 3.5). Така геометрія сприяє майже повному вивантаженню продукту після завершення змішування, мінімізуючи залишки матеріалу та зменшуючи втрати сировини.

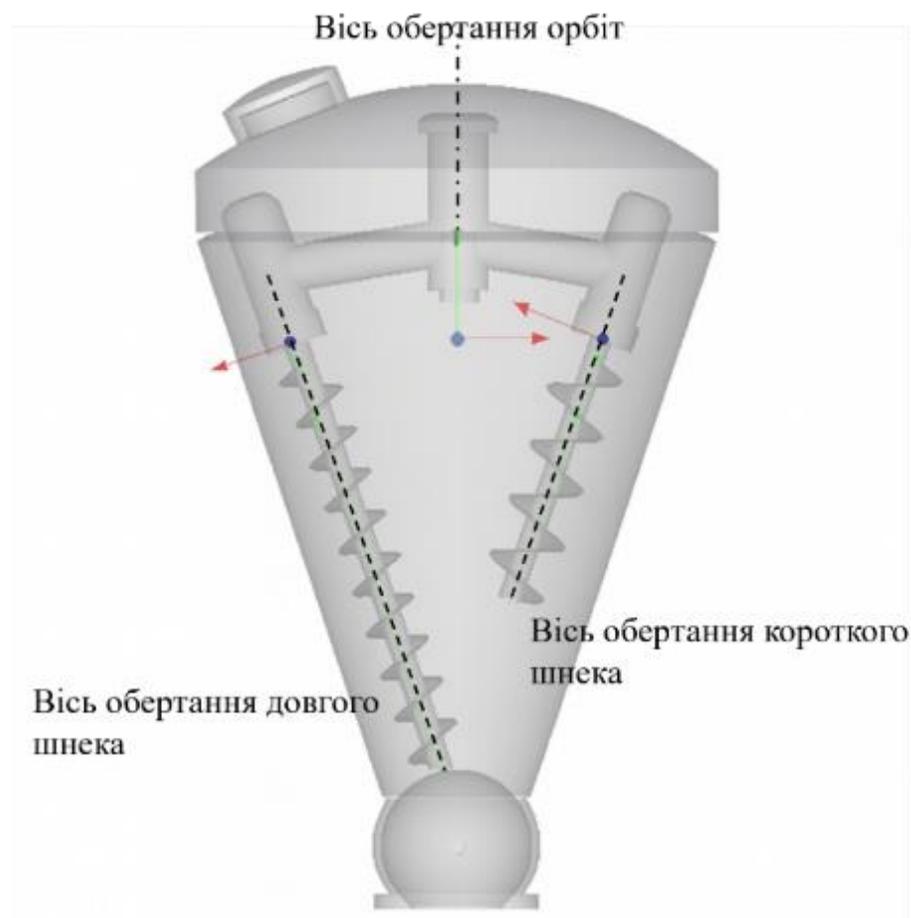


Рисунок 3.5 – Конічно-гвинтовий змішувач

Ще однією важливою перевагою є низький рівень механічного зношування: внутрішні робочі елементи рідко безпосередньо контактують із матеріалом, що особливо корисно при роботі з абразивними частинками, мінеральними добавками та преміксами у виробництві сипких кормів. Водночас така конструкція має і певні недоліки: складність очищення, ризик перенесення матеріалу між партіями та високі капітальні витрати, зумовлені конструктивною складністю приводу.

Конічно-гвинтові змішувачі широко застосовують у хімічній, нафтохімічній, фармацевтичній, харчовій та полімерній промисловості. У виробництві кормів вони особливо корисні для змішування делікатних компонентів, мікродомішок, термочутливих інгредієнтів та сумішей з великою різницею у густині фракцій.

У цьому дослідженні використано конічно-гвинтовий змішувач з верхнім діаметром 1700 мм, нижнім діаметром 500 мм та висотою 1700 мм. Центральне коромисло гвинтової системи обертається зі швидкістю 4 об/хв, тоді як кожен окремий гвинт обертається навколо власної осі зі швидкістю 57 об/хв. Ця модель використовувалася для аналізу впливу різних коефіцієнтів укрупнення CGM на точність DEM-моделювання процесів змішування кормових компонентів.

### **3.2 Моделювання частинок**

Усі частинки в моделі були представлені у вигляді сфер, що дозволило ізолювати вплив масштабування CGM та забезпечити повну узгодженість між різними конфігураціями змішувальних систем. Хоча Star-CCM+ підтримує моделювання неспеціфічних (несферичних) форм частинок, використання складної геометрії значно збільшує обчислювальні витрати, особливо у великомасштабних або високоточних симуляціях.

Коли діаметр частинок значно менший за характерні розміри змішувального обладнання (наприклад, частинки розміром у мікрони чи міліметри в камері, що має метри в діаметрі), вплив форми частинки на макроскопічну поведінку суміші

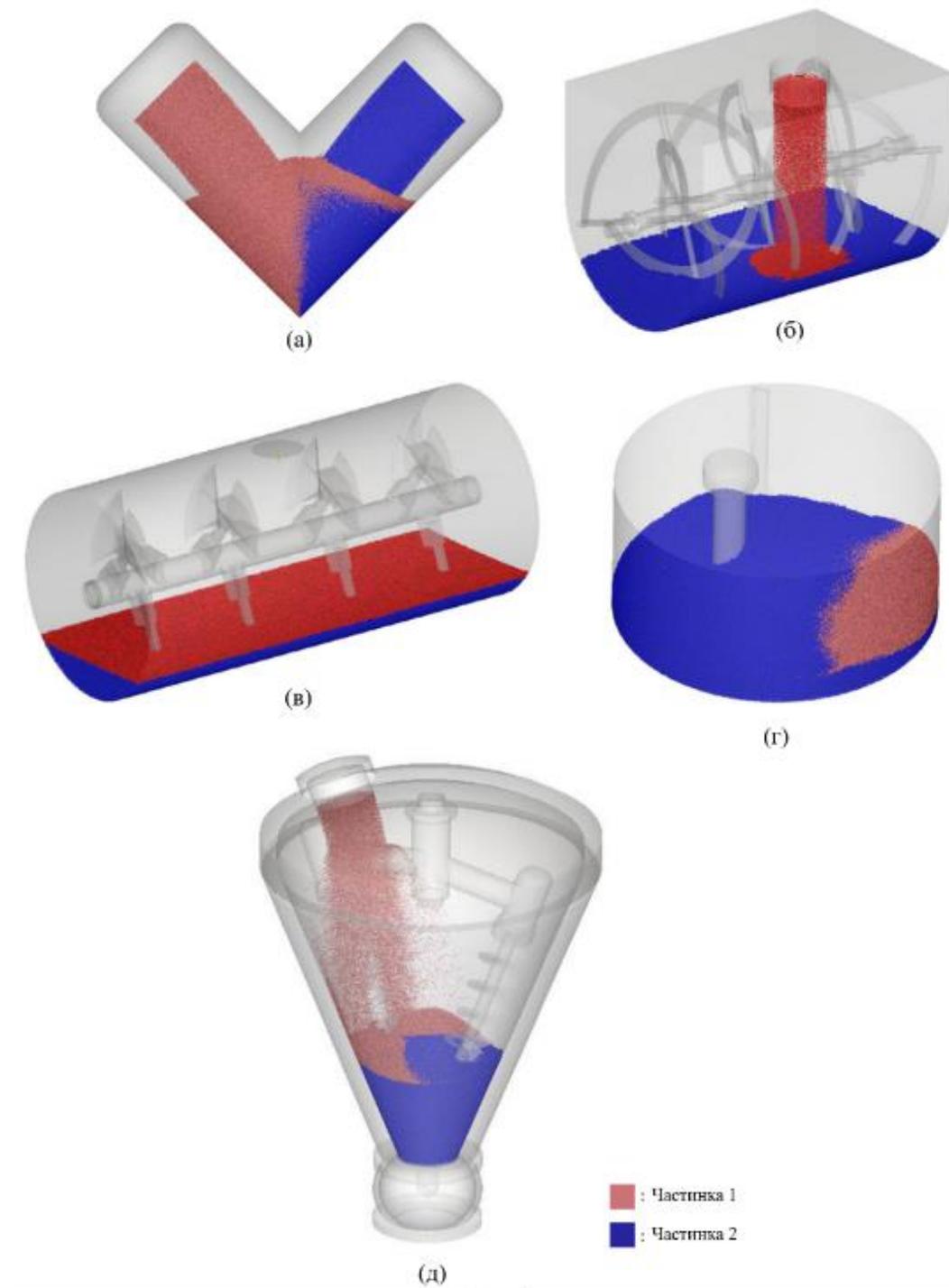
зазвичай вважається незначним. Це особливо справедливо тоді, коли рівномірність змішування оцінюється статистичними індексами, такими як індекс змішування Лейсі (LMI). Така спрощена модель дала змогу зосередитись на аналізі придатності CGM та оцінці можливого приросту ефективності обчислень.

Проте у реальних промислових умовах частинки компонентів кормів можуть мати дуже нерегулярну форму – наприклад, подрібнене зерно, шроти, мінеральні добавки, премікси та волокнисті фракції. Повне геометричне відтворення таких форм у DEM-моделюванні є вкрай ресурсомістким і практично недоцільним для масштабних задач.

Однак, якщо моделювання застосовується для високоточного порівняння з експериментальними даними або для кількісної оцінки конкретного обладнання, включення реалістичної геометрії частинок може стати необхідним. У таких випадках застосування CGM стає ще важливішим: завдяки зменшенню кількості частинок воно дозволяє моделювати складні за формою системи із прийнятною продуктивністю та без суттєвих втрат фізичної точності. Таким чином, поєднання CGM із моделюванням реалістичних форм частинок є перспективним напрямом майбутніх досліджень, особливо для задач, які мають на меті об'єднати симуляцію та експеримент у промислових процесах змішування сипких кормів.

Для забезпечення однорідності симуляцій у кожному змішуванні застосовано двокомпонентну систему частинок. Хоча у промислових умовах зазвичай присутні різнотипні частинки (зернові, мінеральні, білкові, мікродомішки), у даному дослідженні всі частинки були змодельовані з однаковими матеріальними властивостями, щоб уникнути впливу різниць у фізичних параметрах. У таблиці 3.1 наведено фізичні властивості обох типів частинок, використаних у всіх симуляціях.

Розміри та загальна маса частинок були адаптовані відповідно до характеристик кожного змішувального процесу, щоб максимізувати обчислювальну ефективність. Таблиця 3.2 узагальнює ці параметри, а на рисунку 3.6 показано початковий просторовий розподіл частинок перед початком процесу змішування.



а – V-подібний обертовий змішувач; б – стрічково-лопатевий змішувач;  
в – лопатевий змішувач; г – вертикальний лопатевий змішувач; д – конічно-  
гвинтовий змішувач

Рисунок 3.6 – Початковий просторовий розподіл частинок 1 і 2 перед змішуванням

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні властивості частинок

Властивість	Частинка 1	Частинка 2
Густина насипна (кг/м <sup>3</sup> )	1900	1050
Модуль Юнга матеріалу (Н/м <sup>2</sup> )	$5 \times 10^7$	$5 \times 10^7$
Коефіцієнт тертя	0,2	0,2
Коефіцієнт реституції	0,3	0,3

Таблиця 3.2 – Розміри та маси частинок для кожного процесу змішування

Тип змішувача	Діаметр частинки 1 (мм)	Діаметр частинки 2 (мм)	Маса частинки 1 (кг)	Маса частинки 2 (кг)
V-подібний барабанний змішувач	3	6	180	100
Стрічковий змішувач	2	4	11	110
Лопатевий змішувач	2	4	84	185
Вертикальний лопатевий змішувач	1	2	3	75
Конічно-гвинтовий змішувач	2	4	200	250

### 3.3 Індекс змішування Лейсі (LMI)

У цьому дослідженні для оцінки однорідності змішування частинок використовувався індекс змішування Лейсі (Lacey Mixing Index, LMI), який є одним із найпоширеніших статистичних показників у дослідженнях порошкових та гранульованих систем. LMI визначається за формулою:

$$LMI = \frac{S_0^2 - S^2}{S_0^2 - S_R^2}, \quad (4.1)$$

де

$$S_0^2 = \omega_{system}(1 - \omega_{system}), \quad (4.2)$$

$$S_R^2 = \omega_{system}(1 - \omega_{system}) \frac{1}{n}, \quad (4.3)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^2, \quad (4.4)$$

$$\omega_i = \frac{m_{Additive,i}}{m_{Additive,i} + m_{MainProduct,i}}. \quad (4.5)$$

де  $S_0^2$  – дисперсія для повністю сегрегованого стану,

$S^2$  – дисперсія для поточного стану змішування,

$S_R^2$  – дисперсія для випадкової суміші,

$\bar{\omega}$  – середня масова частка домішки,

$\omega_i$  – локальна масова частка домішки в  $i$ -й комірці,

$n$  – середня кількість частинок у комірці,

$m_{Additive,i}$  – маса домішки (наприклад, преміксу) у комірці,

$m_{MainProduct,i}$  – маса основного кормового компоненту у комірці.

Значення ЛМІ лежить у межах від 0 до 1, де:

0 – повна сегрегація (змішування не відбулося),

1 – ідеальне змішування (частинки розподілені рівномірно по всій системі).

Фізичний зміст та обмеження ЛМІ

Метод Лейсі є кількісним підходом до оцінки ефективності змішування, однак його значення слід інтерпретувати обережно. ЛМІ залежить від:

- розміру комірок,
- способу дискретизації простору,
- локальної кількості частинок.

Через це можливі розбіжності між розрахунковими значеннями та фактичним станом змішування [30].

У системах з сильно нерівномірним співвідношенням компонентів або на початкових етапах змішування ЛМІ може:

- перевищувати 1,

- набувати від’ємних значень, що потребує ретельного тлумачення.

За певних значень коефіцієнта укрупнення CGM у перші секунди змішування може спостерігатися негативний LMI. Це не є фізичним ефектом, а є наслідком статистичного артефакту.

Таке виникає, коли:

- спостережувана дисперсія концентрацій у комірках перевищує теоретичну дисперсію випадкової суміші,
- кількість частинок у комірці недостатня для достовірних оцінок,
- початкова конфігурація має сильну сегрегацію.

Щоб мінімізувати статистичний шум, із розрахунків виключали комірки, що містили менше 10 частинок. Це забезпечило достовірність оцінки ступеня змішування.

Значення LMI обчислювалися на основі просторової дискретизації змішувального об’єму, поділеного на рівні кубічні комірки. Такий підхід дав змогу точно оцінити:

- локальний розподіл частинок,
- рівномірність змішування в різних зонах змішувача,
- вплив конструкції обладнання на якість змішування.

### **3.4 Визначення зон відбору проб для розрахунку LMI**

Для кількісної оцінки однорідності змішування за допомогою індексу LMI внутрішній об’єм кожної змішувальної системи було дискретизовано на рівні кубічні комірки. Такий поділ дозволив вимірювати локальний склад частинок, що є необхідним для обчислення статистичної дисперсії, яка лежить в основі формул LMI.

Внутрішній простір кожного змішувача був рівномірно поділений на кубічні комірки однакового розміру, що забезпечило однакову просторову роздільність при аналізі. Розмір комірок визначався з урахуванням геометричних особливостей

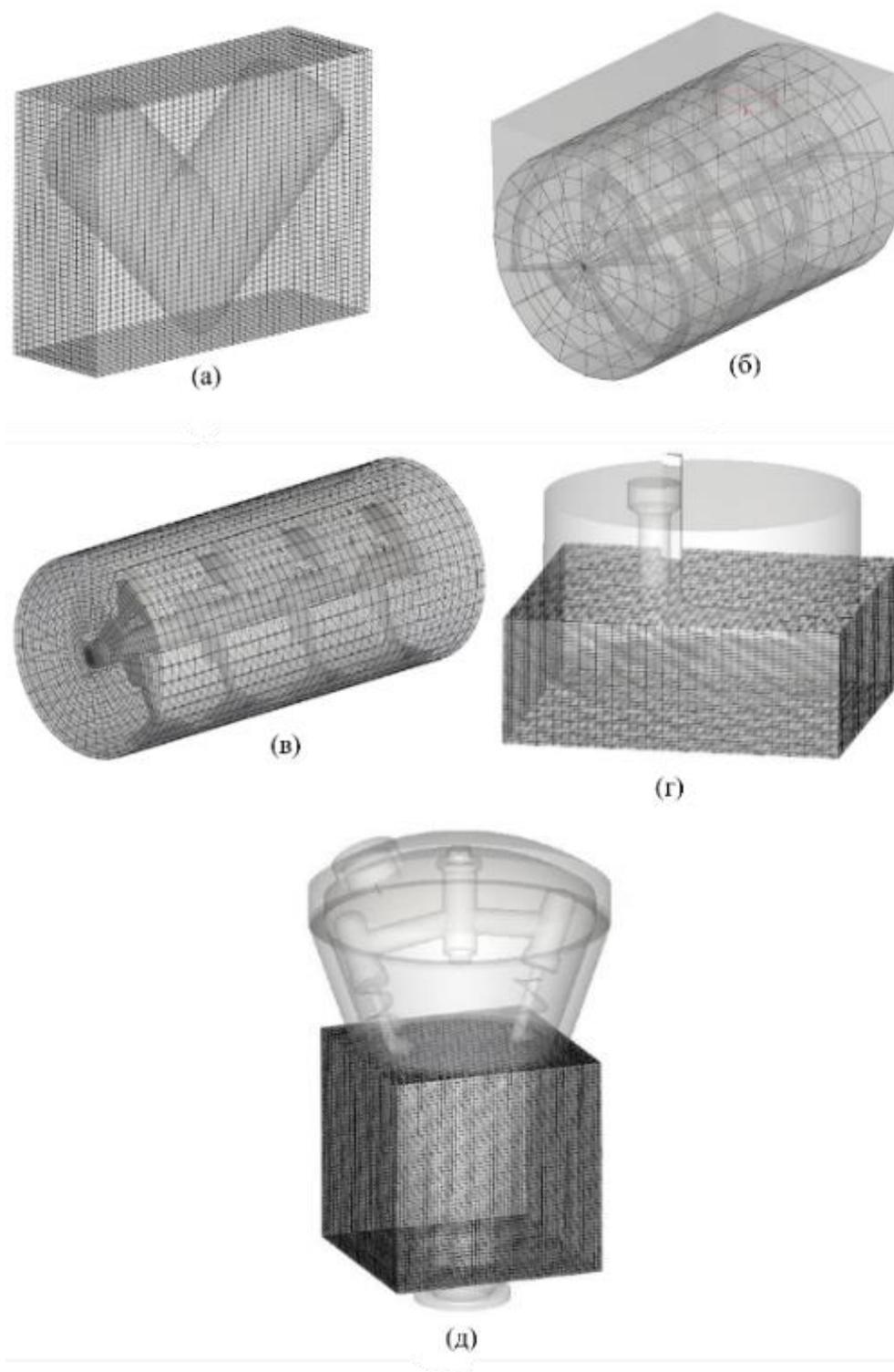
кожного змішувача, забезпечуючи баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Як зазначалося раніше, у фінальний розрахунок дисперсій включалися лише ті комірки, які під час періоду аналізу містили понад 10 частинок. Цей поріг дозволив виключити малонаселені області, які могли б створювати статистичний шум і спотворювати значення LMI. На рисунку 3.7 наведено приклади просторового поділу змішувального об'єму. Усі комірки на цих схемах мають однаковий розмір і відображають початкові зони відбору проб до застосування фільтрації.

