

УДК 621.928.3:532.135:531.3:004.942:004.932

ЩЕРБИНА В. Ю.*, КОЧЕРГА А. Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ЧАСТИНОК МАТЕРІАЛУ В ТРУБНИХ ОБЕРТОВИХ АПАРАТАХ

Робота присвячена комплексному аналізу гідродинаміки та кінематики руху гранульованого сипкого матеріалу у трубних обертових апаратах. Метою дослідження є виявлення закономірностей поведінки дисперсного потоку шляхом зіставлення експериментальних даних і числового моделювання. Проведені дослідження руху частинок різної форми та типів, характерних для широкого спектра промислових процесів. На лабораторній установці було здійснено відеозапис, а наступна цифрова обробка даних дозволила чітко визначити координати, траєкторії та локальні швидкості частинок. Розмір гранул в експериментальних дослідженнях становив 3–6 мм при заповненні барабана 4–32 % та швидкості 4–85 об/хв проаналізовано траєкторії й поля швидкостей частинок. Виявлено структуру шару з активною та пасивною зонами та формування циркуляційного ядра із замкнутими контурами руху. Максимальні швидкості (0,82–2,2 м/с) спостерігаються у відкритому шарі, мінімальні (~0,041 м/с) – у пасивній зоні. Порівняння з математичною моделлю показало збіжність із похибкою 4–15 %, що підтверджує адекватність моделювання. Розроблена методологія, що поєднує відеоаналіз, інтерполяцію, числове моделювання та статистичну обробку, забезпечує отримання точних кінематичних характеристик руху сипких матеріалів у барабані, що обертається. Результати підтверджують інформативність та практичну придатність методики для інженерної практики та наукових досліджень, зокрема для оптимізації конструкцій, режимів роботи, удосконалення моделей та прогнозування поведінки матеріалів у промислових умовах.

Ключові слова: обертовий барабан, сипкі матеріали, відеозапис, моделювання, траєкторія руху, кінематика гранул, циркуляційне ядро, швидкість

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2025.348813

*Corresponding author: xpsm@ukr.net

Received 12 August 2025; Accepted 09 October 2025

Постановка проблеми. Багато виробництв у хімічній, харчовій, нафтохімічній, металургійній, гірничорудній та інших галузях промисловості пов'язані з переробкою дрібнодисперсних сипких матеріалів. Такі матеріали характеризуються низькою специфічними властивостями, зокрема злежуватістю, низькою газопроникністю, підвищеною пильністю та схильністю до агрегації, що істотно ускладнює перебіг хімічних реакцій, а також процесів тепло- і масообміну.

Враховуючи специфічні властивості сипких матеріалів, функціональні, економічні та експлуатаційні критерії під час вибору обладнання для їх оброблення переважно надається обертовим апаратам барабанного типу [1, 2]. До таких апаратів відносяться обертові печі, сушарки, гранулятори, барабани охолоджувачі та інші трубні обертові апарати, що широко застосовуються в технологічних процесах хімічної, будівельної, фармацевтичної, харчової та гірничо-збагачувальної промисловості.

Ефективність роботи трубних обертових апаратів значною мірою визначається характером руху та взаємодією частинок сипкого матеріалу в обертовому робочому просторі [3, 4]. Гідродинамічні режими руху частинок безпосередньо впливають на інтенсивність перемішування, тривалість перебування матеріалу в апараті, рівномірність температурного поля та ефективність тепло- і масообміну. Водночас у промисловій практиці параметри режимів роботи таких апаратів часто визначаються емпірично, що обмежує можливості оптимізації їх конструкції та експлуатації.

Аналіз попередніх досліджень. Складність дослідження поведінки сипких матеріалів у барабанних апаратах зумовлена багатофакторною природою процесів, що в них відбуваються. Рух твердої фази визначається численними параметрами, зокрема швидкістю обертання, ступенем заповнення апарата, формою, розмірами, морфологією частинок та рядом інших факторів. Вказане призводить до того, що емпіричні підходи або спрощені теоретичні моделі часто є недостатньо адекватними для достовірного прогнозування поведінки матеріалу в конкретних умовах експлуатації. У зв'язку з цим сучасні експериментальні дослідження спрямовані на поглиблене вивчення кінематики та динаміки руху сипких матеріалів у барабанних апаратах з урахуванням морфології частинок, а застосування методів PIV/PTV дає змогу отримувати достовірні просторово-часові дані, необхідні для уточнення і прогнозування поведінки матеріалу в реальних умовах.

Робота Ristori et al. [5] спрямована на числове моделювання руху сипких матеріалів за допомогою методу дискретних елементів (DEM). Цей метод дозволяє детально дослідити взаємодію між окремими частинками. Проте не враховано вплив форми частинок на загальну динаміку руху, що є істотним недоліком, оскільки форма частинок ще більше впливає на характер їхньої взаємодії, що в свою чергу, може мати великий вплив на ефективність роботи барабана.

В роботі [6] Kwarong et al. запропонували математичну модель для прогнозування руху сипких матеріалів у барабанах, але робота переважно зосереджена на сферичних частинках. Це обмеження моделі не враховує вплив форми та структури частинок на динаміку, що може призвести до спотворених результатів.