Описану процедуру просторового поділу та подальшого відбору було рівномірно застосовано до всіх п'яти змішувальних процесів, що забезпечило коректну порівнянність результатів та статистичну надійність при оцінюванні ефективності змішування. На рисунку 3.8 подано зони відбору проб після фільтрації, де залишено лише ті комірки, які задовольняли вимогу щодо мінімальної кількості частинок. Такий підхід гарантує, що значення LMI відображають реальний перебіг змішування, а не вплив статистично некоректних, недостатньо заповнених областей.

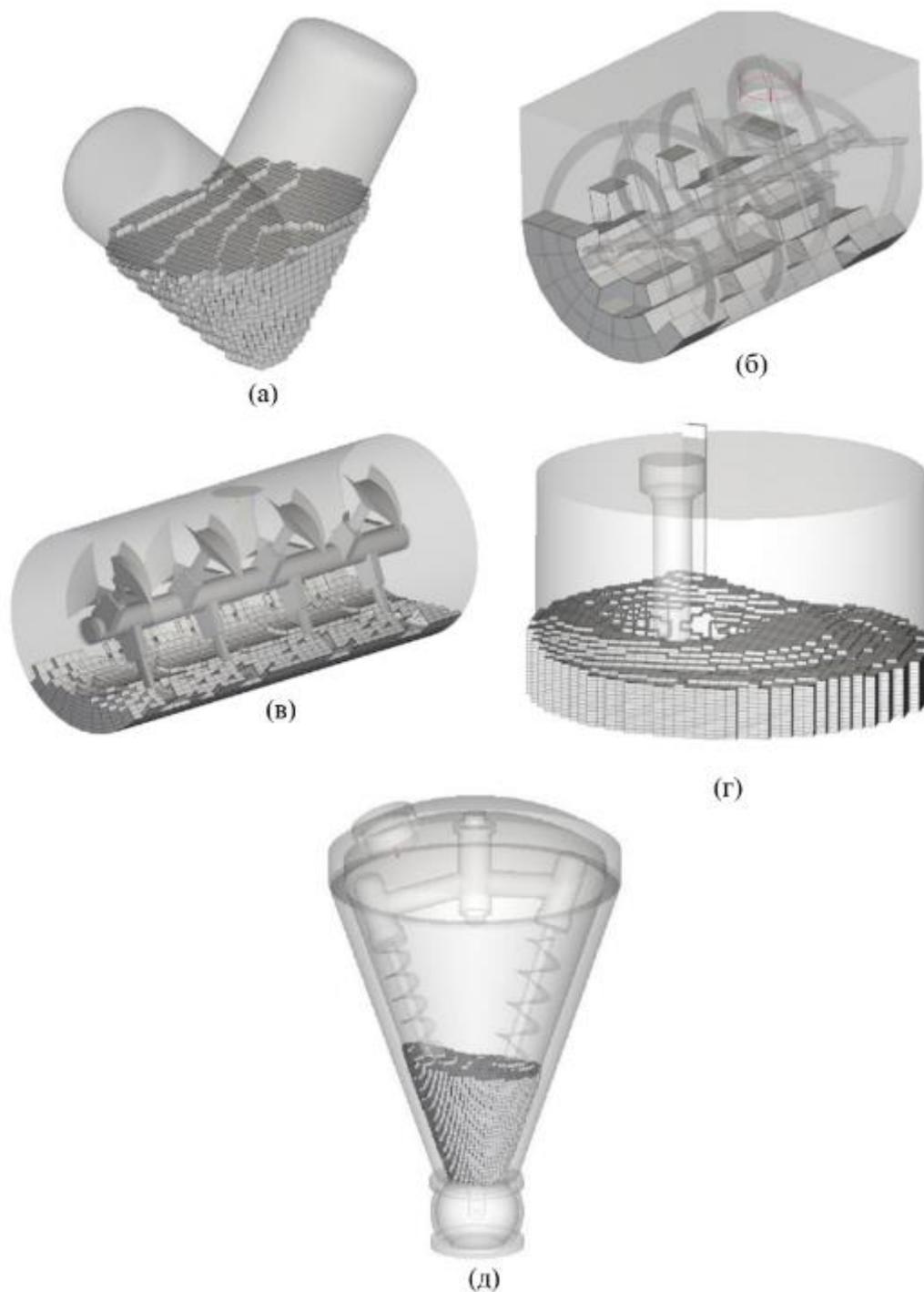
Щоб забезпечити коректність статистичної оцінки за різних значень коефіцієнта укрупнення CGM, розмір комірок для просторової дискретизації коригувався відповідно до збільшення розміру частинок. У випадках, коли розмір частинок збільшувався, надто дрібний поділ призводив би до того, що багато комірок містили надто мало частинок, що знижувало б надійність розрахунку LMI. Тому розмір комірок масштабували так, щоб більшість з них містили понад 10 частинок – відповідно до заданого порогу для включення в обчислення LMI.

Попри те що розміри комірок відрізнялися між різними сценаріями, загальна маса частинок, врахована під час оцінки LMI, залишалась сталою, що забезпечило коректність порівнянь між експериментами. Хоча формального аналізу чутливості не проводили, запропонована стратегія вибору зон відбору проб була спрямована на мінімізацію числових артефактів та забезпечення достовірності оцінок змішування за індексом LMI.



а – V-подібний обертовий змішувач; б – стрічково-лопатевий змішувач; в – лопатевий змішувач; г – вертикальний лопатевий змішувач; д – конічно-гвинтовий змішувач

Рисунок 3.7 – Рівномірний поділ змішувального об'єму на комірки



а – V-подібний обертовий змішувач; б – стрічково-лопатевий змішувач; в – лопатевий змішувач; г – вертикальний лопатевий змішувач; д – конічно-гвинтовий змішувач

Рисунок 3.8 – Зони вибірки, що задовольняють порогу кількості частинок (>10 частинок у комірці)

Вплив просторової роздільності та розміру комірок на точність обчислення LMI визнається важливим фактором і буде предметом подальших досліджень.

### 3.5 Висновки з розділу

1. Проведено комплексне чисельне моделювання процесів змішування сипких кормів із використанням методу дискретних елементів (DEM) та підходу укрупнення частинок (CGM), що дозволило дослідити особливості роботи різних типів промислових змішувачів і визначити вплив масштабування на точність та ефективність симуляцій. Для порівняльного аналізу були обрані п'ять характерних змішувальних систем – V-подібний барабанний, стрічково-лопатевий, лопатевий, вертикальний лопатевий і конічно-гвинтовий змішувачі, які охоплюють основний спектр технологічних рішень, що застосовуються у виробництві комбікормів та преміксів. Створення уніфікованої DEM-моделі, в якій усі частинки представлені у вигляді сфер, дало змогу ізолювати вплив коефіцієнта укрупнення CGM, мінімізувати обчислювальні витрати та забезпечити коректність порівняння між різними конфігураціями змішувачів.

2. Усі змішувальні системи моделювалися у двокомпонентному середовищі з однаковими фізико-механічними властивостями частинок, що дозволило уникнути впливу міжфазних відмінностей і зосередитися саме на динаміці перемішування. Для кожного змішувача було підібрано відповідні розміри та маси частинок, які відповідають реальним технологічним умовам. Початковий просторовий розподіл частинок був створений таким чином, щоб забезпечити чітко виражену сегрегацію компонентів – це дозволило адекватно оцінити інтенсивність і швидкість змішування.

3. Для кількісного аналізу однорідності змішування застосовано індекс змішування Лейсі (LMI), який дав змогу оцінити зміну рівномірності розподілу частинок у часі. Простір кожного змішувача був дискретизований на рівні кубічні

комірки, що забезпечило деталізований аналіз локальних концентрацій компонентів. Враховано також особливості статистичної нестійкості LMI на ранніх етапах змішування та при підвищених значеннях CGM, що може приводити до появи від'ємних або аномально високих значень індексу. Для зниження впливу статистичного шуму з аналізу виключалися комірки з кількістю частинок менше 10, що суттєво підвищило достовірність отриманих результатів.

4. Розроблена методика моделювання, що поєднує DEM-аналіз, укрупнення частинок CGM та оцінку ефективності за індексом Лейсі, забезпечила можливість комплексного порівняння різних змішувальних систем за однакових умов. Результати моделювання створили основу для подальшої оцінки впливу коефіцієнта укрупнення, визначення допустимих меж застосування CGM та встановлення типів змішувачів, у яких масштабування частинок найменше знижує точність прогнозування. Таким чином, проведений аналіз є важливим етапом у створенні ефективних методик чисельного моделювання змішування сипких кормів та формує наукове підґрунтя для оптимізації конструкцій і режимів роботи промислових змішувачів.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ КОРМІВ

### 4.1 Аналіз ефективності змішування у V-подібному барабанному змішувачі

Було проаналізовано вплив різних коефіцієнтів укрупнення CGM на ефективність змішування у V-подібному барабанному змішувачі, використовуючи результати DEM-симуляцій. Моделювання виконували за шістьма значеннями CGM: CGM = 1, 2, 3, 4, 5 та 7. Для кожного сценарію оцінювали часову зміну індексу LMI та еволюцію розподілу частинок у змішувачі.

На рисунку 4.1 показано часову еволюцію значень LMI для всіх варіантів CGM. Хоча абсолютні значення LMI відрізнялися між рівнями масштабування, загальна форма кривих була подібною. Особливо помітно, що різниця між CGM-варіантами зменшувалася з часом, що свідчить про збіжність поведінки системи у міру перебігу процесу змішування. Хоча моделювання завершувалося до моменту досягнення повної однорідності, можна припустити, що за продовження симуляції після 30 с відхилення між CGM-рівнями й надалі зменшувалося б.

На рисунку 4.2 наведено розподіли частинок у характерні моменти часу для всіх CGM-сценаріїв. В усіх випадках макроскопічні картини змішування візуально були однаковими, що вказує на те, що укрупнення частинок не змінює загальних механізмів змішування. Проте симуляції з меншим значенням CGM (наприклад, CGM = 1) демонстрували більш гладке й детальне зображення інтерфейсу змішування, подібне до високої роздільності. Зі збільшенням CGM-фактора візуальна деталізація зменшувалася через грубіший «пікселізований» вигляд частинок, хоча загальні режими змішування залишалися незмінними.

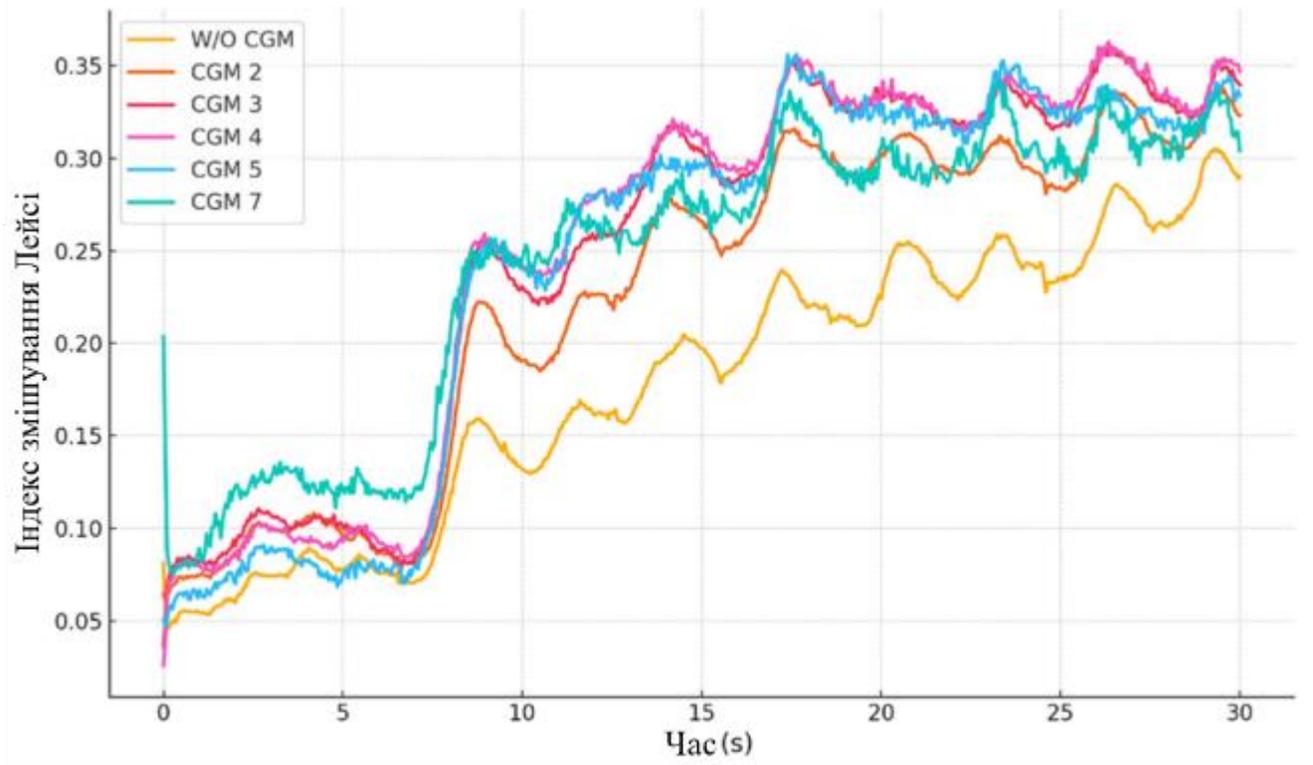


Рисунок 4.1 – Часова еволюція індексу LMI для V-подібного змішувача

У таблиці 4.1 наведено статистичні показники індексу LMI (середнє, максимальне, мінімальне значення) за останню секунду симуляції (29–30 с), а також загальну кількість частинок, час обчислення та відсоткову похибку. Результати демонструють, що збільшення коефіцієнта CGM дозволяє зменшити тривалість симуляції більш ніж у 100 разів, при цьому зберігаючи похибку в межах прийнятних значень. Можна передбачити, що подовження симуляції ще більше зменшило б похибку, що підкреслює практичну доцільність CGM у великомасштабних DEM-моделях.

У таблиці 4.1 похибка визначена як абсолютна різниця між середнім значенням LMI для кожного CGM-випадку та базового неукрупненого варіанта ( $CGM = 1$ ), поділена на його значення та виражена у відсотках. Це визначення застосовується у всіх наступних підрозділах.

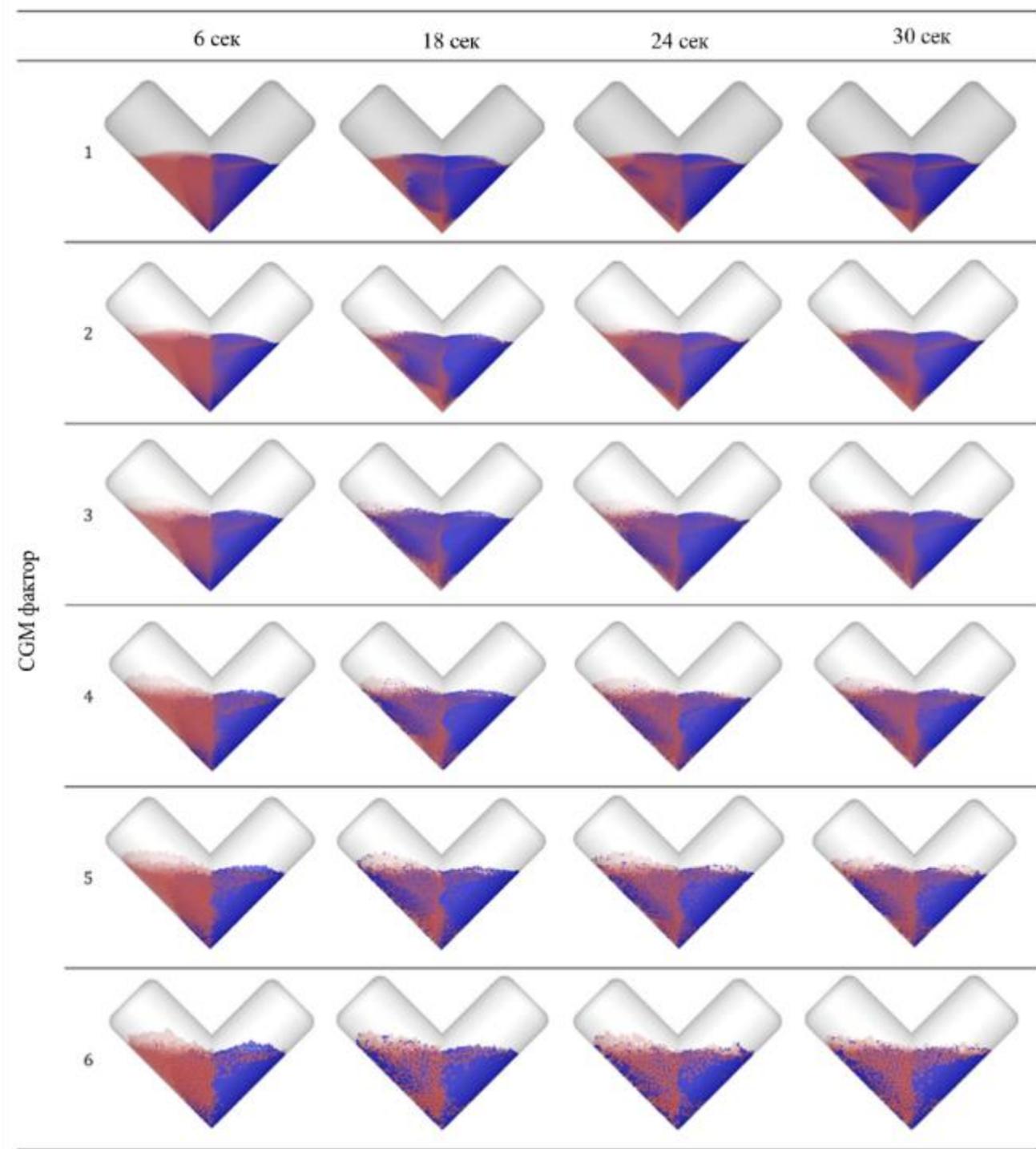


Рисунок 4.2 – Знімки розподілу частинок за різних CGM-умов у V-подібному змішувачі

Таблиця 4.1 – Кількість частинок, час симуляції, статистика LMI та похибки для V-подібного змішувача

	Без CGM	CGM = 2	CGM = 3	CGM = 4	CGM = 5	CGM = 7
Кількість частинок	$4,53 \times 10^6$	$5,66 \times 10^5$	$1,68 \times 10^5$	$7,07 \times 10^4$	$3,62 \times 10^4$	$1,32 \times 10^4$
Тривалість симуляції	58 год 30 хв	7 год 45 хв	1 год 23 хв	39 хв	24 хв	13 хв
Середній LMI	0,300	0,330	0,343	0,347	0,335	0,324
Мінімальний LMI	0,289	0,321	0,328	0,332	0,322	0,304
Максимальний LMI	0,305	0,338	0,350	0,345	0,344	0,337
Похибка	-	10,40%	14,71%	16,15%	12,13%	8,56%

Для V-подібного барабанного змішувача похибка LMI перевищувала 10% у більшості випадків CGM, з максимальною різницею понад 16%. Навіть варіант з найнижчою похибкою (CGM = 7) показав відхилення 8,56%, що вважається суттєвим. Такі підвищені значення похибок пояснюються тим, що система ще не досягла достатнього рівня змішування до кінця симуляції — про що свідчить відносно низький фінальний LMI (~0,300) у базовому (CGM = 1) випадку.

Щоб детальніше дослідити цей ефект, було проведено додаткове порівняння для більш ранніх часових інтервалів (25–26 с та 27–28 с). Результати показали, що похибка плавно зменшується з часом, що свідчить про те, що високі похибки у проміжку 29–30 с були тимчасовим ефектом, пов'язаним з неповним змішуванням на момент завершення моделювання. Ці результати узагальнено у таблиці 4.2, де подано значення LMI та відповідні відсотки похибок у різні часові інтервали та для різних значень CGM.

Таблиця 4.2 – Динаміка похибок LMI для V-подібного змішувача при значеннях CGM 2–7 у часі

Час (с)	Без CGM	CGM = 2	CGM = 3	CGM = 4	CGM = 5	CGM = 7
25–26	-	21,60%	35,79%	38,83%	33,92%	23,13%
27–28	-	18,29%	26,38%	27,69%	20,45%	14,75%
29–30	-	10,40%	14,71%	16,15%	12,13%	8,56%

#### 4.2 Аналіз ефективності змішування у стрічковому змішувачі

У цьому підрозділі наведено результати DEM-симуляцій для стрічкового змішувача за різних умов масштабування частинок методом CGM (CGM = 1, 2, 3, 4, 5, 7 та 10). Аналіз включав візуалізацію розподілу частинок, часову еволюцію індексу LMI та статистичні показники на завершальному етапі моделювання.

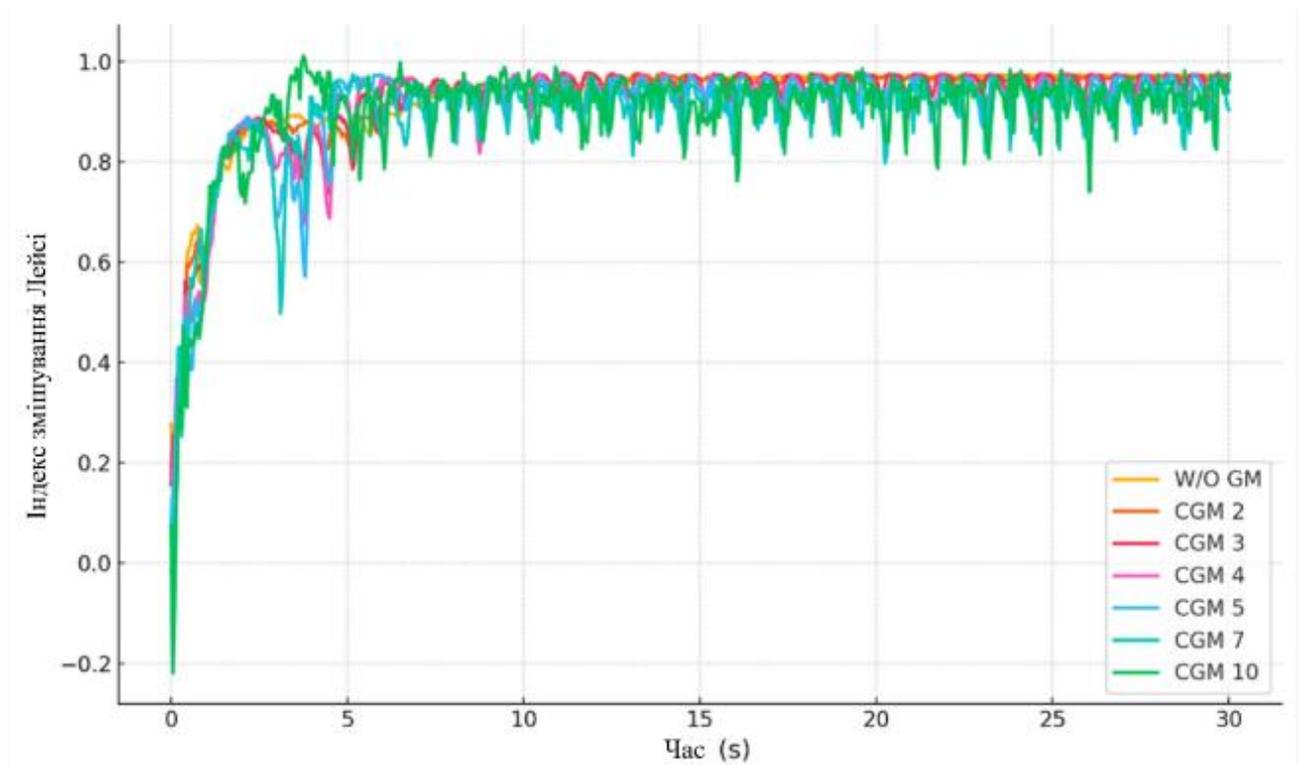


Рисунок 4.3 - Часова еволюція індексу LMI для різних значень CGM у стрічково-лопатевому змішувачі

На рисунку 4.3 наведено часову зміну LMI. Протягом перших 10 секунд спостерігалось стрімке зростання показника, після чого значення LMI зближувалися до 1 для всіх варіантів CGM. Незважаючи на незначні коливання, загальні тренди залишалися подібними, незалежно від рівня масштабування CGM. Важливо відзначити, що відмінності між CGM-варіантами зменшувалися з часом, що свідчить про поступову збіжність змішування. Очікується, що подальше продовження симуляції сприятиме ще більшій збіжності кривих.

На рисунку 4.4 показано розподіл частинок у моменти часу 6, 18, 24 та 30 секунд для різних CGM-рівнів. Хоча деталізація візуалізації змінювалася залежно від «грубості» частинок (CGM = 1 забезпечував найгладкіше зображення, тоді як CGM = 10 – більш зернисте), загальні закономірності змішування були подібними. Усі варіанти CGM забезпечили високий рівень однорідності до кінця моделювання.

Таблиця 4.3 – Кількість частинок, час симуляції, статистика LMI та похибки для стрічкового змішувача

	Без CGM	CGM = 2	CGM = 3	CGM = 4	CGM = 6	CGM = 7	CGM = 10
Кількість частинок	$2,71 \times 10^6$	$3,38 \times 10^5$	$9,84 \times 10^4$	$4,07 \times 10^4$	$2,04 \times 10^4$	$7,16 \times 10^3$	$2,28 \times 10^3$
Тривалість симуляції	125 год	4 год	1 год 20 хв	40 хв	30 хв	20 хв	14 хв
Середній LMI	0,972	0,970	0,963	0,955	0,949	0,918	0,928
Мінімальний LMI	0,973	0,973	0,975	0,973	0,972	0,963	0,978
Максимальний LMI	0,971	0,963	0,926	0,896	0,899	0,831	0,824
Похибка	-	0,18%	0,92%	1,74%	2,32%	5,58%	4,49%

У таблиці 4.3 подано основні характеристики, включаючи кількість частинок, загальний час симуляції та значення LMI за останню секунду моделювання (середнє, максимальне та мінімальне).

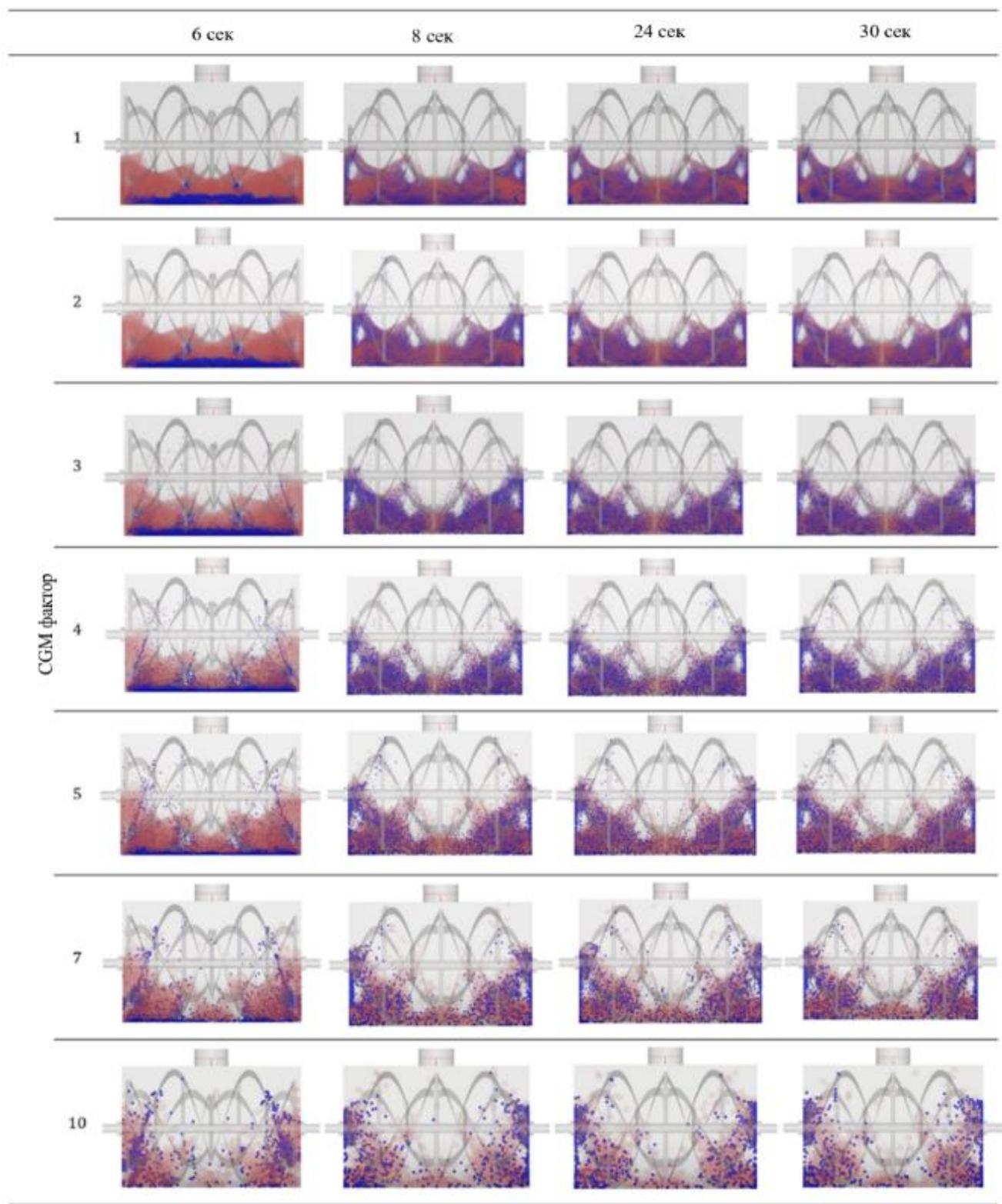


Рисунок 4.4 – Знімки розподілу частинок у стрічково-лопатевому змішувачі  
(CGM = 1–10)

Коефіцієнт CGM суттєво впливав на час обчислень: при CGM = 10 тривалість симуляції скоротилася з 125 годин до лише 14 хвилин. Попри таке різке прискорення, похибка LMI залишалася меншою за 5,6% для всіх значень CGM.

Ці результати підтверджують, що застосування CGM забезпечує значну економію обчислювальних ресурсів, зберігаючи при цьому прийнятну точність оцінки ефективності змішування. Продовження симуляції, ймовірно, ще більше покращило б збіжність LMI та зменшило б межу похибок.

### **4.3 Аналіз ефективності змішування у лопатевому змішувачі**

У цьому підрозділі наведено результати DEM-симуляцій для лопатевого змішувача за різних коефіцієнтів масштабування CGM (CGM = 1, 2, 3, 4, 5 та 7). Аналіз зосереджувався на зміні розподілу частинок у часі, часовій динаміці індексу змішування LMI, а також на порівнянні статистичних показників LMI та обчислювальних витрат у фінальній фазі симуляції.

На рисунку 4.5 показано часову еволюцію LMI. На початкових етапах змішування помітні відмінності у швидкості зростання та стабілізації LMI залежно від значення CGM. Проте загальні форми кривих сходяться до подібної траєкторії. Особливо для CGM  $\geq 4$  спостерігалось швидке покращення ступеня змішування, тоді як абсолютні відмінності між варіантами CGM поступово зменшувалися з часом.

На рисунку 4.6 наведено знімки розподілу частинок у моменти часу 6, 18, 24 та 30 секунд для кожного CGM-рівня. Зі збільшенням CGM-фактора загальна кількість частинок у моделі зменшувалася; однак основні характерні схеми змішування залишалися незмінними. У випадку високої роздільності (CGM = 1) межа змішування виглядала гладкішою і безперервнішою, але аналогічні просторові закономірності спостерігалися навіть при CGM = 7.

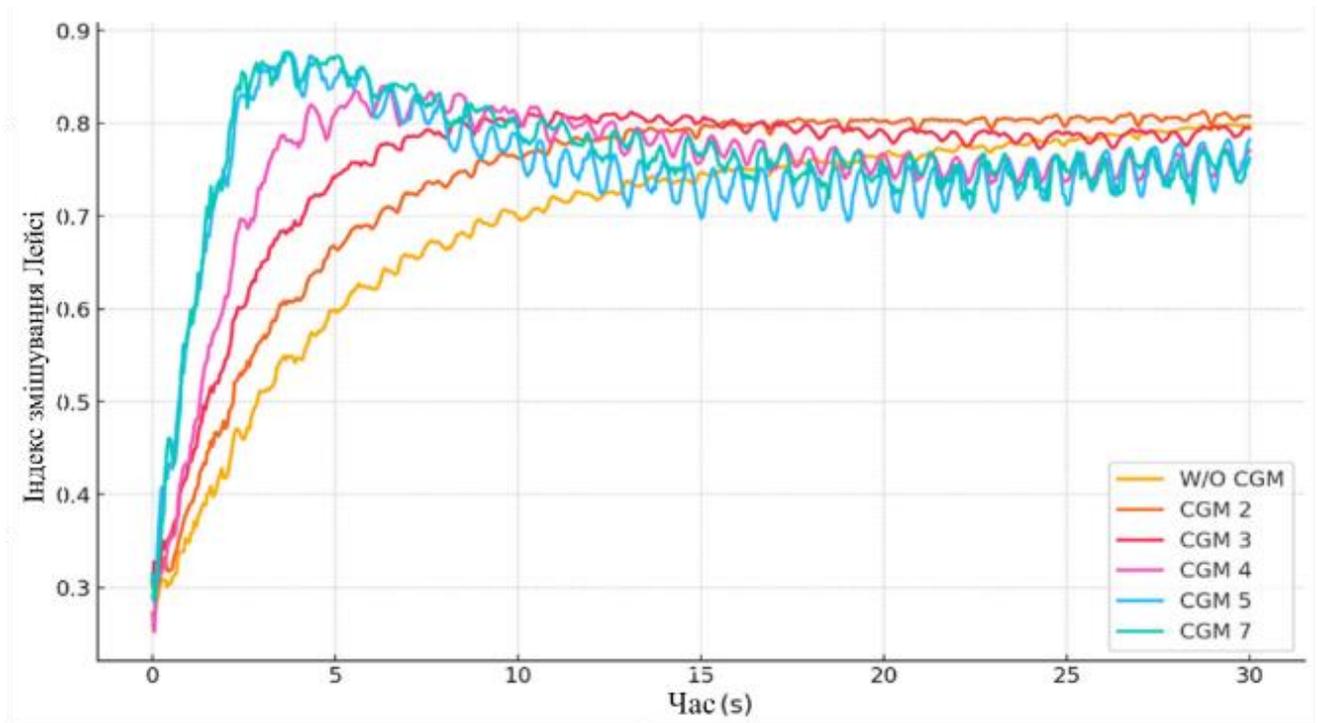


Рисунок 4.5 – Часова еволюція індексу LMI для різних значень CGM у лопатевому змішувачі

У таблиці 4.4 наведено середні, максимальні й мінімальні значення LMI у проміжку 29–30 с, а також кількість частинок, загальний час моделювання та відсоткову похибку для кожного CGM варіанта. Зі збільшенням CGM-фактора час симуляції істотно зменшувався – від 186 годин для CGM = 1 до лише 26 хвилин для CGM = 7.