Дослідження Galvin et al. [7] показало, що форма частинок суттєво впливає на коефіцієнт зовнішнього тертя, що визначає режим руху матеріалу. Але вказане дослідження не включало комплексне моделювання, яке б враховувало всі фактори, що впливають на динаміку сипких матеріалів, зокрема, властивості матеріалу, такі як вологість або температура, нерівності поверхні барабана, які можуть суттєво змінити динаміку руху сипких матеріалів.

У роботі Liu та ін. [8] проведено експериментальне вивчення теплообміну в нагрівальних обертових барабанах із використанням інфрачервоної термографії та PTV. Показано, що збільшення швидкості обертання сприяє збільшенню коефіцієнта теплопередачі. Проте наведені результати отримано лише для барабана діаметром 0,1 м і довжиною 0,01 м, що зумовлює істотний вплив крайових ефектів і, відповідно, обмежує можливість узагальнення виявлених закономірностей.

У роботі Wang W. та співавт. [9] проведено порівняльне дослідження сегрегації частинок різної форми (сфери та куби) в обертовому барабані. Автори показали, що форма істотно впливає на динаміку сегрегації незалежно від розміру частинок. Так кубічні частинки меншого розміру суттєво зменшують рівень сегрегації за рахунок зниження швидкості зсуву в центральній частині барабана. Проте дослідження спрямоване головним чином на аналіз дрібних частинок, а вплив великих частинок залишилися не вивченим, тобто не враховує важливі елементи динаміки системи.

Загалом вказані недоліки робіт підкреслюють потребу в подальшому дослідженні, яке б включало ширший спектр форм частинок, зовнішніх умов і додаткових варіантів експериментів для більш детального розуміння механізмів поведінки сипких матеріалів у барабанних апаратах. Крім того значна частина досліджень виконано виключно для монодисперсних частинок, тоді як у більшості промислових процесів використовуються полідисперсні сипкі матеріали. Також зазвичай експерименти проводяться за низькими кутовими швидкостями обертання, що не дозволяє охопити весь спектр режимів течії в барабані, зокрема перехідний, водоспадний та інші характерні режими.

Таким чином наявні теоретичні та експериментальні дослідження руху сипких матеріалів в обертових апаратах не повною мірою враховують вплив параметрів трубних апаратів, швидкості обертання, ступеня заповнення та фізико-механічних властивостей матеріалу на формування режимів руху частинок. Це зумовлює необхідність подальшого комплексного дослідження кінематики та динаміки сипкого середовища з метою підвищення ефективності технологічних процесів і надійності обладнання.

Метою даного дослідження є комплексний експериментальний аналіз кінематики сипкого матеріалу різної форми (пласкої, циліндричної та пірамідальної) в трубчастому барабанному апараті для встановлення залежності траєкторій руху та швидкостей частинок від геометричних характеристик матеріалу та режимів роботи. Також передбачається розробка методики обробки даних, що включає створення, застосування та адаптацію методів PIV/PTV для точного отримання векторних полів швидкостей, побудову регулярної сітки аналізу потоку, а інтерполяція і візуалізація результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Експериментальна установка. На кафедрі ХПСМ НТУУ «КПІ» впроваджена лабораторна установка та розроблена методика визначення швидкостей і траєкторій руху сипких матеріалів в барабанних апаратах [10]. Схема установки приведена на рис. 1. Вона складається з наступних конструктивних елементів: барабану 1, що включає прозорий та металевий диски і обичайки. Розмір робочої камери складає $\varnothing 485 \times 175$ мм. Всередині барабану обичайка має змінне внутрішнє покриття 2, заміна якого дозволяє моделювати різне зовнішнє тертя і пересипні полиці, між сипким матеріалом та корпусом обертового апарату. Перед барабаном встановлено прозорий нерухомий диск 5, на якому в циліндричній системі координат нанесена шкала. Вказаний диск 5 дозволяє візуально визначити стабілізацію руху для проведення кінозйомки. Металевий диск барабану 1 поєднаний з приводом 3. Барабан, привід і прозорий нерухомий диск змонтовані на рамі 4. Над барабаном знаходиться панель індикації та управління 6. Співвісно з барабаном встановлена відеокамера 7.

Лабораторна установка працює наступним чином. Привідний механізм забезпечує рух барабану із швидкістю від 0,1 до 100 обертів за хвилину. Сипкий матеріал завантажується через бокову стінку барабана. Стандартна кількість завантаження становить 1 кг, 3 кг, 5 кг. Після встановлення сталого режиму руху матеріалу відбувається запис на камеру, яка має розширення 1920×1080 пк та частоту 60 кадрів за секунду. Експлуатація установки дозволяє зробити висновок про те, що при дослідженнях помилка вимірювання, визначена за рахунок постійної швидкості обертання барабану, не перевищує (5–7) %.