Показники похибок демонстрували високу точність: CGM = 2 – 1,18%, CGM = 3 – 0,64%, а для більших CGM значень похибка залишалася в межах до 5,5%.

Ці результати підтверджують, що метод укрупнення CGM забезпечує суттєве підвищення обчислювальної ефективності, водночас зберігаючи високу фізичну достовірність у відтворенні процесу змішування компонентів сипких кормів.

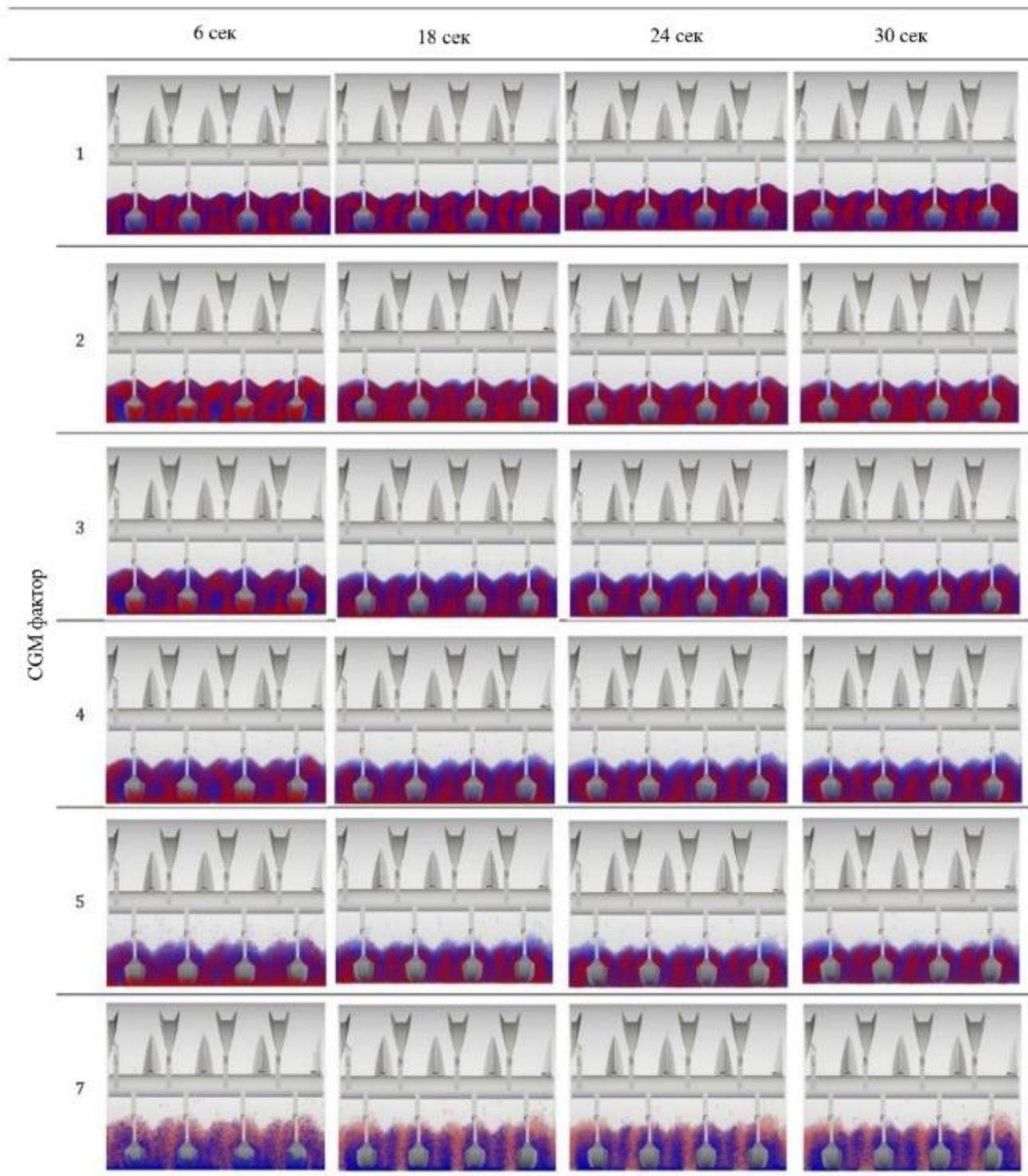


Рисунок 4.6 – Знімки розподілу частинок у моменти 6, 18, 24 і 30 с за різних значень CGM у лопатевому змішувачі

Таблиця 4.4 – Кількість частинок, час симуляції, статистика LMI та похибки для лопатевого змішувача

	Без CGM	CGM = 2	CGM = 3	CGM = 4	CGM = 5	CGM = 7
Кількість частинок	$9,85 \times 10^6$	$1,27 \times 10^6$	$3,78 \times 10^5$	$1,36 \times 10^5$	$6,66 \times 10^4$	$2,97 \times 10^4$
Тривалість симуляції	186 год	12 год	2 год 35 хв	1 год 13 хв	41 хв	26 хв
Середній LMI	0,798	0,807	0,793	0,758	0,760	0,754
Мінімальний LMI	0,799	0,811	0,797	0,772	0,782	0,771
Максимальний LMI	0,795	0,801	0,785	0,742	0,726	0,736
Похибка	-	1,18%	0,64%	4,98%	4,81%	5,51%

#### 4.4 Аналіз ефективності змішування у вертикальному лопатевому змішувачі

У цьому підрозділі наведено результати DEM-симуляцій для вертикального лопатевого змішувача за різних коефіцієнтів масштабування CGM (CGM = 1, 2, 3, 4 та 5). Аналіз зосереджувався на еволюції характеристик змішування частинок у часі, кількісній динаміці індексу LMI та статистичних показниках, отриманих у фінальну секунду кожної симуляції.

На рисунку 4.7 наведено часову зміну LMI. Хоча абсолютні значення LMI різнилися між CGM-рівнями, у всіх випадках показник стабільно зростав з часом. На початкових етапах змішування в окремих сценаріях CGM спостерігалися від'ємні значення LMI, що пов'язано зі статистичною природою формули LMI. Такі значення можуть виникати за умов сильно нерівномірних початкових співвідношень компонентів або через недостатню кількість частинок у комірках на ранніх стадіях. Незважаючи на це, траєкторії зростання LMI для всіх CGM-рівнів були подібними, та їх збіжність посилювалася у міру просування змішування. Це підтверджує надійність LMI як кількісного показника якості перемішування.

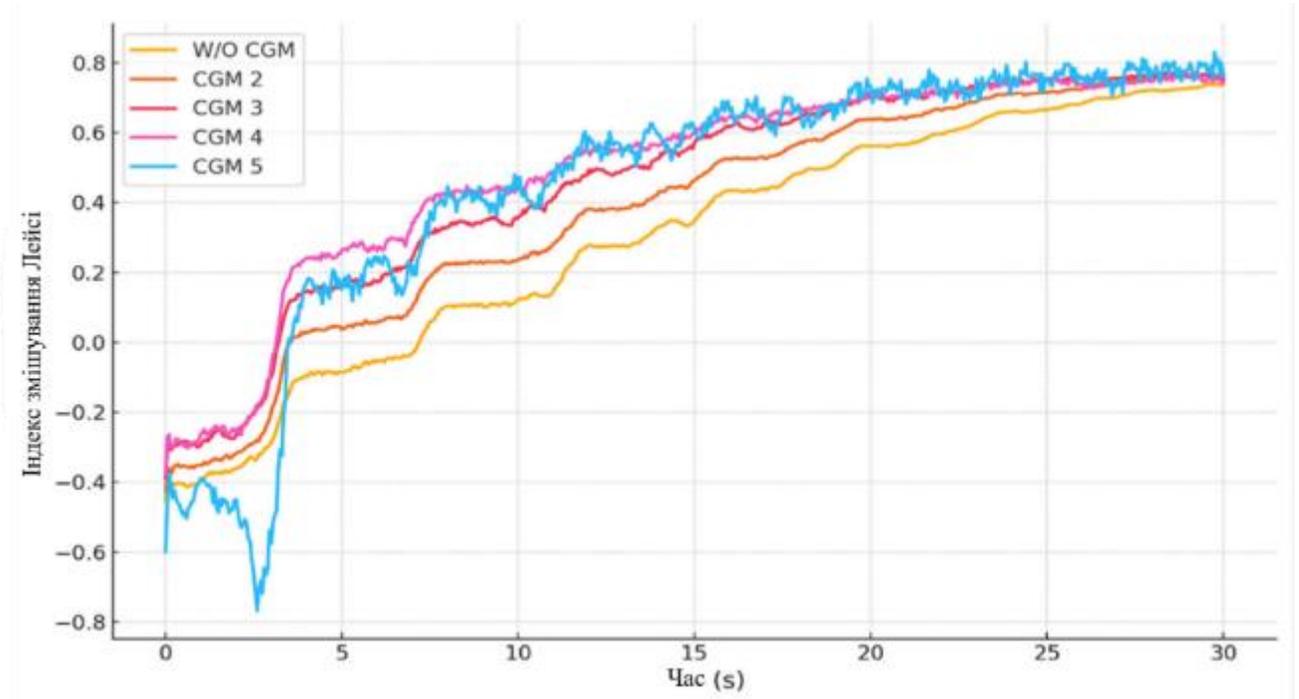


Рисунок 4.7 – Часова еволюція індексу LMI для різних значень CGM у вертикальному лопатевому змішувачі

На рисунку 4.8 показано розподіли частинок у моменти часу 6, 18, 24 та 30 секунд для різних CGM значень. Загальний характер змішування залишався стабільним для всіх рівнів CGM. Хоча збільшення CGM - фактора зменшувало деталізацію зображення окремих частинок, загальні закономірності потоку та структурні особливості змішування змінювалися мінімально. Це підтверджує, що внутрішні механізми змішування зберігаються навіть після укрупнення частинок.

Як показано на рисунку 4.7, продовження симуляцій, ймовірно, призвело б до ще більшої збіжності значень LMI між різними CGM-рівнями, а отже — до зменшення похибки. У Таблиці 4.5 наведено середні, максимальні та мінімальні значення LMI за інтервал 29–30 с, а також кількість частинок, загальний час обчислення та відсоткову похибку для кожного CGM-сценарію. Зі збільшенням значення CGM тривалість симуляції суттєво скорочувалася — від приблизно 500 годин для CGM = 1 до лише 3 годин 7 хвилин для CGM = 5. Похибки у більшості

випадків залишалися в межах до 4%, що свідчить про здатність CGM забезпечувати високу числову точність поряд із значною економією обчислювальних ресурсів.

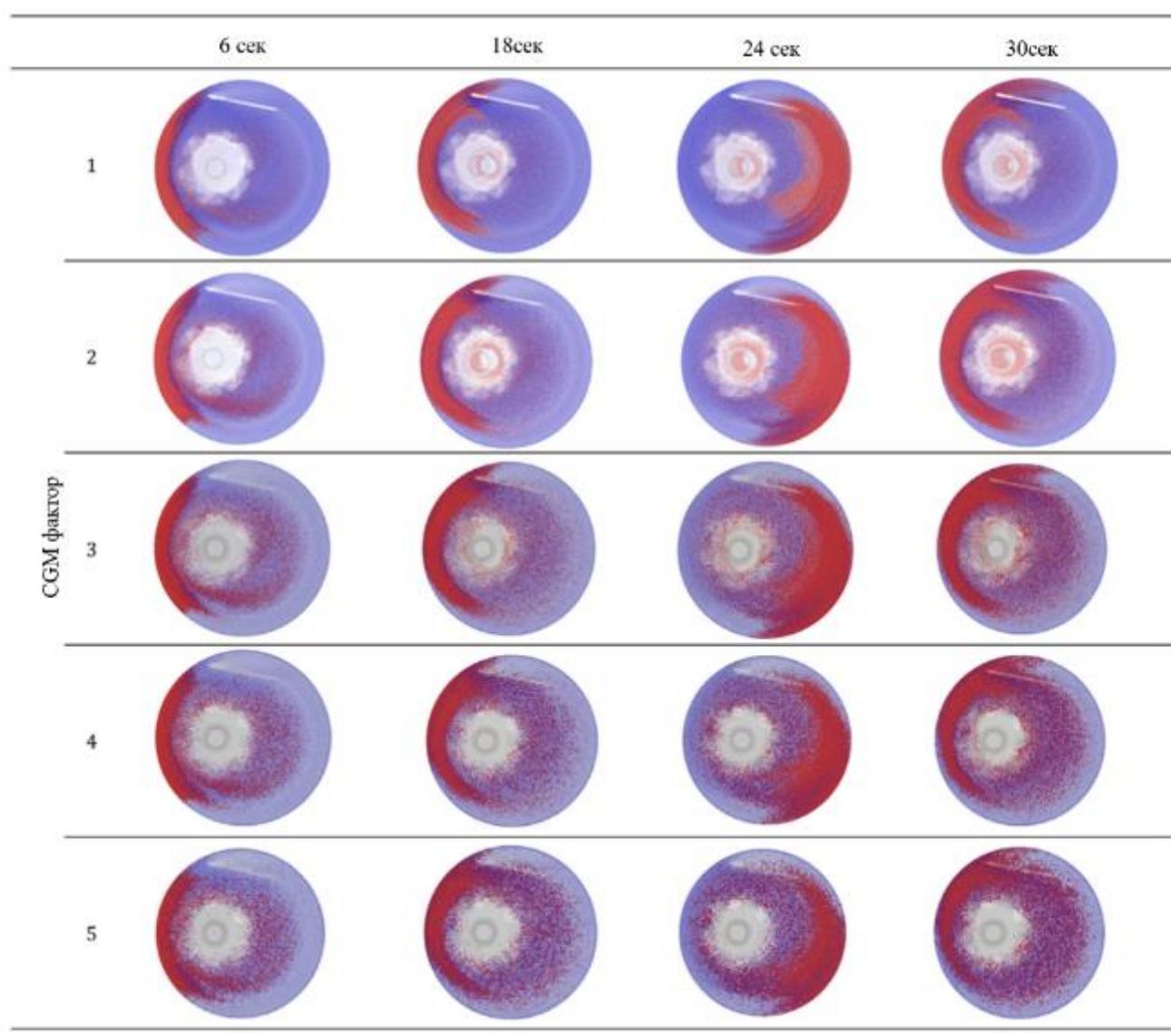


Рисунок 4.8 – Знімки розподілу частинок у моменти 6, 18, 24 і 30 с за різних значень CGM у вертикальному лопатевому змішувачі

Від’ємні значення LMI на ранніх стадіях змішування у деяких CGM-випадках можна пояснити специфічною гідродинамікою вертикального лопатевого змішувача. Через високу швидкість обертання центральної вертикальної лопаті в

центральної зоні утворюються значні відцентрові сили, які активно переміщують частинки всередині ядра потоку. Водночас периферійні ділянки поблизу стінок можуть залишатися відносно інертними. Якщо початково частинки розподілені нерівномірно, особливо якщо поблизу стінок утворені щільні скупчення, ці «мертві зони» можуть тимчасово зберігатися, що робить локальний розподіл частинок більш сегрегованим, ніж випадковий стан. Проте у міру розвитку змішування ці застійні області поступово руйнуються, і значення LMI повертаються до фізично коректних величин.

Таблиця 4.5 – Кількість частинок, час симуляції, статистика LMI та похибки для вертикального лопатевого змішувача

	Без CGM	CGM = 2	CGM = 3	CGM = 4	CGM = 5
Кількість частинок	$8,93 \times 10^6$	$1,12 \times 10^6$	$3,30 \times 10^5$	$1,39 \times 10^5$	$7,14 \times 10^4$
Тривалість симуляції	500 год	70 год	13 год 20 хв	4 год 27 хв	3 год 7 хв
Середній LMI	0,734	0,762	0,762	0,755	0,785
Мінімальний LMI	0,739	0,766	0,767	0,771	0,831
Максимальний LMI	0,727	0,756	0,753	0,742	0,749
Похибка	-	3,84%	3,86%	2,88%	6,95%

#### 4.5 Аналіз ефективності змішування у конічно-гвинтовому змішувачі

У цьому підрозділі наведено результати DEM-симуляцій для конічно-гвинтового змішувача за різних коефіцієнтів масштабування CGM (CGM = 1, 2, 3, 4, 5 та 7). Ефективність змішування для кожного варіанта CGM оцінювалася на основі часової еволюції поведінки частинок та індексу змішування LMI. Аналіз включав візуалізацію розподілу частинок, часові графіки LMI та статистичні показники за фінальну секунду кожного моделювання.

На рисунку 4.9 наведено часову зміну індексу LMI. На ранніх етапах змішування в окремих варіантах CGM спостерігалися коливання та навіть від'ємні значення LMI. Такі аномалії є наслідком статистичної природи формули LMI, особливо коли кількість частинок у комірках недостатня або коли початкова композиція системи сильно нерівномірна. Незважаючи на це, у всіх випадках CGM значення LMI демонстрували стійку тенденцію до зростання та збігання у міру розвитку процесу змішування. Загальний характер покращення однорідності був подібним для всіх CGM-рівнів, що підтверджує можливість ефективного змішування навіть при значному укрупненні частинок.