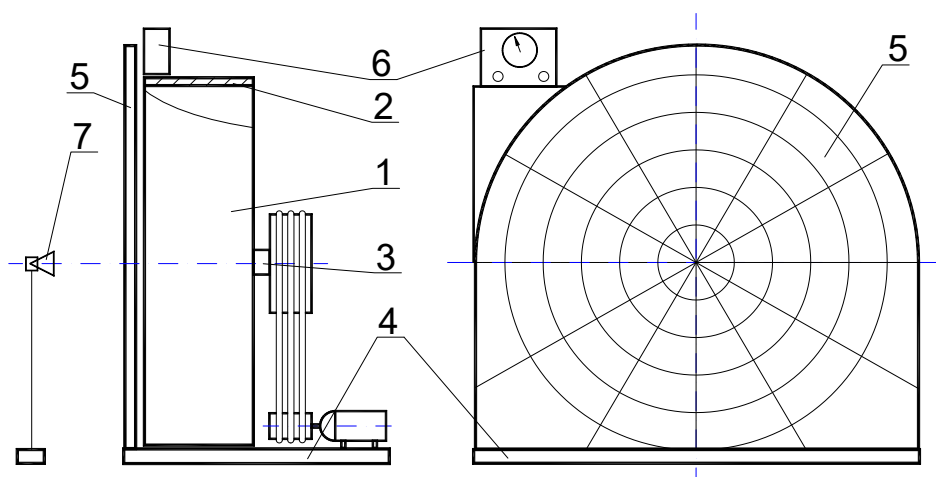


Рис. 1 – Схема експериментальної установки:

1 – барабан; 2 – внутрішнє покриття барабану; 3 – привід; 4 – рама; 5 – прозорий диск зі шкалою;
6 – панель індикації та управління; 7 – відеокамера

Установка дозволяє досліджувати різні режими руху сипкого матеріалу включаючи ковзання, перекочування, каскадний, водоспадний та центрифугування (рис. 2).

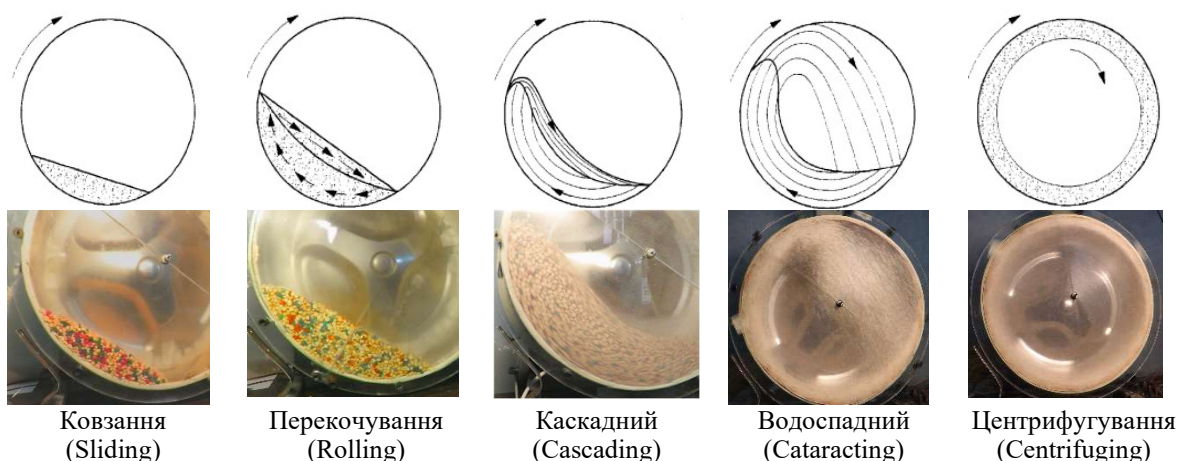


Рис. 2 – Режим руху сипкого матеріалу на експериментальній установці

Методи обробки отриманих результатів. Після дозованого завантаження в барабан експериментальної установки сипкого матеріалу, деякі частинки якого були заздалегідь забарвлені для візуалізації, та досягнення сталого режиму руху, процес змішування фіксується відеокамерою. Відеоряд розбивається на окремі кадри з кроком 0,020 секунди, за якими розраховуються траєкторії та швидкості руху окремих частинок.

Для аналізу даних було розроблено три методи: автоматизований режим, інтерактивний режим для аналізу швидкості переміщення окремих частинок сипкого матеріалу, а також інтерактивний режим для визначення траєкторії руху. Спрощені схеми методів обробки результатів експерименту показано на рис. 3. Такий підхід дозволяє аналізувати дані отримані під час експерименту. Розроблене програмне забезпечення дає можливість автоматично виявляти та ідентифікувати частинки сипкого матеріалу в заданій області та відслідковувати траєкторію руху.

При використанні автоматизованого режиму (рис. 3а) програмне забезпечення автоматично виявляє та ідентифікує частинки сипкого матеріалу на виділеній ділянці. Інтерактивний режим (рис. 3б) для визначення позиції частинки та швидкості руху передбачає безпосереднє маркування частинок. Інтерактивний режим відстеження траєкторій (рис. 3в) реалізується шляхом поетапного виділення частинок на послідовних кадрах, отриманих кадріванням відеозапису.

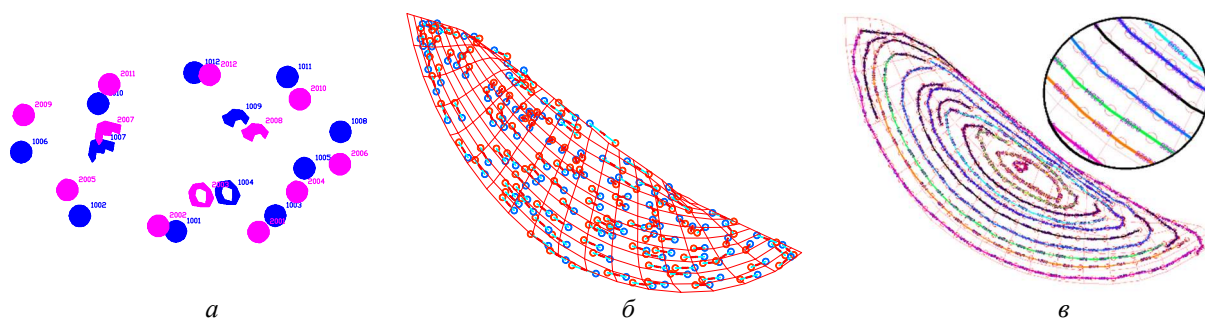


Рис. 3 – Режим обробки результатів:

а) автоматизований режим; б) інтерактивний аналізу швидкості; в) інтерактивний визначення траєкторії руху

Визначення швидкостей руху та траєкторій частинок здійснюється за допомогою програмного забезпечення виконаного на AutoLisp у середовищі AutoCAD. Результати розрахунків експортуються у файли форматів, сумісних із MS Excel, для подальшого статистичного аналізу. На основі отриманих даних за допомогою алгоритмів AutoLisp генерується сіткова модель, візуалізація та поглиблена обробка якої виконується в середовищі ParaView.

Після нанесення сіткової області на досліджувану геометрію об'єкта визначаються швидкості для вузлів сітки з використанням методу зворотних зважених відстаней (Inverse Distance Weighting — IDW). В основі методу лежить припущення, що частинки сипкого матеріалу, розташовані близько одна до одної, мають подібні властивості. Для обчислення невідомого значення використовується масив опорних точок в зоні вузла, що визначається. Значення кожної опорної точки зменшується при збільшенні відстані до неї, що дозволяє враховувати локальні особливості області яка досліджуваної. Збільшення кількості опорних точок підвищує точності апроксимації. Метод IDW є універсальним, забезпечує високу точність розрахунків та ефективно реалізується програмно.

Значення функції для довільної точки, по методу IDW, визначається рівнянням:

$$P_i = \sum_{j=1}^G \frac{P_j}{D_{ij}^n} \bigg/ \sum_{j=1}^G \frac{1}{D_{ij}^n},$$

де: P_i – значення в точці, яке потрібно визначити; P_j – значення у вузлах інтерполяції j ; D_{ij} – відстань між i -тою та j -тою точками; G – кількість вузлів інтерполяції; n – ступінь, до якої зводяться відстані (прийнято $n = 2$).

Аналіз та обробка отриманих результатів здійснюється за допомогою програмного комплексу, що поєднує можливості середовища ParaView за допомогою розробленого програмного забезпечення на C++. Це дозволяє візуалізувати розрахункові сітки, ізоповерхні, поля швидкостей та векторні поля. Крім того, комплекс забезпечує побудову ліній току та виконання алгебраїчних перетворень над заданими масивами даних. Для інтегрування рівнянь ліній току застосовано чисельний метод Рунге – Кутти четвертого порядку точності.

Для забезпечення достовірності вимірювань проводиться детальний метрологічний аналіз, що включає розрахунок середньоарифметичного значення, дисперсії та усередненої квадратичної похибки. Результати зберігаються у файлі формату Excel, а візуалізація виконується в середовищі AutoCAD з використанням програм на AutoLISP. Приклад використання наведений на рис. 4.

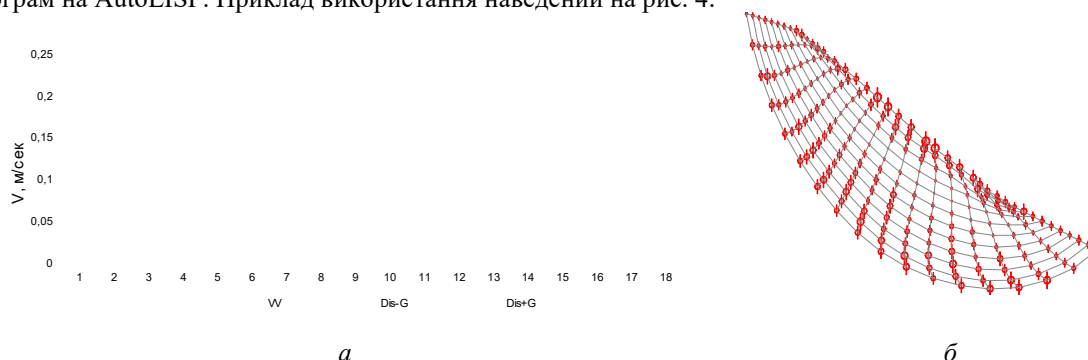


Рис. 4 – Статистична обробка даних

а) визначення довірчого інтервалу; б) візуалізація даних довірчого інтервалу

Результати експериментальних досліджень

Дослідження проводилися з використанням трьох типів сипких матеріалів різної форми:

1. Матеріал плоскої/напівсферичної форми (діаметр частинок 4–6 мм, об'ємна вага 1040 кг/м³)
2. Матеріал пірамідальної форми (розмір зерна 2,2–4,2 мм, об'ємна вага 800 кг/м³)
3. Матеріал циліндричної форми (діаметр частинок 3–4 мм, об'ємна вага 785 кг/м³)

Для кожного типу матеріалу проводилися експерименти при різних умовах завантаження (1–5 кг) та швидкостях обертання барабана (від 2 до 85 об/хв). Для визначення траєкторій руху та швидкостей частинок використовувалися спеціальні маркери, що дозволяли відстежувати рух окремих частинок.