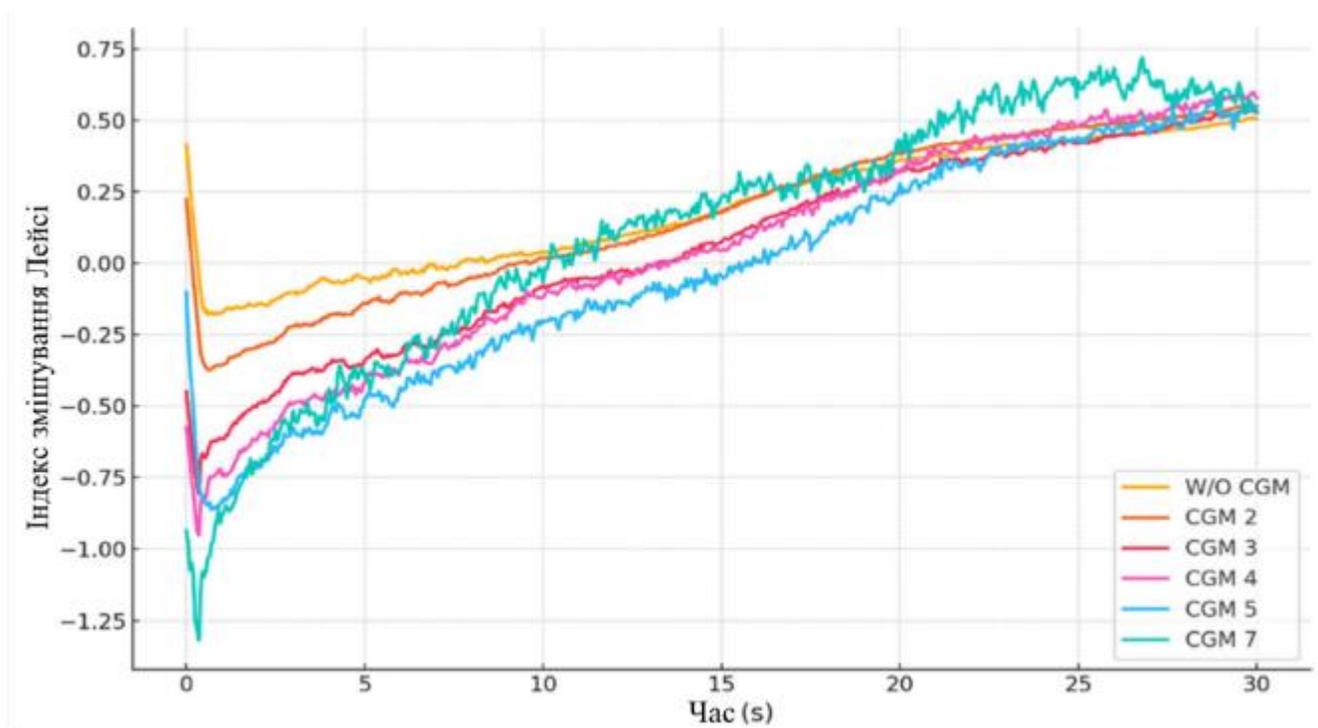


Рисунок 4.9 – Часова еволюція індексу LMI для різних значень CGM у конічно-гвинтовому змішувачі

На рисунку 4.10 показано розподіл частинок у моменти часу 6, 18, 24 та 30 секунд для кожного CGM значення.

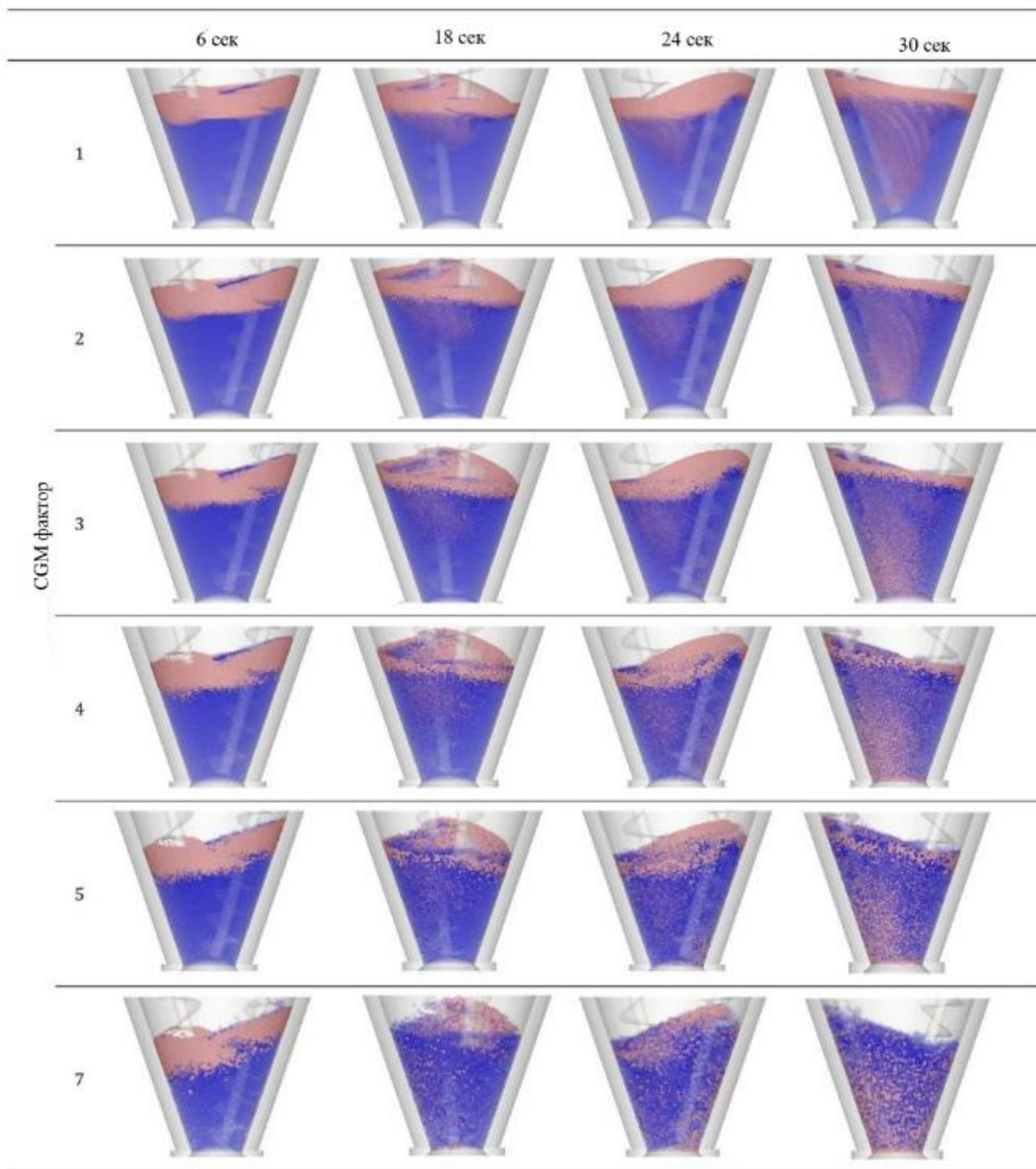


Рисунок 4.10 – Знімки розподілу частинок у моменти 6, 18, 24 і 30 с за різних значень CGM у конічно-гвинтовому змішувачі

У всіх випадках загальний характер руху частинок і макроскопічні закономірності змішування залишалися візуально подібними. Хоча при збільшенні CGM деталізація окремих частинок зменшувалася, основна структура потоку не зазнавала значних змін. Це підтверджує, що фундаментальні механізми змішування зберігаються навіть після застосування укрупнення.

Як впливає з рисунку 4.9, подовження симуляцій, ймовірно, призвело б до подальшої збіжності значень LMI між різними CGM-варіантами, а отже до зменшення похибок. У Таблиці 4.6 наведено кількість частинок, загальний час моделювання та статистичні значення LMI (середнє, максимум і мінімум) у проміжку 29–30 секунд, а також оцінені похибки для кожного значення CGM. Зі збільшенням CGM-фактора тривалість симуляції значно зменшувалася — від приблизно 114 годин при CGM = 1 до лише 30 хвилин при CGM = 7. Похибки між CGM-випадками варіювали, і в деяких сценаріях були відносно високими, однак подовження моделювання, ймовірно, зменшило б ці відмінності. Таким чином, результати підтверджують, що застосування CGM суттєво підвищує обчислювальну ефективність при збереженні достовірності оцінки змішування.

Таблиця 4.6 – Кількість частинок, час симуляції, статистика LMI та похибки для конічно-гвинтового змішувача

	Без CGM	CGM = 2	CGM = 3	CGM = 4	CGM = 5	CGM = 7
Кількість частинок	$5,08 \times 10^6$	$6,36 \times 10^5$	$1,88 \times 10^5$	$7,94 \times 10^4$	$4,07 \times 10^4$	$1,48 \times 10^4$
Тривалість симуляції	114 год	8 год 16 хв	2 год 36 хв	1 год 18 хв	48 хв	30 хв
Середній LMI	0,568	0,546	0,526	0,584	0,527	0,576
Мінімальний LMI	0,576	0,553	0,540	0,601	0,555	0,635
Максимальний LMI	0,559	0,533	0,514	0,572	0,472	0,525
Похибка	-	3,96%	7,40%	2,70%	7,28%	1,37%

Виникнення від'ємних значень LMI на ранніх етапах змішування можна пояснити специфічною динамікою кінечно-гвинтового змішувача. Завдяки поєднанню орбітального руху та багатовісного обертання гвинтів початкове поле швидкостей є сильно асиметричним. Частинки поблизу зовнішньої стінки конуса рухаються у вертикальному напрямі повільніше, через що може зберігатися шарувата початкова структура. Якщо початковий розподіл частинок є сегрегованим або формує шари, система тимчасово може мати ще більш впорядковану неоднорідність, ніж випадкова суміш, що й призводить до від'ємних значень LMI. У процесі змішування гвинтовий механізм поступово переміщує матеріал по всьому об'єму, руйнуючи ці структуровані шари, і LMI повертається до додатних фізично коректних значень.

#### **4.6 Підсумок результатів**

Для підвищення наочності порівняльного аналізу узагальнення всіх симуляційних сценаріїв та відповідних результатів наведено у Таблиці 4.7 У таблиці подано загальну кількість частинок, тривалості симуляцій, середні значення індексу змішування Лейсі (LMI) та похибки LMI для кожного типу змішувача.

Отримані дані чітко демонструють, що застосування CGM дозволило значно зменшити кількість частинок і час обчислень – у багатьох випадках більш ніж на 90% – при цьому забезпечуючи прийнятну точність значень LMI. У більшості сценаріїв середня похибка LMI залишалася в межах до 5%, що підтверджує практичну придатність CGM для великомасштабних DEM-моделювань процесів змішування.

Варто відзначити, що стрічковий змішувач (ribbon-blade mixer) продемонстрував найвищий фінальний LMI – 0,972 – і водночас найнижчу похибку

– 2,54%. Натомість V-подібний барабанний змішувач мав найнижчий фінальний LMI – 0,300 – і найвищу похибку – 12,39%.

Таблиця 4.7 – Підсумкові результати симуляцій для всіх типів змішувачів

Тип змішувача	Кількість частинок Без CGM	Кількість частинок CGM = 7	Тривалість симуляції Без CGM	Тривалість симуляції CGM = 7	Середній LMI Без CGM	Середній LMI CGM = 7 (та похибка)
V-подібний змішувач	$4,53 \times 10^6$	$1,32 \times 10^4$	58.5 год	13 хв	0,300	0,324 (12.39%)
Стрічковий змішувач	$2,71 \times 10^6$	$2,28 \times 10^3$	125 год	14 хв	0,972	0,928 (2.54%)
Лопатевий змішувач	$9,85 \times 10^6$	$2,97 \times 10^4$	186 год	26 хв	0,798	0,754 (3.42%)
Вертикальний змішувач	$8,93 \times 10^6$	$7,14 \times 10^4$	500 год	3 год 7 хв	0,734	0,785 (4.38%)
Конічно-гвинтовий змішувач	$5,08 \times 10^6$	$1,48 \times 10^4$	114 год	30 хв	0,568	0,576 (4.54%)

Ці тенденції свідчать, що системи змішування з інтенсивно вираженими макроскопічними потоковими структурами (як у стрічкових змішувачах) є менш чутливими до спрощення, спричиненого укрупненням частинок у CGM. Відповідно, обладнання із слабшими механічними режимами перемішування демонструє більші відхилення при використанні CGM.

#### 4.7 Висновки з розділу

1. У цьому дослідженні було систематично оцінено придатність і точність застосування методу укрупнення частинок (CGM) у DEM-симуляціях для п'яти репрезентативних промислових змішувачів: V-подібного барабанного змішувача, стрічкового змішувача, лопатевого змішувача, вертикального лопатевого

змішувача та конічно-гвинтового змішувача. Збільшення розміру частинок за допомогою CGM дало змогу суттєво знизити обчислювальні витрати, що зробило реальними великомасштабні симуляції. Водночас таке масштабування може спричиняти похибки у відтворенні початкових етапів змішування. Для оцінки ефективності змішування у різних умовах CGM було проаналізовано часову еволюцію індексу LMI.

2. Для всіх п'яти змішувальних систем CGM забезпечив значне скорочення часу обчислень — часто більш ніж на 90% — водночас зберігаючи прийнятний рівень точності LMI. Візуальний аналіз розподілу частинок та часових кривих LMI підтвердив, що загальні закономірності змішування залишалися подібними для всіх варіантів CGM. Незважаючи на певні відхилення на ранніх етапах змішування, особливо за великих коефіцієнтів CGM, ці відмінності зменшувалися у міру розвитку процесу. У багатьох випадках фінальна похибка LMI не перевищувала 5%, що свідчить про мінімальний вплив на загальну інтерпретацію якості змішування.

3. Результати демонструють, що CGM є надійною та ефективною стратегією для DEM-моделювання процесів змішування, особливо коли повнорозмірні симуляції є надмірно обчислювально затратними. CGM дозволяє моделювати змішування у масштабі всього обладнання, а не лише у локалізованих ділянках, що розширює можливості аналізу технологічних процесів і оптимізації конструкцій змішувачів. Крім того, кількісна оцінка компромісу між точністю та обчислювальною ефективністю, наведена в цьому дослідженні, допомагає визначити доцільні рівні CGM для різних технологічних сценаріїв.

4. Окрім фіксованих значень CGM, корисно враховувати співвідношення між розміром частинок і габаритами обладнання. Наприклад, у змішувачах із робочою камерою діаметром кілька метрів, незалежно від того, чи мають частинки розмір кілька мікронів або міліметрів, глобальна динаміка змішування здебільшого залежить від макроскопічних потоків, а не від індивідуальних траєкторій частинок.

З цієї точки зору підхід CGM залишається коректним у широкому діапазоні масштабів, за умови, що локальні ефекти не є визначальними для механізму змішування. Тому вибір відповідного коефіцієнта CGM має ґрунтуватися на співвідношенні характерних розмірів частинок та змішувача, а також на вимогах щодо точності для конкретної задачі. Хоча при високих значеннях CGM можуть спостерігатися локальні відхилення, глобальні тенденції та статистичні індекси змішування, зокрема LMI, зазвичай залишаються незмінними.

5. Порівняння фінальних значень LMI та середніх похибок між різними змішувачами виявило чітку закономірність. Стрічковий змішувач продемонстрував найвищий фінальний LMI ( $=0,970$ ) і найменшу похибку ( $=2,54\%$ ). За ним розташувалися лопатевий змішувач (LMI  $\approx 0,798$ , похибка  $\approx 3,42\%$ ) та вертикальний змішувач (LMI  $\approx 0,734$ , похибка  $\approx 4,38\%$ ). Конічно-гвинтовий змішувач показав нижче значення LMI ( $=0,568$ ) і дещо більшу похибку ( $=4,54\%$ ). Найнижчий рівень змішування (LMI =  $0,300$ ) та найбільшу чутливість до масштабування CGM продемонстрував V-подібний барабанний змішувач. Хоча безпосереднього причинно-наслідкового зв'язку не встановлено, ці результати свідчать, що змішувачі з високою інтенсивністю потоків є менш чутливими до CGM, що може пояснюватися домінуванням макроскопічних механізмів змішування у добре перемішаних системах.

6. Незважаючи на важливі результати, це дослідження має кілька обмежень. По-перше, симуляції виконувалися з використанням незлипких сферичних частинок. Цей підхід забезпечив обчислювальну ефективність і стабільність, проте не враховував ефекти когезії, нерегулярності форми, кутастості або анізотропного опору руху, які можуть впливати на локальну динаміку змішування. По-друге, отримані висновки сформовано за певних умов матеріалів та режимів роботи обладнання. У випадках роботи з когезійними порошками, частинками витягнутої або кутастої форми, а також за умов високих зсувних напружень, вологості або температурних градієнтів оптимальне значення CGM

може бути іншим. Крім того, у цьому дослідженні не оцінювався вплив вибору контактних моделей або параметрів взаємодії на результати CGM. Оскільки DEM чутливий до таких параметрів, перспективними є систематичні дослідження чутливості для оцінки впливу різних моделей контактних сил на точність CGM.

7. Узагальнюючи, метод CGM у DEM-симуляціях є практичним та ефективним засобом масштабування обчислень без істотної втрати достовірності при аналізі змішування. Методологія та результати роботи можуть слугувати орієнтиром для подальших великомасштабних DEM-досліджень, сприяючи розробці ефективних, надійних та економічно обґрунтованих технологій змішування сипких матеріалів. Крім того, отримані висновки можуть сприяти вдосконаленню стратегій моделювання у широкому колі промислових застосувань, пов'язаних зі змішуванням.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення охорони праці під час роботи зі змішувальним обладнанням у виробництві комбікормів є одним із ключових елементів технологічної безпеки підприємства, оскільки змішувачі різних типів працюють у режимах підвищеної механічної, електричної, пожежної та вибухової небезпеки. В умовах кормовиробництва змішування компонентів сипких кормів супроводжується утворенням пилу, значними навантаженнями на вузли та агрегати, підвищеним шумом, вібрацією, а також потребою у постійному контролі роботи обертових робочих органів. Тому організація раціональної системи охорони праці, спрямованої на попередження травмувань, професійних захворювань і аварій, має комплексний характер і включає технічні, організаційні, санітарно-гігієнічні та протиаварійні заходи.

Під час експлуатації змішувачів працівник стикається з низкою небезпечних чинників, серед яких основними є рухомі та обертові частини машин, висока інтенсивність пилотворення, значний рівень шуму, вібраційні навантаження та електрична небезпека, зумовлена роботою електродвигунів у запиленому середовищі. З огляду на це посилені вимоги висуваються до конструкції змішувачів, які повинні бути оснащені захисними кожухами, блокувальними пристроями, аварійними кнопками, датчиками температури та струму, а також системами аспірації, здатними підтримувати безпечний рівень концентрації пилу у повітрі. Органічний пил, характерний для комбікормового виробництва, відноситься до вибухонебезпечних категорій, що створює додаткові передумови для виникнення вибухів у разі накопичення пилу на гарячих поверхнях або утворення пилоповітряної хмари в присутності джерела запалювання.