Наведено кілька характерних варіантів руху частинок матеріалу на рис. 5. Кожен режим проілюстровано послідовністю епюр, що представляють загальну швидкість V , а також складові V_x та V_y . Додатково наведено поле векторів швидкості, яке дозволяє оцінити характерні значення швидкостей і кути нахилу потоку для подальшого кількісного аналізу.

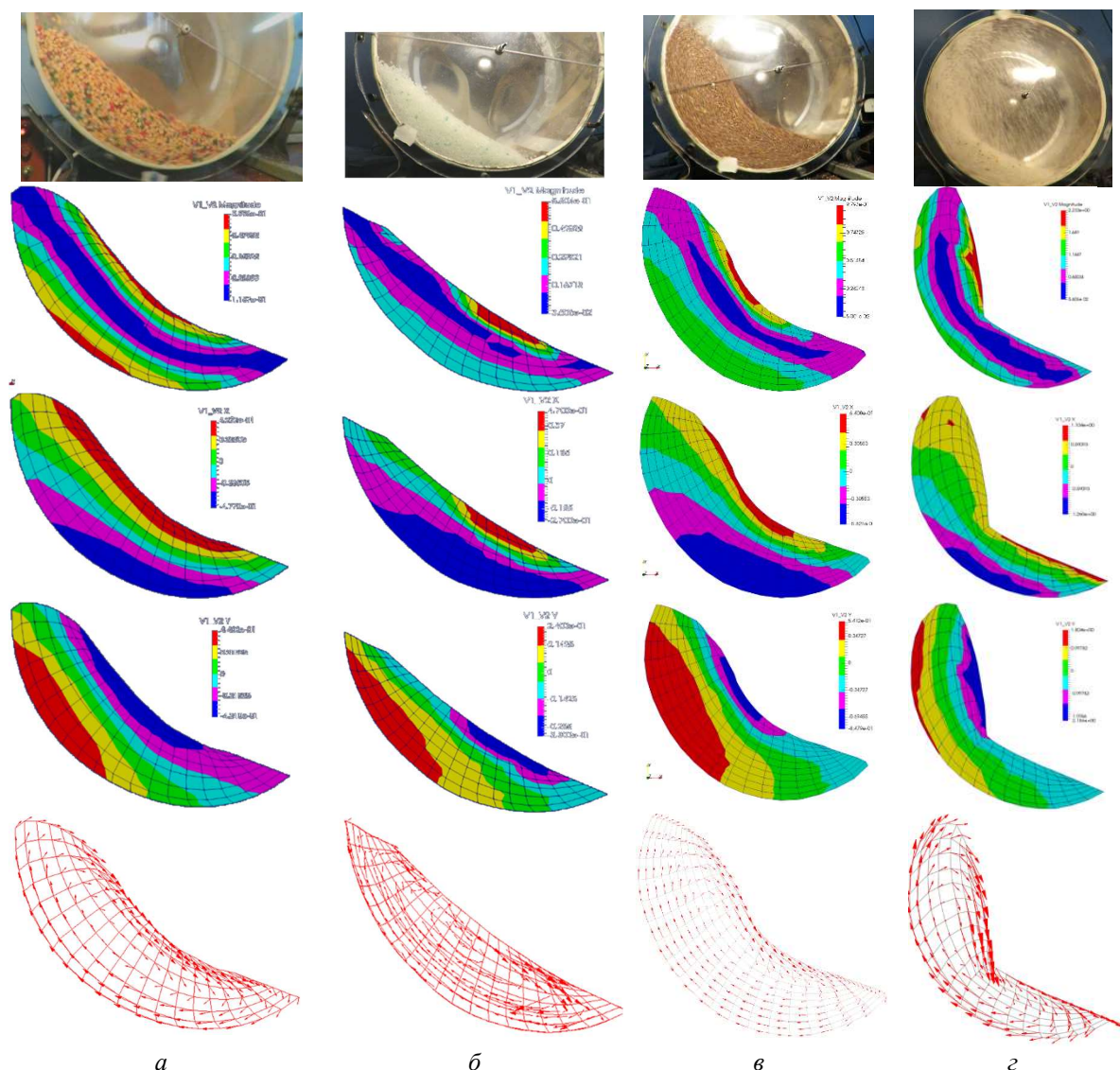


Рис. 5 – Експериментальні дослідження

- a) Рух частинок плоскої форми при $G = 3$ кг; $W = 35,3$ об/хв;
 б) Рух частинок циліндричної форми при $G = 1$ кг; $W = 12,0$ об/хв;
 в) Рух частинок пірамідальної форми при $G = 4$ кг; $W = 12,6$ об/хв;
 з) Рух частинок циліндричної форми при $G = 2$ кг; $W = 85$ об/хв.*

Таким чином, використовуючи отримане поле векторів швидкості, можливо не лише проаналізувати поведінку та траєкторії окремих частинок, але й визначити функцію току, що є важливим для дослідження процесів переміщення сипкого матеріалу в обертових апаратах. Це дозволяє вивчати ефекти механічного змішування й агломерації, а також оптимізувати технологічні параметри для підвищення ефективності обертового апарату. Отримані результати дають можливість зрозуміти взаємодію та траєкторію руху частинок, що дає змогу вдосконалити конструкцію апарату з метою досягнення максимальної продукції при мінімальних енергетичних витратах.

В результаті проведених експериментів встановлено, що геометрична форма частинок є суттєвим фактором, що визначає режим руху матеріалу та розподіл швидкостей сипкого матеріалу в барабанних апаратах. Для всіх типів матеріалів спостерігається утворення циркуляційного ядра, навколо якого сипкий матеріал рухається по замкнутому контуру. Однак характеристики цього ядра (розмір, положення, форма) суттєво відрізняються залежно від геометрії частинок. Результати підтверджують, що циркуляційне ядро є універсальним явищем для сипких матеріалів у обертових барабанах з параметрами які залежать від властивостей матеріалу.

Порівняльний аналіз поведінки матеріалів при обертанні барабану виявив суттєві відмінності, для різної форми матеріалу. Аналіз швидкостей руху частинок для матеріалу пласкої (напівсферичної) форми (рис. 5а) показав, що максимальна швидкість становить $V = 0,28$ м/сек і спостерігається в зоні контакту з боковою стінкою. По мірі наближення до циркуляційного ядра середня швидкість зменшується до $V = 0,041$ м/сек. З іншого боку, швидкість матеріалу, що знаходиться вище циркуляційного ядра, збільшується при віддаленні, досягаючи максимальної швидкості на відкритій поверхні $V = 0,82$ м/сек.

Частинки пласкої (напівсферичної) форми характеризуються незначним коефіцієнтом внутрішнього тертя в діапазоні 0,44–0,53 та коефіцієнтом тертя об внутрішню поверхню 0,26–0,35. Це створює типовий каскадний режим з плавним циркулюванням навколо ядра.

Низький коефіцієнт тертя об стінку дозволяє частинкам частково ковзати (режим ковзання), що обмежує висоту підйому матеріалу перед його зсувом. В результаті, максимальна швидкість 0,82 м/сек досягається на відкритій поверхні, де частинки можуть вільно переміщуватись.

Для матеріалу пірамідальної форми (рис. 5в) максимальна швидкість становить $V = 0,97$ м/сек і знаходиться в шарі, який найближче до центру барабана. По мірі приближення до циркуляційного ядра середня швидкість зменшується до $V = 0,27$ м/сек. Максимальна швидкість частинок біля периферії барабану становить $V = 0,6$ м/сек.

На відміну від часток пласкої форми, частинки пірамідальної форми мають високий коефіцієнт внутрішнього тертя в межах 2,4–3,4, що більш ніж у 5 разів перевищує показники для пласких частинок. Значне внутрішнє зчеплення призводить до формування більш жорсткої структури шару, що поводить ся подібно до псевдотвердого тіла, дозволяючи піднімати матеріал на більшу висоту навіть при низьких швидкостях обертання до моменту обвалення поверхневого шару. Фрикційні властивості також впливають на швидкості всередині барабана, формуючи особливі моделі руху для кожного типу матеріалу.

Визначено, що пірамідальні частинки мають вищу максимальну швидкість на вільній поверхні (0,97 м/сек) порівняно з пласкими (0,82 м/сек) за однакових умов (12,6 об/хв). Це пояснюється ефектом механічного блокування, спричиненим складною морфологією пірамідальних частинок. Замість простого кочення, нерівні частинки ефективніше передають обертальний імпульс у глибину маси, що призводить до вищої загальної швидкості руху на вільній поверхні. Це доводить, що морфологія може домінувати над іншими фрикційними параметрами.

Порівняння з роботою [7] показує, що отримані дані про вплив форми частинок на коефіцієнт зовнішнього тертя узгоджуються з їхніми висновками. Наприклад, матеріал пірамідальної форми з коефіцієнтом внутрішнього тертя 2,4–3,4 демонструє більш високі швидкості руху порівняно з матеріалом пласкої форми з коефіцієнтом внутрішнього тертя 0,44–0,53.

Для матеріалу циліндричної форми (рис. 5б, 5г) максимальна загальна швидкість становить $V = 2,2$ м/сек і знаходиться в зоні водоспадного режиму руху матеріалу. Максимальна горизонтальна складова швидкості становить $V_x = 1,1$ м/сек і знаходиться на відкритій поверхні сегменту матеріалу в каскадному режимі. Максимальна вертикальна складова становить $V_y = 1,8$ м/сек знаходиться в зоні контакту матеріалу з поверхнею барабану.

Зростання максимальної швидкості до 2,2 м/сек (у 2,7 рази більше, ніж у каскадному режимі) свідчить про домінування інерційних та відцентрових сил. Локалізація максимальної вертикальної складової біля стінки показує інтенсивне вертикальне прискорення, отримане матеріалом безпосередньо перед його відривом, що є ключовим елементом наближення до режиму центрифугування.