Безпечна експлуатація змішувачів вимагає постійного контролю технічного стану обладнання, справності робочих органів та електричних систем, правильності завантаження та дотримання технологічних режимів. Працівник перед початком

роботи повинен переконатися у відсутності сторонніх предметів у робочій камері, перевірити заземлення, цілісність огорожень і справність аспіраційних установок. Важливе значення має дотримання правил технологічної дисципліни, оскільки нерівномірне завантаження, перевищення допустимої маси порції, використання сировини з підвищеною вологістю чи наявністю сторонніх домішок може призвести до перевантаження двигуна, перегрівання підшипників або заклинювання робочих органів, що створює передумови для аварійної ситуації.

Особливу увагу приділяють запобіганню пилових вибухів і пожеж. У місцях із підвищеним виділенням пилу повинні функціонувати аспіраційні системи, здатні забезпечити достатню швидкість руху повітря для недопущення осідання пилу в повітроводах. Поверхні змішувачів і прилеглого обладнання необхідно регулярно очищувати від пилових нашарувань, особливо в зонах з високою температурою та у місцях підшипникових вузлів. Електродвигуни та електричне обладнання повинні відповідати необхідному ступеню пилозахисту й оснащуватися автоматичними вимикачами, що запобігають можливості короткого замикання й подальшого займання пилу. У разі роботи змішувачів у лініях, де можливе підвищення температури компонентів, додатково контролюється нагрівання корпусу та робочих органів, оскільки надмірне температурне навантаження може спричинити самозаймання жировмісних компонентів кормової суміші.

Під час виконання робіт у зоні змішувачів працівник повинен використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема протипилові респіратори, захисні окуляри, навушники або беруші, спецодяг та взуття з антистатичними властивостями. Робочий одяг має щільно прилягати до тіла, щоб запобігти його затягуванню рухомими частинами машин. Усі ремонти, регулювання або очищення обладнання здійснюються лише після повного відключення змішувача від електромережі та зупинки обертання робочих органів. Забороняється відкривати завантажувальні чи оглядові люки під час роботи, оскільки це може призвести до травмування, потрапляння частинок кормової

суміші в очі чи дихальні шляхи, а також до утворення вибухонебезпечної пилової хмари.

У разі виникнення надзвичайної ситуації важливим є оперативне реагування персоналу та дотримання алгоритму дій, що мінімізує ризики для працівників і знижує масштаби можливих технологічних втрат. До найбільш поширених надзвичайних ситуацій у роботі змішувачів належать раптове заклинювання робочого органу, відмова електродвигуна, обриви ременів або транспортувальних елементів, перегрів підшипників, виникнення задимлення, займання пилу, руйнування корпусу чи різкі вібраційні коливання. У таких випадках оператор повинен негайно зупинити змішувач штатною або аварійною кнопкою, повністю знеструмити обладнання й повідомити відповідальну особу. Самостійні спроби розібрати або прочистити заблокований змішувач без належної фіксації й відключення від мережі неприпустимі, оскільки залишкова інерція або несподіваний пуск можуть спричинити тяжкі травми.

У випадку пожежі працівник зобов'язаний оцінити джерело загоряння, уникати використання води для гасіння пилових та електротехнічних пожеж та застосовувати відповідні вогнегасники — порошкові або вуглекислотні, залежно від ситуації. При загрозі вибуху пилової хмари необхідно негайно евакуювати персонал із приміщення, зупинити подачу компонентів і перекрити витяжні канали, щоб запобігти поширенню вогню через систему аспірації. Додатково слід враховувати, що пилові вибухи часто відбуваються хвилеподібно: первинний вибух підіймає нові шари пилу, створюючи умови для вторинного вибуху, який є значно небезпечнішим. Тому головним завданням є недопущення накопичення пилу та регулярне очищення робочих зон.

## 6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМІШУВАЧІВ КОРМІВ

Економічна ефективність роботи змішувачів для сипких кормів оцінюється за величиною питомих експлуатаційних витрат на одиницю продукції. До складу експлуатаційних витрат входять витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, амортизаційні відрахування, витрати на ремонт і технічне обслуговування устаткування, а також витрати на електроенергію. Узагальнений вираз для визначення питомих витрат експлуатації на 1 т змішаної кормової суміші можна записати у вигляді

$$C_{\text{експл}} = C_{\text{зп}} + C_a + C_p + C_e, \quad (6.1)$$

де  $C_{\text{зп}}$  – витрати на виплату заробітної плати робітникам на одиницю продукції, грн/т;  $C_a$  – питомі амортизаційні відрахування, грн/т;  $C_p$  – питомі витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання, грн/т;  $C_e$  – питомі витрати на електроенергію, грн/т.

Вихідні дані для розрахунків. Для всіх чотирьох змішувачів приймаємо однакові економічні параметри: годинна тарифна ставка робітника  $f = 40,46$  грн/год; коефіцієнт нарахувань на заробітну плату  $k_n = 1,22$ ; вартість електроенергії  $c_e = 4,32$  грн/кВт; норма амортизації  $H_a = 0,10$  (10 % на рік); норма відрахувань на ремонт  $H_p = 0,035$  (3,5 % на рік).

Річний фонд роботи приймається  $T = 2000$  год при коефіцієнті використання змінного часу  $k_{\text{ч}} = 0,9$ . Завантаження змішувачів – 70 %, що відповідає реальним умовам роботи кормоцеху.

Техніко-економічні характеристики змішувачів прийнято такими:

- V-подібний змішувач: продуктивність  $q_V = 3$  т/год, потужність привода  $P_V = 10$  кВт, балансова вартість  $K_V = 600000$  грн;
- стрічково-лопатевий змішувач: продуктивність  $q_R = 10$  т/год, потужність  $P_R = 22$  кВт, балансова вартість  $K_R = 900000$  грн;

– лопатевий змішувач: продуктивність  $q_p = 12$  т/год, потужність  $P_p = 25$  кВт, балансова вартість  $K_p = 1100000$  грн;

– вертикально-лопатевий змішувач: продуктивність  $q_{vt} = 5$  т/год, потужність  $P_{vt} = 30$  кВт, балансова вартість  $K_{vt} = 800000$  грн.

Річне навантаження кожного змішувача визначаємо за виразом

$$R = q \cdot T \cdot k_q \cdot 0,7, \quad (6.2)$$

де  $q$ – годинна продуктивність змішувача, т/год;  $T = 2000$  год– річний фонд часу;  $k_q = 0,9$ – коефіцієнт використання часу зміни;  $0,7$  – коефіцієнт завантаження.

Підставляючи значення, одержуємо орієнтовні річні обсяги роботи: для V-подібного змішувача  $R_v \approx 3780$  т/рік; для стрічково-лопатєвого змішувача  $R_R = 12600$  т/рік; для лопатєвого змішувача  $R_p \approx 15120$  т/рік; для вертикально-лопатєвого змішувача  $R_{vt} \approx 6300$  т/рік.

Розрахунок витрат на заробітну плату. Витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу в розрахунку на одиницю продукції визначаються за формулою

$$C_{зп} = \frac{n \cdot f \cdot k_n}{q}, \quad (6.3)$$

де  $n = 1$ – чисельність обслуговуючого персоналу, люд;  $f = 40,46$  грн/год– годинна тарифна ставка;  $k_n = 1,22$ – коефіцієнт нарахувань на заробітну плату;  $q$ – продуктивність змішувача, т/год.

Після підстановки маємо:

– для V-подібного змішувача

$$C_{зп,V} = \frac{1 \cdot 40,46 \cdot 1,22}{3} \approx 16,45 \text{ грн/т};$$

– для стрічково-лопатєвого змішувача

$$C_{зп,R} \approx 4,94 \text{ грн/т};$$

– для лопатєвого змішувача

$$C_{зп,P} \approx 4,11 \text{ грн/т};$$

- для вертикально-лопатевого змішувача

$$C_{зп,vt} \approx 9,87 \text{ грн/т.}$$

Розрахунок витрат на електроенергію ( $c_e = 4,32$  грн/кВт·год). Питомі витрати на електроенергію визначаємо за виразом

$$C_e = \frac{P \cdot c_e}{q}, \quad (6.4)$$

де  $P$ – потужність електродвигуна змішувача, кВт;  $c_e = 4,32$  грн/кВт– вартість електроенергії

Розрахунок дає:

- для V-подібного змішувача

$$C_{e,V} = \frac{10 \cdot 4,32}{3} = 14,40 \text{ грн/т;}$$

- для стрічково-лопатевого змішувача

$$C_{e,R} = \frac{22 \cdot 4,32}{10} \approx 9,50 \text{ грн/т;}$$

- для лопатевого змішувача

$$C_{e,P} = \frac{25 \cdot 4,32}{12} = 9,00 \text{ грн/т;}$$

- для вертикально-лопатевого змішувача

$$C_{e,vt} = \frac{30 \cdot 4,32}{5} = 25,92 \text{ грн/т.}$$

Як видно, найбільші питомі витрати електроенергії має вертикально-лопатевий змішувач через високу встановлену потужність при порівняно невеликій продуктивності.

Розрахунок амортизаційних відрахувань. Річні амортизаційні відрахування для кожного змішувача обчислюємо за формулою

$$A_{річ} = K \cdot H_a, \quad (6.5)$$

де  $K$ – балансова вартість змішувача, грн;  $H_a = 0,10$ – норма амортизації, частка одиниці.

Питомі амортизаційні відрахування на одиницю продукції становлять

$$C_a = \frac{A_{\text{річ}}}{R}. \quad (6.6)$$

Розрахунок дає:

- для V-подібного змішувача

$$A_{\text{річ},V} = 600000 \cdot 0,10 = 60000 \text{ грн/рік}, C_{a,V} = \frac{60000}{3780} \approx 15,87 \text{ грн/т};$$

- для стрічково-лопатевого змішувача

$$A_{\text{річ},R} = 90000 \text{ грн/рік}, C_{a,R} = \frac{90000}{12600} \approx 7,14 \text{ грн/т};$$

- для лопатевого змішувача

$$A_{\text{річ},P} = 110000 \text{ грн/рік}, C_{a,P} = \frac{110000}{15120} \approx 7,28 \text{ грн/т};$$

- для вертикально-лопатевого змішувача

$$A_{\text{річ},Vt} = 80000 \text{ грн/рік}, C_{a,Vt} = \frac{80000}{6300} \approx 12,70 \text{ грн/т}.$$

Розрахунок витрат на ремонт і технічне обслуговування. Питомі витрати на технічне обслуговування та ремонт розраховуємо за виразом

$$C_p = \frac{K \cdot H_p}{R}, \quad (6.7)$$

де  $H_p = 0,035$  – нормований коефіцієнт відрахувань на ремонт, частка одиниці.

Відповідно одержуємо:

- для V-подібного змішувача

$$C_{p,V} \approx 5,56 \text{ грн/т};$$

- для стрічково-лопатевого змішувача

$$C_{p,R} \approx 2,50 \text{ грн/т};$$

- для лопатевого змішувача

$$C_{p,P} \approx 2,55 \text{ грн/т};$$

- для вертикально-лопатевого змішувача

$$C_{p,Vt} \approx 4,44 \text{ грн/т}.$$

Підсумкові питомі експлуатаційні витрати ( $c_e = 4,32 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$ )

Підсумовуючи окремі складові за формулою (6.1), одержуємо загальні питомі експлуатаційні витрати на 1 т змішаної суміші для кожного змішувача:

– V-подібний змішувач:

$$C_{\text{експл},V} = 16,45 + 14,40 + 15,87 + 5,56 \approx 52,28 \text{ грн/т};$$

– стрічково-лопатевий змішувач:

$$C_{\text{експл},R} = 4,94 + 9,50 + 7,14 + 2,50 \approx 24,08 \text{ грн/т};$$

– лопатевий змішувач:

$$C_{\text{експл},P} = 4,11 + 9,00 + 7,28 + 2,55 \approx 22,94 \text{ грн/т};$$

– вертикально-лопатевий змішувач:

$$C_{\text{експл},Vt} = 9,87 + 25,92 + 12,70 + 4,44 \approx 52,93 \text{ грн/т}.$$

Таким чином, найнижчі експлуатаційні витрати має лопатевий змішувач, де собівартість змішування 1 т суміші становить близько 22,94 грн/т. Стрічково-лопатевий змішувач забезпечує дещо вищу, але також низьку собівартість – близько 24,08 грн/т. Натомість V-подібний та вертикально-лопатевий змішувачі мають істотно вищі витрати – понад 52 грн/т.

Питомі приведені витрати. Для узагальненої оцінки економічної доцільності, згідно з методикою, розраховуються питомі приведені витрати з урахуванням нормативної ефективності капітальних вкладень:

$$\text{ПП} = C_{\text{експл}} + E_n \cdot \frac{K}{R}, \quad (6.8)$$

де  $E_n = 0,15$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;  $K$  – балансова вартість змішувача, грн;  $R$  – річне навантаження, т/рік.

Орієнтовні значення питомих приведених витрат для розглянутих змішувачів: V-подібний змішувач:  $\text{ПП}_V \approx 76,09$  грн/т; стрічково-лопатевий змішувач:  $\text{ПП}_R \approx 34,79$  грн/т; лопатевий змішувач:  $\text{ПП}_P \approx 33,85$  грн/т; вертикально-лопатевий змішувач:  $\text{ПП}_{Vt} \approx 71,98$  грн/т.

Отже, з позицій сукупних приведених витрат найекономічнішими є лопатевий та стрічково-лопатевий змішувачі, тоді як V-подібний і вертикально-

лопатевий мають значно вищий рівень витрат у розрахунку на 1 т змішаної кормової суміші.

Таблиця 6.1 – Підсумкова таблиця показників економічної ефективності змішувачів

Показник	V-подібний	Стрічково-лопатевий	Лопатевий	Вертикально-лопатевий
Продуктивність, т/год	3,0	10,0	12,0	5,0
Річне навантаження, т/рік	3780	12600	15120	6300
Балансова вартість, тис. грн	600	900	1100	800
Витрати на заробітну плату, грн/т	16,45	4,94	4,11	9,87
Витрати на електроенергію, грн/т	14,40	9,50	9,00	25,92
Амортизаційні відрахування, грн/т	15,87	7,14	7,28	12,70
Витрати на ремонт і ТО, грн/т	5,56	2,50	2,55	4,44
Сумарні експлуатаційні витрати, грн/т	52,28	24,08	22,94	52,93
Питомі приведені витрати, грн/т	76,09	34,79	33,85	71,98

## ВИСНОВКИ

1. Узагальнено властивості сипких кормів та їх вплив на технологічні процеси, визначено ключові параметри, що формують сипкість, стабільність і поведінку частинок під час змішування. Проаналізовано основні методи та режими змішування, встановлено їх доцільність залежно від характеристик компонентів і вимог до однорідності. Досліджено конструктивні особливості різних типів змішувачів і показано, що вибір оптимального обладнання визначає інтенсивність, якість і енергоефективність процесу. Отримані результати підтверджують, що ефективне змішування сипких кормів можливе лише за умови врахування фізико-механічних властивостей компонентів та правильно підбраного типу змішувального обладнання.

2. Обґрунтовано використання методу дискретних елементів (DEM) для моделювання руху частинок сипких кормів та показано потребу в застосуванні методів укрупнення через значні обчислювальні витрати при роботі з дрібними реальними частинками. Використання моделей HLS і LSCL забезпечує точне відтворення нормальних і тангенціальних контактних сил, що підвищує достовірність прогнозування процесів змішування. Метод укрупнення частинок (CGM) доведено як ефективний інструмент для зменшення складності DEM-розрахунків, за умови контролю похибок масштабування.

3. Проведено чисельне моделювання процесів змішування сипких кормів із використанням DEM та укрупнення частинок (CGM), що дозволило оцінити ефективність п'яти типів промислових змішувачів. Застосування уніфікованої DEM-моделі та двокомпонентного середовища забезпечило коректне порівняння динаміки перемішування та впливу коефіцієнта укрупнення на точність симуляцій. Використання індексу Лейсі (LMI) дозволило кількісно оцінити однорідність суміші та знизити вплив статистичного шуму. Розроблена методика забезпечує комплексну оцінку змішувальних систем, визначення допустимих меж CGM та оптимізацію конструкцій і режимів роботи промислових змішувачів.

4. Дослідження підтвердило ефективність застосування методу укрупнення частинок (CGM) у DEM-симуляціях для п'яти промислових змішувачів: V-подібного барабанного, стрічкового, лопатевого, вертикального лопатевого та конічно-гвинтового змішувачів. CGM дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати (до 90%) при збереженні прийнятної точності оцінки однорідності суміші за індексом LMI. Виявлено, що глобальна динаміка змішування переважно залежить від макроскопічних потоків, що робить метод коректним для різних масштабів обладнання, хоча на ранніх етапах та за великих коефіцієнтів укрупнення можуть спостерігатися локальні відхилення. Серед змішувачів найкращі результати продемонстрував стрічковий змішувач ( $LMI = 0.970$ , похибка 2.54%), за ним – лопатевий ( $LMI \approx 0.798$ , похибка  $\approx 3.42\%$ ), вертикальний лопатевий ( $LMI \approx 0.734$ , похибка  $\approx 4.38\%$ ), конічно-гвинтовий ( $LMI = 0.568$ , похибка 4.54%), а найнижчий рівень змішування та найбільшу чутливість до CGM показав V-подібний барабанний змішувач ( $LMI = 0.300$ ).

5. Охорона праці при роботі зі змішувачами комбікормів є ключовою для безпеки виробництва через механічні, електричні, пилові, шумові та вибухонебезпечні ризики. Система безпеки включає технічні (захисні кожухи, блокувальні пристрої, аспірація), організаційні та санітарні заходи. Працівники повинні дотримуватися правил завантаження та експлуатації, використовувати засоби індивідуального захисту, виконувати очищення та регулювання тільки після повної зупинки обладнання. Особлива увага приділяється запобіганню пилових вибухів і пожеж, регулярному очищенню робочих поверхонь та контролю систем аспірації.