Результати підтверджують важливість врахування форми частинок при проєктуванні барабанних апаратів. Максимальна швидкість для циліндричних частинок (2,2 м/сек) значно перевищує показники для пласкої форми (0,82 м/сек) при аналогічних умовах. Це має важливе значення для процесів, де інтенсивність зіткнень частинок впливає на ефективність, таких як змішування або грануляція. При високих обертах (85 об/хв) циліндричні частинки демонструють чіткий водоспадний режим який характеризується утворенням двох циркуляційних контурів: один у шарі каскадного режиму руху, інший у шарі водоспадного режиму.

Висока відповідність між розрахунковими та експериментальними даними для пірамідальних частинок (4,86 % відхилення) свідчить про правильне врахування впливу значного тертя. Для плоских частинок модель показала вищий рівень розбіжності 15,28 %. Експериментальні дані підтвердили критичну важливість врахування коефіцієнтів тертя та динамічної в'язкості для частинок різної морфології при моделюванні, проектуванні та експлуатації барабанних апаратів. Точне визначення цих параметрів дозволяє прогнозувати режими руху сипких матеріалів, оптимізувати швидкість обертання та геометричні характеристики обладнання, що безпосередньо впливає на ефективність процесів змішування, сушіння та грануляції.

Висновки. Представлена робота присвячена вивченню гідродинаміки руху сипких матеріалів різної форми в барабанних апаратах. Запропоновано методологію обробки експериментальних даних, що поєднує ручне та автоматизоване відстеження руху частинок. Основні висновки можна сформулювати наступним чином:

1) Проведено комплексне експериментальне дослідження впливу геометричної форми частинок матеріалу (пласка, циліндрична та пірамідальна) на гідродинаміку потоку в барабанному апараті. Дані експериментів підтвердили необхідність враховувати тертя та динамічний коефіцієнт в'язкості частинок різних типів при математичному моделюванні, проектуванні, що дозволяє більш точно прогнозувати поведінку сипких матеріалів у барабанних апаратах.

2) Розроблено та використано комплексну методологію обробки експериментальних даних, що поєднує ручне відстеження руху частинок (інтерактивні режими) та автоматизовану обробку. Розроблено три окремі методи оцінки з відповідним програмним забезпеченням, які дозволяють порівнювати результати та оцінювати похибки.

3) Використання методу IDW-інтерполяції для даних для аналізу експериментальних даних траєкторій частинок дозволяє формувати повні поля швидкості на сіткових моделях та здійснювати візуалізацію векторних полів і функцій току, що забезпечує перехід від дискретних експериментальних вимірювань до їх континуального представлення.

4) Виконана перевірка використаних математичних методів шляхом безпосереднього зіставлення експериментально отриманих та розрахованих функцій потоку. Доведено адекватність розрахунків при різних режимах роботи барабанного апарата.

Отримані результати мають важливе практичне значення для проектування барабанних апаратів, дозволяючи враховувати морфологічні характеристики сипких матеріалів при визначенні оптимальних режимів роботи. Практична цінність роботи полягає у створенні достовірної, експериментально підтвердженої моделі, яка може бути використана для проектування, оптимізації та підвищення енергоефективності трубчастих обертючих апаратів.

Врахування форми частинок та їх фрикційних властивостей сприяє підвищенню ефективності масо- та теплообміну, інтенсифікації змішування та продуктивності хімічних процесів у барабанних системах. Виявлені залежності дозволяють удосконалити математичні моделі та конструкцію обладнання, що сприяє підвищенню енергоефективності процесів та якості продукції.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачена розробка та використання математичної моделі для опису гідродинаміки потоку, теплообміну та визначення впливу конструктивних елементів барабана.

Список використаної літератури

1. Trojosky M. *Rotary drums for efficient drying and cooling* / M. Trojosky // *Drying Technology*. 2019. Vol. 37, No. 5. P. 632–651. DOI: 10.1080/07373937.2018.1552597.
2. Arseni A. M. G., Monaco De G., Greco F., Maffettone P. L. Granular flow in rotating drums through simulations adopting a continuum constitutive equation / A. M. G. Arseni, G. Monaco De, F. Greco, P. L. Maffettone // *Physics of Fluids*. 2020. Vol. 32, No. 093305. DOI: 10.1063/5.0018694.
3. Arseni A. M. G., Monaco De G., Greco F., Maffettone P. L. Granular flow in rotating drums through simulations adopting a continuum constitutive equation / A. M. G. Arseni, G. Monaco De, F. Greco, P. L. Maffettone // *Physics of Fluids*. 2020. Vol. 32, No. 093305. DOI: 10.1063/5.0018694.
4. Chatre L., Lemerle X., Bataille M., Herbelet F., Randriamanantena T., *et al.* Numerical study of dense powder flow in a rotating drum: comparison of CFD to experimental measurements // *Powder Technology*. 2024. Vol. 444. P. 119981. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119981
5. Ristori T., Saez P., Pizette P. DEM simulation of granular flow in rotating drums: effect of particle shape // *Powder Technology*. 2021. Vol. 385. P. 526–537. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.02.045.
6. Kwapong D. K., Tetteh J., Ofosu E. Modeling of granular material flow in rotary drums: a review // *Journal of Engineering Research and Reports*. 2019. Vol. 5, No. 3. P. 1–15. DOI: 10.9734/jerr/2019/v5i316832.
7. Galvin K. J., Wu J. Q., Nguyet L. M. Granular flow in the cylindrical section of a rotary drum // *Chemical Engineering Science*. 2015. Vol. 134. P. 118–126. DOI: 10.1016/j.ces.2015.04.031.
8. S. Chou, S. Hsiau, S. Liu [et al.] Experimental study of heat transfer and transport properties of granular materials in rotary drums // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 233. P. 126097. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126485