6. Економічна ефективність змішувачів для сипких кормів визначається питомими експлуатаційними витратами, що включають оплату праці, електроенергію, амортизацію та ремонт. Розрахунки показали, що найнижчі витрати мають лопатевий (22,94 грн/т) та стрічково-лопатевий змішувачі (24,08 грн/т), тоді як V-подібний (52,28 грн/т) і вертикально-лопатевий змішувачі (52,93 грн/т) значно дорожчі. За питомими приведеними витратами найекономічнішими є лопатевий (33,85 грн/т) та стрічково-лопатевий (34,79 грн/т) змішувачі. Отже, для оптимізації виробничих витрат у кормоцеху доцільніше використовувати лопатеві та стрічково-лопатеві змішувачі.

## Бібліографія

1. Bauer, W.; Nötzel, D.; Wenzel, V.; Nirschl, H. Influence of dry mixing and distribution of conductive additives in cathodes for lithium ion batteries. *J. Power Sources* 2015, 288, 359–367. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Thakur, R.K.; Vial, C.; Nigam, K.D.P.; Nauman, E.B.; Djelveh, G. Static mixers in the process industries—A review. *Chem. Eng. Res. Des.* 2003, 81, 787–826. [Google Scholar] [CrossRef]
3. Фельдман, Л. П., Петренко, А. І., Дмитрієва, О. А. (2006). Чисельні методи в інформатиці. Київ: Видавнича група ВНУ. 480 с. ISBN 966 552-155-1.
4. Бойцова, І. А. (2015). Чисельні методи: конспект лекцій. Одеса: Видавництво ОНУ ім. І. І. Мечникова. 126 с.
5. Стеценко, І. В. (2010). Моделювання систем: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ. 399 с. ISBN 978-966-402-073-9.
6. Алієв, Е. Б., Пацула, О. М., Кутіщев В. Л. (2017). Методика чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією віброуючого решета «Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур: : збірник тез Міжнар. наук. інтернет-конф. (16 листопада 2017, м. Запоріжжя). Запоріжжя: ІОК НААН. 170–171.
7. Badawy, S.I.; Lee, T.J.; Menning, M.M. Effect of drug substance particle size on the characteristics of granulation manufactured in a high-shear mixer. *AAPS PharmSciTech* 2000, 1, E33. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
8. Hoornahad, H.; Koenders, E.A.B. Towards simulation of fresh granular-cement paste material behavior. *Adv. Mater. Res.* 2011, 295–297, 2171–2177. [Google Scholar] [CrossRef]

9. Chen, J.; Zeng, L.; Yin, J. Discrete element method (DEM) analyses of hot-mix asphalt (HMA) mixtures compaction and internal structure. *Adv. Mater. Res.* 2013, 639–640, 1287–1294. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Алієв, Е. Б. (2017). Фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин під дією вібруючого решета. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загально державний міжвід. наук.-техн. зб. 47 (I): 31–39.
11. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М., Гаврильченко, О. С., Кунда, В. Г. (2018). Фізико-математичний апарат взаємодії сипкого матеріалу із віброуючим решетом. Вібрації в техніці та технологіях: всеукр. наук.-техн. журн. Вінниця. 3 (90): 5–10.
12. Remy, B.; Khinast, J.G.; Glasser, B.J. Discrete element simulation of free flowing grains in a four-bladed mixer. *AIChE J.* 2009, 55, 2035–2048. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Алієв, Е. Б., Гаврильченко О. С. (2019). Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насіннєвого матеріалу. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 201: 132–140.
14. Chandratilleke, G.R.; Yu, A.B.; Bridgwater, J. A DEM study of the mixing of particles induced by a flat blade. *Chem. Eng. Sci.* 2012, 79, 54–74. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Chandratilleke, G.R.; Yu, A.B.; Stewart, R.L.; Bridgwater, J. Effects of blade rake angle and gap on particle mixing in a cylindrical mixer. *Powder Technol.* 2009, 193, 303–311. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Siraj, M.S.; Radl, S.; Glasser, B.J.; Khinast, J.G. Effect of blade angle and particle size on powder mixing performance in a rectangular box. *Powder Technol.* 2011, 211, 100–113. [Google Scholar] [CrossRef]

17. Chandratilleke, G.R.; Zhou, C.C.; Yu, A.B.; Bridgwater, J. Effect of blade speed on granular flow and mixing in a cylindrical mixer. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, 49, 5467–5478. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Arndt, T.; Siegmann-Hegerfeld, T.; Fiedor, S.J.; Ottino, J.M.; Lueptow, R.M. Dynamics of granular band formation: Long-term behavior in slurries, parameter space, and tilted cylinders. *Phys. Rev. E* 2005, 71, 011306. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Fiedor, S.J.; Umbanhowar, P.; Ottino, J.M. Effects of fluid viscosity on band segregation dynamics in bidisperse granular slurries. *Phys. Rev. E* 2007, 76, 041302. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
20. Huang, A.N.; Liu, L.C.; Kuo, H.P. The role of end wall shearing in the drum segregation band formation. *Powder Technol.* 2013, 239, 98–104. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Daumann, B.; Fath, A.; Anlauf, H.; Nirschl, H. Determination of the mixing time in a discontinuous powder mixer by using image analysis. *Chem. Eng. Sci.* 2009, 64, 2320–2331. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Cho, J.; Zhu, Y.; Lewkowicz, K.; Lee, S.; Bergman, T.; Chaudhuri, B. Solving granular segregation problems using a biaxial rotary mixer. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 2012, 57–58, 42–50. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б., Доруда, С. О. (2013). Результати моделювання процесу потокового змішування кормосумішей змішувачем-кормороздавачем. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Кіровоградський національний технічний університет. 43 (1): 202–207.
24. Доруда, С. О., Алієв, Е. Б. (2015). До оцінки якості роботи змішувача-кормороздавача потокового типу. Інтенсифікація кормовиробництва – основа сталого розвитку галузі тваринництва: зб. наук. пр., присвяч. 150-й річниці з дня організації Полтавського губерньського земства та 85-річчю заснування Інституту свинарства і АПВ. 75–77.

25. Williams, J.C.; Khan, M.I. The mixing and segregation of particulate solids of different particle size. *Chem. Eng.* 1973, 269, 19–25. [Google Scholar]
26. Shotton, E.; Orr, N.A. Studies on mixing cohesive powders. *J. Pharm. Pharmacol.* 1971, 23, 260. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Muzzio, F.J.; Robinson, P.; Wightman, C.; Dean, B. Sampling practices in powder blending. *Int. J. Pharm.* 1997, 26, 153–178. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Weidenbaum, S.S. Mixing of Solids. *Adv. Chem. Eng.* 1958, 2, 211–321. [Google Scholar]
29. Chou, S.-H.; Song, Y.-L.; Hsiau, S.-S. A study of the mixing index in solid particles. *KONA Powder Part. J.* 2017, 34, 275–281. [Google Scholar] [CrossRef]
30. Huang, A.-N.; Kuo, H.-P. Developments in the tools for the investigation of mixing in particulate systems—A review. *Adv. Powder Technol.* 2014, 25, 163–173. [Google Scholar] [CrossRef]
31. Lee, S.J.; Ahn, H.S.; Lee, J.H.; Kim, G.S.; Cho, J.H. Granule efficiency evaluation process using two-way CFD-DEM coupling analysis. *Chem. Eng. J.* 2024, 498, 155123. [Google Scholar] [CrossRef]
32. Jiang, M.; Zhao, Y.; Liu, G.; Zheng, J. Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer. *Particuology* 2011, 9, 270–278. [Google Scholar] [CrossRef]
33. Pereira, G.G.; Pucilowski, S.; Liffman, K.; Cleary, P.W. Streak patterns in binary granular media in a rotating drum. *Appl. Math. Model.* 2011, 35, 1638–1646. [Google Scholar] [CrossRef]
34. Pereira, G.G.; Sinnott, M.D.; Cleary, P.W.; Liffman, K.; Metcalfe, G.; Šutalo, I.D. Insights from simulations into mechanisms for density segregation of granular mixtures in rotating cylinders. *Granul. Matter* 2011, 13, 53–74. [Google Scholar] [CrossRef]

35. Ren, X.; Xu, J.; Qi, H.; Cui, L.; Ge, W.; Li, J. GPU-based discrete element simulation on a tote blender for performance improvement. *Powder Technol.* 2013, 239, 348–357. [Google Scholar] [CrossRef]
36. Lemieux, M.; Léonard, G.; Doucet, J.; Leclaire, L.A.; Viens, F.; Chaouki, J.; Bertrand, F. Large-scale numerical investigation of solids mixing in a V-blender using the discrete element method. *Powder Technol.* 2008, 181, 205–216. [Google Scholar] [CrossRef]
37. Kim, T.; Kang, B.; Jeon, M.; Chae, S. Recent progress and synthetic methods for single-crystalline cathode in lithium-ion batteries. *Ceramist* 2024, 27, 41–60. [Google Scholar] [CrossRef]
38. Lacey, P.M.C. Developments in the theory of particle mixing. *J. Appl. Chem.* 1954, 4, 257–268. [Google Scholar] [CrossRef]
39. Ansys Inc. *Ansys Rocky Theory Guide*, Release 2024 R2; Ansys Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2024. [Google Scholar]
40. Ansys Inc. *Ansys Rocky CFD Coupling Guide*, Release 2024 R2; Ansys Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2024. [Google Scholar]

## Додатки

Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
 Інженерно-технологічний факультет  
 Кафедра інжинірингу технічних систем

### Чисельне моделювання та порівняння ефективності змішувачів сипких кормів

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-4-24  
**Сеніков Дмитро Андрійович**

Керівник: доктор технічних наук, старший дослідник, професор  
**Алієв Ельчин Бахтияр огли**

Дніпро, 2025

#### Мета і задачі досліджень

2

**Метою даної роботи** є чисельне моделювання та порівняння ефективності різних типів змішувачів сипких кормів з метою визначення оптимального обладнання для підвищення якості суміші та зменшення експлуатаційних витрат. У ході дослідження розглядаються технічні характеристики змішувачів, економічна доцільність їх використання та параметри, що впливають на ефективність змішування.

**Об'єкт дослідження:** процес змішування сипких кормів у різних типах змішувачів, що застосовуються у виробництві комбикормів.

**Предмет дослідження:** ефективність та параметри роботи змішувачів сипких кормів, оцінені за допомогою чисельного моделювання, фізико-механічних властивостей кормових компонентів та економічних показників.

#### **Завдання дослідження:**

- Проаналізувати властивості сипких кормів та їх вплив на процес змішування.
- Охарактеризувати типи та способи змішування, а також класифікацію змішувального обладнання.
- Дослідити можливості чисельного моделювання процесів змішування, застосовуючи методи DEM та CGM.
- Розробити методику чисельного моделювання змішування кормових компонентів із визначенням індексу змішування Лейсі (LMI).
- Провести чисельне моделювання процесів змішування у різних типах змішувачів та порівняти їх ефективність.
- Оцінити економічну доцільність використання різних змішувачів за питомими та приведеними витратами.
- Розглянути питання охорони праці та безпеки під час роботи зі змішувачами сипких кормів.

Технології і технічні засоби змішування сипких кормів 3



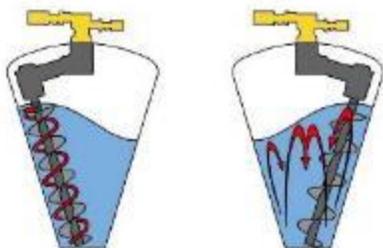
Горизонтальні міксери



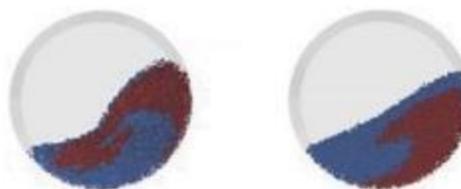
Вертикальні міксери



Барабанні міксери



Конвекційне змішування



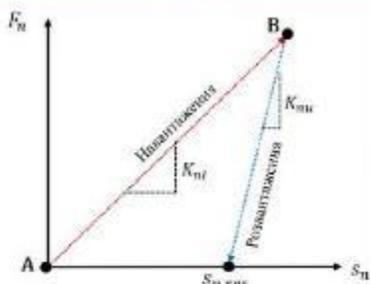
Дифузійне змішування

Індекс змішування Лейсі (LMI)  $LMI = \frac{S_0^2 - S^2}{S_0^2 - S_R^2}$

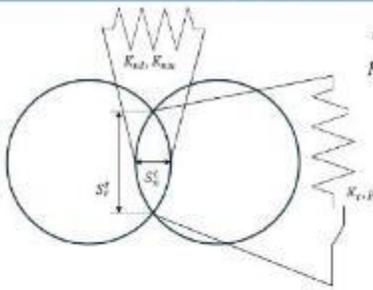
$S_0^2 = \omega_{system}(1 - \omega_{system}), S_R^2 = \omega_{system}(1 - \omega_{system}) \frac{1}{n}, S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^2,$

$\omega_i = \frac{m_{Additive,i}}{m_{Additive,i} + m_{MainProduct,i}}$

Методи дискретних елементів (DEM) і укрупнення частинок (CGM) 4



Залежність між перекриттям та нормальною силою в моделі HLS



Визначення перекриття та жорсткості

$F_n^t = \min (K_n^l S_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_n^u \Delta S_n), \text{if } \Delta S_n \geq 0,$

$F_n^t = \max (F_n^{t-\Delta t} + K_n^u \Delta S_n, \gamma K_n^l S_n^t), \text{if } \Delta S_n < 0,$

$\Delta S_n = S_n^t - S_n^{t-\Delta t}$

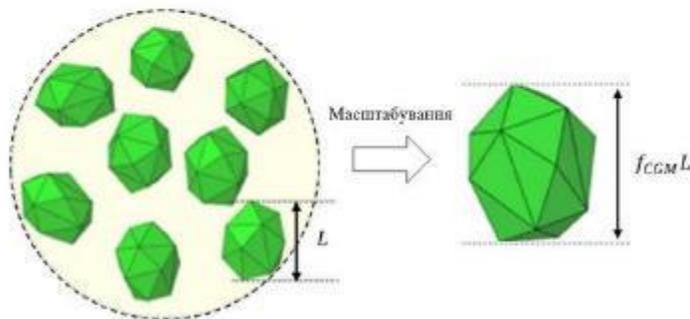
$\frac{1}{K_n^l} = \frac{1}{K_{n,p1}^l} + \frac{1}{K_{n,p2}^l}$

$K_n^u = \frac{K_n^l}{\epsilon^2}$

$K_{n,w}^l = E_w L_w$

$F_n^t = \min (F_{n,e}^t, \mu F_n^t),$

$F_n^t = F_n^{t-\Delta t} - K_n \Delta S_n$



Концептуальна схема методу укрупнення частинок (CGM)

$f_{CGM} = L_{parcel} / L_{real}$

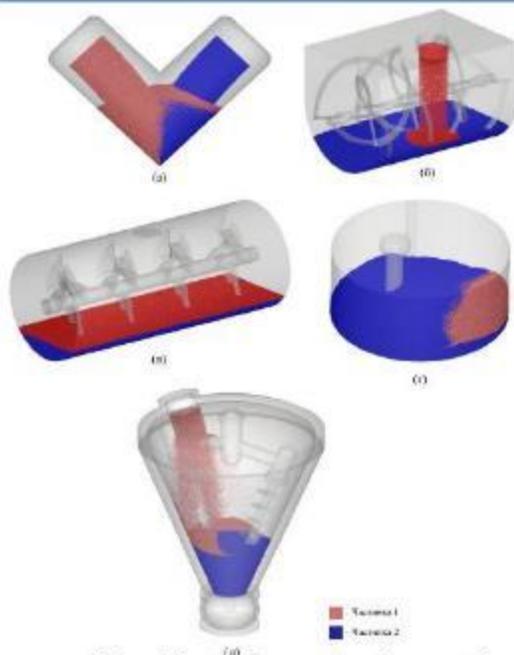
$m_{parcel} = f_{CGM}^3 m_{real}$

$k_{parcel} = \frac{f_{CGM}}{k_{real}}$

$F_{contact, parcel} = f_{CGM}^2 F_{contact, real}$

## Методика чисельного моделювання процесу змішування сипких кормів

5



а – V-подібний обертовий змішувач; б – стрічково-лопатевий змішувач; в – лопатевий змішувач; г – вертикальний лопатевий змішувач; д – кінечно-гвинтовий змішувач  
Початковий просторовий розподіл частинок перед змішуванням

## Фізико-механічні властивості частинок

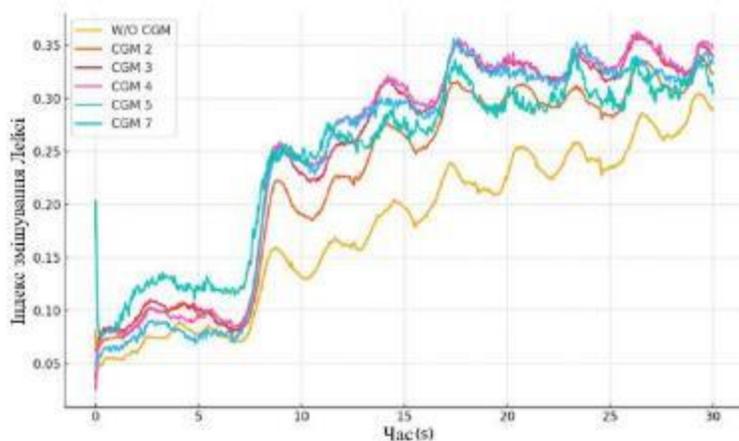
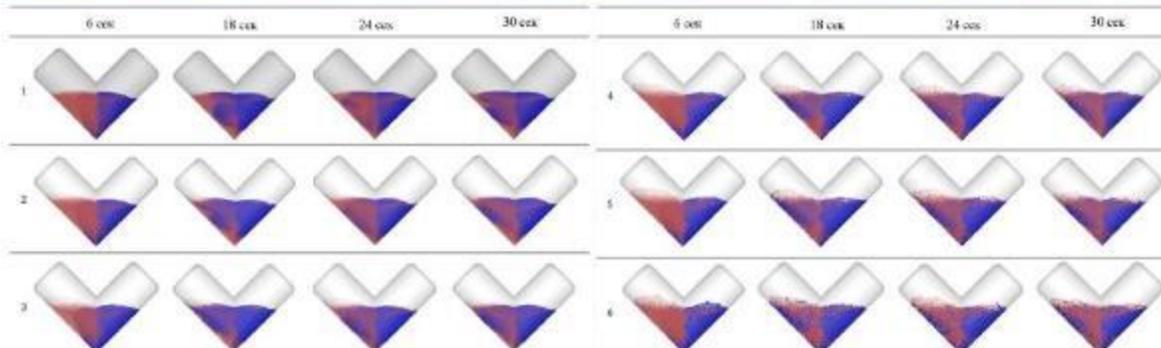
Властивість	Частинка 1	Частинка 2
Густина насипна (кг/м <sup>3</sup> )	1900	1050
Модуль Юнга матеріалу (Н/м <sup>2</sup> )	$5 \times 10^7$	$5 \times 10^7$
Коефіцієнт тертя	0,2	0,2
Коефіцієнт реституції	0,3	0,3

## Розміри та маси частинок для кожного процесу змішування

Тип змішувача	Діаметр частинок 1 (мм)	Діаметр частинок 2 (мм)	Маса частинок 1 (кг)	Маса частинок 2 (кг)
V-подібний барабанний змішувач	3	6	180	100
Стрічковий змішувач	2	4	11	110
Лопатевий змішувач	2	4	84	185
Вертикальний лопатевий змішувач	1	2	3	75
Кінечно-гвинтовий змішувач	2	4	200	250

## Аналіз ефективності змішування у V-подібному барабанному змішувачі

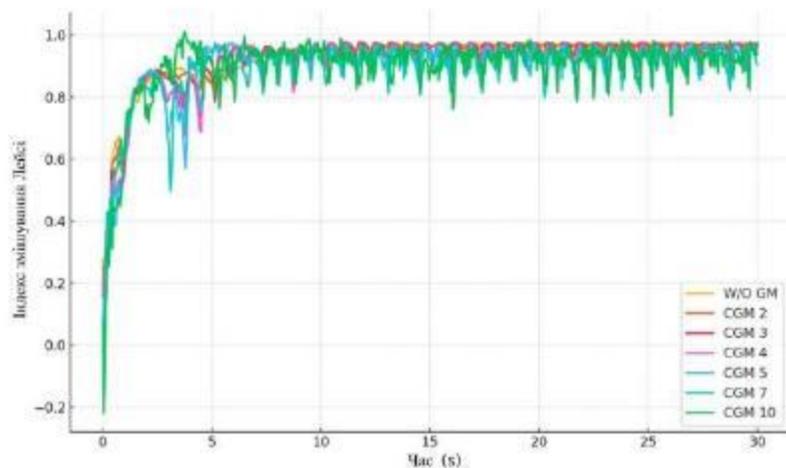
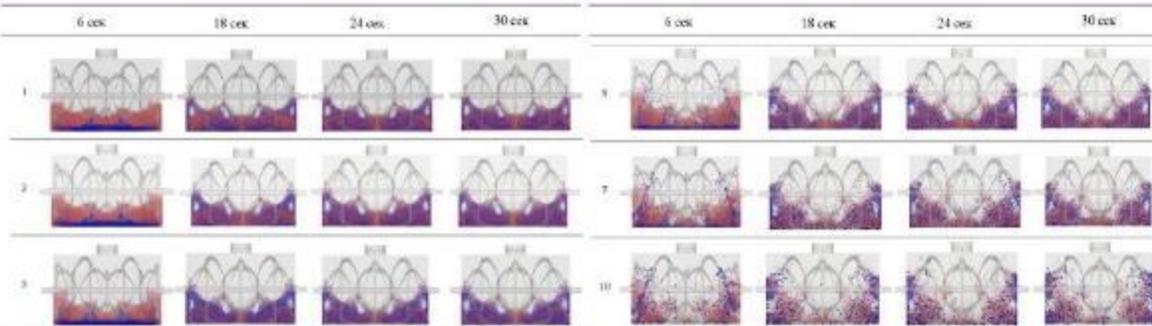
6



Часова еволюція індексу LMI для V-подібного змішувача

## Аналіз ефективності змішування у стрічковому змішувачі

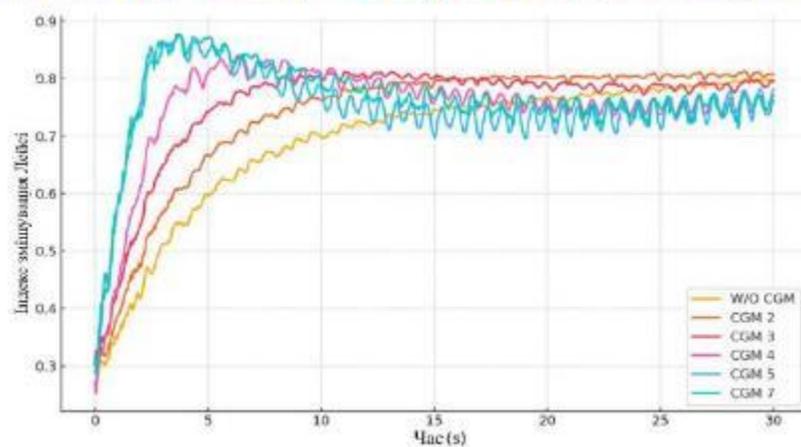
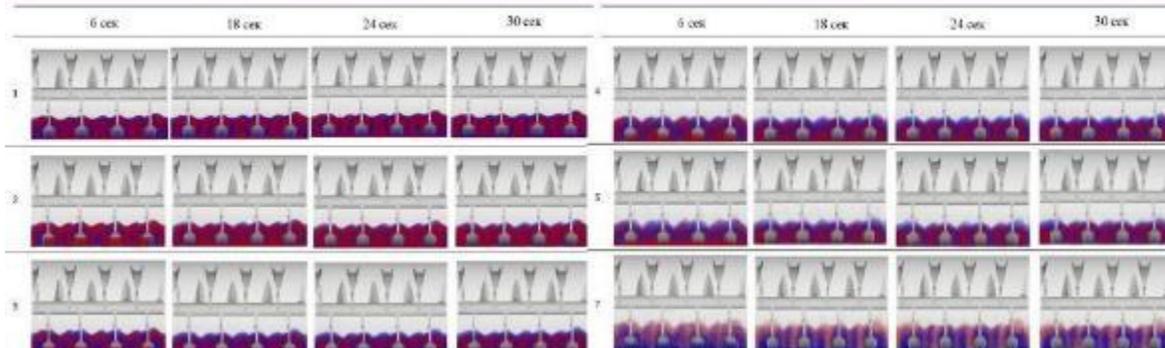
7



Часова еволюція  
індексу LMI для  
різних значень CGM у  
стрічково-лопатевому  
змішувачі

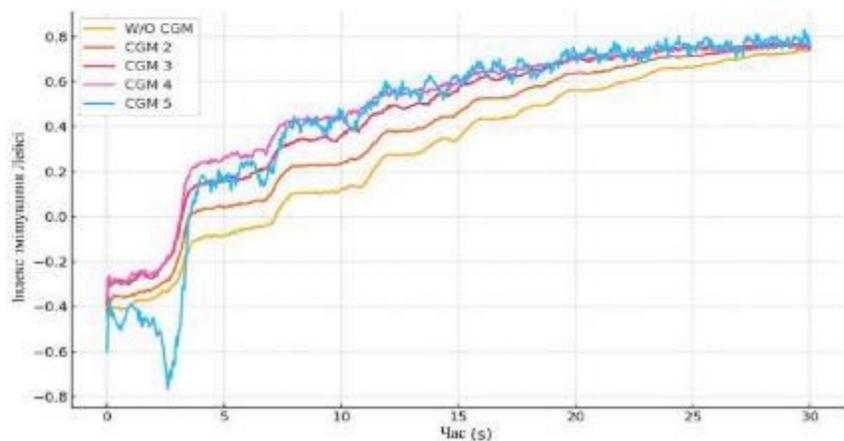
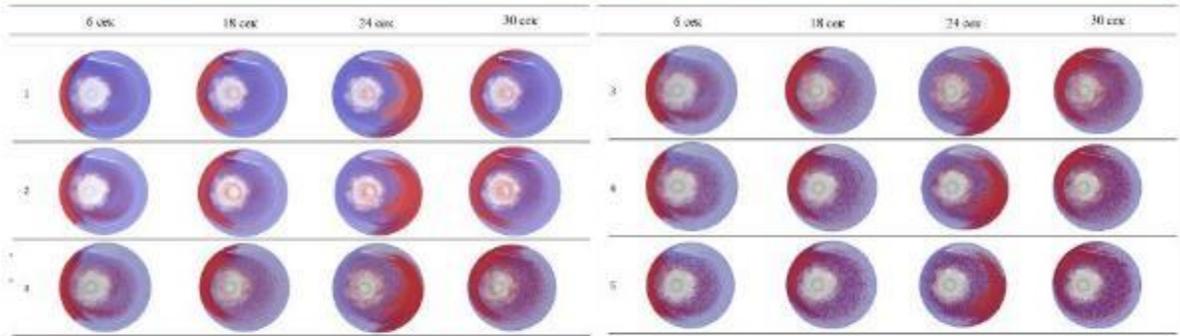
## Аналіз ефективності змішування у лопатевому змішувачі

8



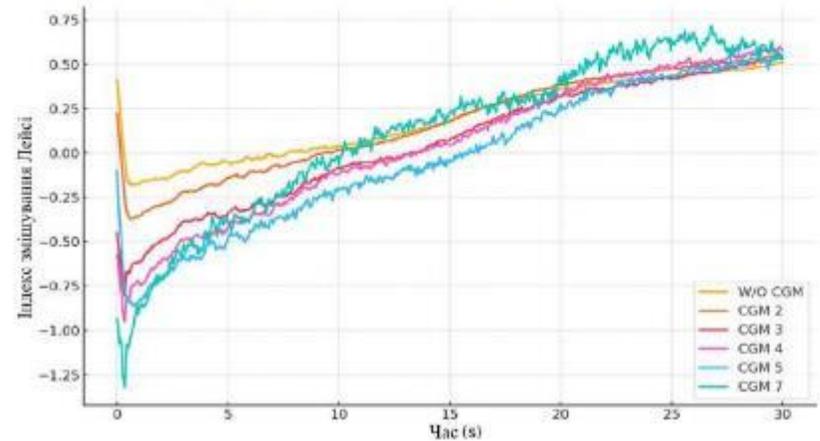
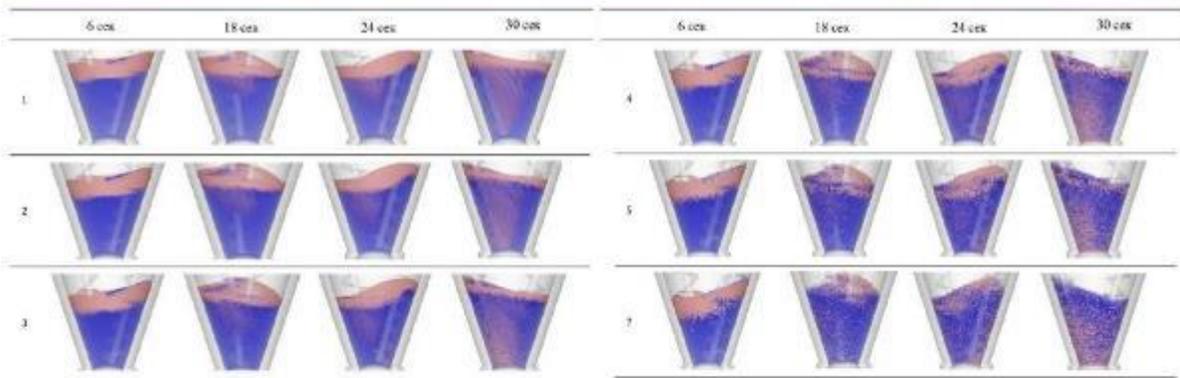
Часова еволюція  
індексу LMI для  
різних значень CGM у  
лопатевому змішувачі

**Аналіз ефективності змішування у вертикальному лопатевому змішувачі 9**



Часова еволюція індексу LMI для різних значень CGM у вертикальному лопатевому змішувачі

**Аналіз ефективності змішування у конічно-гвинтовому змішувачі 10**



Часова еволюція індексу LMI для різних значень CGM у конічно-гвинтовому змішувачі

## Підсумкові результати симуляцій для всіх типів змішувачів

11

Тип змішувача	Кількість частинок Без CGM	Кількість частинок CGM = 7	Тривалість симуляції Без CGM	Тривалість симуляції CGM = 7	Середній LMI Без CGM	Середній LMI CGM = 7
V-подібний змішувач	$4,53 \times 10^9$	$1,32 \times 10^9$	58,5 год	13 хв	0,300	0,324
Стрічковий змішувач	$2,71 \times 10^9$	$2,28 \times 10^9$	125 год	14 хв	0,972	0,928
Лопатевий змішувач	$9,85 \times 10^9$	$2,97 \times 10^9$	186 год	26 хв	0,798	0,754
Вертикальний змішувач	$8,93 \times 10^9$	$7,14 \times 10^9$	500 год	3 год 7 хв	0,734	0,785
Копічко-гвинтовий змішувач	$5,08 \times 10^9$	$1,48 \times 10^9$	114 год	30 хв	0,568	0,576

## Підсумкова таблиця показників економічної ефективності змішувачів

Показник	V-подібний	Стрічково-лопатевий	Лопатевий	Вертикально-лопатевий
Продуктивність, т/год	3,0	10,0	12,0	5,0
Річне навантаження, т/рік	3780	12600	15120	6300
Балансова вартість, тис. грн	600	900	1100	800
Витрати на заробітну плату, грн/т	16,45	4,94	4,11	9,87
Витрати на електроенергію, грн/т	14,40	9,50	9,00	25,92
Амортизаційні відрахування, грн/т	15,87	7,14	7,28	12,70
Витрати на ремонт і ГО, грн/т	5,56	2,50	2,55	4,44
Сумарні експлуатаційні витрати, грн/т	52,28	24,08	22,94	52,93
Питомі приведені витрати, грн/т	76,09	34,79	33,85	71,98

## Висновки

12

- Узагальнено властивості сипких кормів та їх вплив на технологічні процеси, визначено ключові параметри, що формують сипкість, стабільність і поведінку частинок під час змішування. Проаналізовано основні методи та режими змішування, встановлено їх доцільність залежно від характеристик компонентів і вимог до однорідності. Досліджено конструктивні особливості різних типів змішувачів і показано, що вибір оптимального обладнання визначає інтенсивність, якість і енергоефективність процесу. Отримані результати підтверджують, що ефективне змішування сипких кормів можливе лише за умови врахування фізико-механічних властивостей компонентів та правильно вибраного типу змішувального обладнання.
- Обґрунтовано використання методу дискретних елементів (DEM) для моделювання руху частинок сипких кормів та показано потребу в застосуванні методу укрупнення через знані обчислювальні витрати при роботі з дрібними реальними частинками. Використання моделей HLS і LSCL забезпечує точне відтворення нормальних і тангенціальних контактних сил, що підвищує достовірність прототипування процесів змішування. Метод укрупнення частинок (CGM) доведено як ефективний інструмент для зменшення складності DEM-рахунків, за умови контролю поєнбок масштабування.
- Проведено чисельне моделювання процесів змішування сипких кормів із використанням DEM та укрупнення частинок (CGM), що дозволяло оцінити ефективність п'яти типів промислових змішувачів. Застосування уніфікованої DEM-моделі та двоконтактного середовища забезпечило коректне порівняння динаміки перемішування та впливу коефіцієнта укрупнення на точність симуляції. Використання індексу Лейлі (LMI) дозволило кількісно оцінити однорідність суміші та знати вплив стисненого шуму. Розроблена методика забезпечує комплексну оцінку змішувальних систем, визначення допустимих меж CGM та оптимізацію конструкції і режимів роботи промислових змішувачів.
- Дослідження підтвердило ефективність застосування методу укрупнення частинок (CGM) у DEM-симуляціях для п'яти промислових змішувачів: V-подібного барабанного, стрічкового, лопатєвого, вертикального лопатєвого та копічко-гвинтового змішувачів. CGM дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати (до 90%) при збереженні прийнятної точності оцінки однорідності суміші за показом LMI. Виявлено, що глобальна динаміка змішування переважно залежить від макроскопічних потоків, що робить метод корисним для різних масштабів обладнання, хоча на ранніх етапах та за великих коефіцієнтів укрупнення можуть спостерігатися локальні відхилення. Серед змішувачів найкращі результати продемонстрував стрічковий змішувач (LMI = 0,970, похибка 2,54%), за ним – лопатєвий (LMI = 0,798, похибка ≈ 3,42%), вертикальний лопатєвий (LMI = 0,734, похибка ≈ 4,38%), копічко-гвинтовий (LMI = 0,568, похибка 4,54%), а найнижчий рівень змішування та найбільшу чутливість до CGM показав V-подібний барабанний змішувач (LMI = 0,300).
- Охорона праці при роботі зі змішувальними комбінертами є ключовою для безпеки виробництва через механічні, електричні, пилкові, шумові та вибухонебезпечні ризики. Система безпеки повинна включати (захисні кожухи, блокувальні пристрої, аспірація), організаційні та санітарні заходи. Працівники повинні дотримуватися правил завантаження та евакуації, використовувати засоби індивідуального захисту, виконувати очищення та регулювання тільки після повної зупинки обладнання. Особлива увага приділяється запобіганню пиллових вибухів і пожеж, регулюванню напруги робочих поверхонь та контролю систем аспірації.
- Економічна ефективність змішувачів для сипких кормів визначається питомими експлуатаційними витратами, що включають оплату праці, електроенергію, амортизацію та ремонт. Розрахунки показали, що найнижчі витрати мають лопатєвий (22,94 грн/т) та стрічково-лопатєвий змішувачі (24,08 грн/т), тоді як V-подібний (52,28 грн/т) і вертикально-лопатєвий змішувачі (52,93 грн/т) значно дорожчі. За питомими приведеними витратами найекономічнішими є лопатєвий (33,85 грн/т) та стрічково-лопатєвий (34,79 грн/т) змішувачі. Отже, для оптимізації виробничих витрат у кормокоду доцільніше використовувати лопатєві та стрічково-лопатєві змішувачі.