9. Wang W., Barés J., Renouf M., Azéma E. Steady granular flow in a rotating drum: a theoretical nonlocal model for characterizing stress, velocity, and packing fraction profiles, encompassing grain shape effects from convex to highly concave // *Physical Review Research*. 2024. Vol. 6, 043310. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.043310
10. Пристрій для визначення координат траєкторії руху сипкого матеріалу : пат. 126087 Україна. № u201711758; заявл. 01.12.2017 ; опубл. 11.06.2018, Бюл. №11/2018.

Valerii Shcherbina, Andrii Kocherha

INVESTIGATION OF PARTICLE MOTION IN TUBULAR ROTARY APPARATUSES

The work is dedicated to the comprehensive analysis of the hydrodynamics and kinematics of granular bulk material movement in rotary tubular apparatuses, which are widely used in the chemical, construction, and metallurgical industries. The main goal of the research is to identify the patterns of dispersed flow behavior by comparing experimental data and numerical modeling. To achieve this, complex experimental and numerical studies were conducted on the movement of particles of various shapes and types, characteristic of a wide range of industrial processes. Video recording was performed on a laboratory setup, and the subsequent digital processing of the obtained data allowed for the precise determination of the coordinates, trajectories, and local velocities of the particles. The granule size in the experimental studies was 3–6 mm under conditions of drum filling ranging from 4 % to 32 % and a rotation speed of 4–85 rpm. Trajectories and particle velocity fields were analyzed, which made it possible to identify significant differences in the movement regimes and to characterize the layer structure, which consists of active and passive zones. The formation of a stable circulation core was established, around which closed movement contours arise. A quantitative analysis of the velocity regimes showed that the maximum particle velocity is observed in the open surface zone (active layer) and is 0.82–2.2 m/s, while the minimum values in the depth of the passive zone are about 0.041 m/s. Comparison with the mathematical model showed convergence with an error of 4–15 %, depending on the experimental conditions, which confirms the adequacy of the model and the correctness of the numerical methods used. The developed and implemented methodology is based on the complex application of video analysis, interpolation methods, numerical modeling, and statistical processing, which enabled the obtaining of detailed kinematics characteristics of bulk material movement in the rotary drum. The proposed approach ensures high measurement accuracy and the capability for adequate assessment of particle movement dynamics. The results confirm the high informational value and practical applicability of the methodology for engineering practice and further scientific research, particularly for the optimization of design, operating modes, model refinement, and prediction of bulk material behavior in real industrial conditions.

Keywords: rotating drum, granular flow, video recording, modeling, particle trajectory, particle kinematics, circulation core, particle velocity

References

1. Trojosky, M. (2019). Rotary drums for efficient drying and cooling. *Drying Technology*, 37(5), 632–651. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1552597>
2. Arseni, A. M. G., Monaco De, G., Greco, F., & Maffettone, P. L. (2020). Granular flow in rotating drums through simulations adopting a continuum constitutive equation. *Physics of Fluids*, 32(093305). <https://doi.org/10.1063/5.0018694>
3. Arseni, A. M. G., Monaco De, G., Greco, F., & Maffettone, P. L. (2020). Granular flow in rotating drums through simulations adopting a continuum constitutive equation. *Physics of Fluids*, 32(093305). <https://doi.org/10.1063/5.0018694>
4. Chatre, L., Lemerle, X., Bataille, M., Herbelet, F., & Randriamanantena, T. (2024). Numerical study of dense powder flow in a rotating drum: Comparison of CFD to experimental measurements. *Powder Technology*, 444, 119981. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119981>
5. Ristori, T., Saez, P., & Pizette, P. (2021). DEM simulation of granular flow in rotating drums: Effect of particle shape. *Powder Technology*, 385, 526–537. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.045>
6. Kwapong, D. K., Tetteh, J., & Ofori, E. (2019). Modeling of granular material flow in rotary drums: A review. *Journal of Engineering Research and Reports*, 5(3), 1–15. <https://doi.org/10.9734/jerr/2019/v5i316832>
7. Galvin, K. J., Wu, J. Q., & Nguyet, L. M. (2015). Granular flow in the cylindrical section of a rotary drum. *Chemical Engineering Science*, 134, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.04.031>
8. Chou, S., Hsiau, S., Liu, S. [et al.] (2024). Experimental study of heat transfer and transport properties of granular materials in rotary drums. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 233, p. 126097. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126485.
9. Wang, W., Barés, J., Renouf, M., & Azéma, E. (2024). Steady granular flow in a rotating drum: A theoretical nonlocal model for characterizing stress, velocity, and packing fraction profiles, encompassing grain shape effects from convex to highly concave. *Physical Review Research*, 6, 043310. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.043310.
10. Device for determining coordinates of the trajectory of bulk material movement : patent 126087 Ukraine. No. u201711758; Applied 01.12.2017 ; Published 11.06.2018, Bulletin No. 11/2018.