

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

«На правах рукопису»

УДК 67.017

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ О.В. Гондляр
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

на тему: Рух сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах

Виконав: студент ____ курсу, групи ЛС-61м
(шифр групи)

Точинський Віталій Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доцент Щербина Валерій Юрійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант Математичного моделювання
(назва розділу) _____

д.т.н., професор Карвацький Антон Янович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Рецензент к.т.н., професор Марчевський В.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) 133 Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) О.В. Гондляр
(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2018 р

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Точинському Віталію Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації “Рух сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах”

науковий керівник дисертації доц. Щербина Валерію Юрійович

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

затверджені наказом по університету від «21»березня 2018 р. №979-С

2. Строк подання студентом дисертації 01 травня 2018 року

3. Об'єкт дослідження процесу переміщення сипкого середовища

4. Предмет дослідження особливості динаміки руху сипкого середовища в обертових барабанних апаратах при незначних швидкостях потоку

5. Перелік завдань, які потрібно розробити визначити об'єкт, предмет та мету дослідження, зокрема поставити задачу моделювання; обґрунтувати цілі дослідження; проаналізувати можливі методи і методики досліджень, здійснити обґрунтований вибір методу дослідження; здійснити науковий аналіз та узагальнення фактичного матеріалу, який використовується в процесі дослідження, розробити та розв'язати за заданих умов

математичну модель; порівняти результати числового моделювання з результатами інших дослідників та результатами експлуатації промислового обладнання; здійснити апробацію отриманих результатів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу тема, об'єкт дослідження; послідовність обробки та аналізу отриманих даних; режими руху сипкого матеріалу на експериментальній установці; методи обробки результатів; оцінка похибки; обробка результатів експерименту; математична модель дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах; результати розрахунків; висновки, публікації.

7. Орієнтовний перелік публікацій 6 доповідей на науково-практичних конференціях та 1 заявка на патент на корисну модель.

8. Дата видачі завдання 02 вересня 2016 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
Навчальна робота			
1	Виконання навчального плану підготовки магістра	01.09.16-31.01.18	
Дослідницька робота			
2	Аналіз літературних і патентних джерел з пошуком досліджень руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.	31.03.17	
3	Розробка математичної моделі дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.	01.04.17-30.06.17	
4	Вибір та обґрунтування програмного забезпечення для розв'язання сформульованої задачі у п. 2.	01.09.17-30.11.17	
5	Розробка алгоритму розрахунку.	01.12.17-28.02.17	
6	Проведення експериментальних досліджень.	01.03.18-15.03.18	
7	Аналіз отриманих результатів та підготовка статті до друку в фаховому журналі. Доповідь на кафедрі за результатами виконання магістерської дисертації.	16.03.18-28.04.18	
8	Розробка числової моделі дослідження траєкторії руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.	01.04.18-30.04.18	
9	Конструктивне оформлення результатів досліджень.	01.02.18-30.04.18	
10	Підготовка публікацій за результатами досліджень	01.04.18	
11	Оформлення роботи магістра та її підготовка до захисту	01.04.18-16.05.18	
Педагогічно-освітня робота			
12	Допомога у проведенні НДРС за навчальними планами кафедри	Протягом навчання	

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

УДК 67.017

Атестаційна магістерська робота “Рух сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах” / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Керівник В. Ю. Щербина. — К., 2018. — 105 с., 66 іл. — Викон. В. О. Точинський. — Бібліогр.:

Мета дослідження: експериментальне визначення режимів роботи сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.

Об’єкт дослідження: процес переміщення сипкого середовища.

Предмет дослідження: особливості динаміки руху сипкого середовища в обертових барабанних апаратах при низьких і середніх швидкостях обертання.

Актуальність дослідження: науково-експериментальне дослідження траєкторії руху сипких матеріалів в обертовому барабані.

Результати роботи: наявні в літературі дані, які відносяться до руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах не описують в повній мірі сегрегацію компонентів сипких матеріалів за їх фізико-механічними властивостями, що є одним з важливих факторів для підвищення ефективності змішування сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах.

Для виконання завдання був використаний експериментально-теоретичний підхід та метод дослідження. На основі експериментальних досліджень були розроблені методики визначення траєкторії та швидкості руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах.

Досліджено рух частинок плоскої, циліндричної та кульової форми в обертовому барабані. Визначена достовірність отримання експериментальних даних. Відносна похибка не перевищує 15%.

Для проведення експериментів на кафедрі ХПСМ ІХФ була розроблена та виготовлена лабораторна установка для моделювання різних режимів руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах. Установка може використовуватись в подальшому для проведення лабораторних робіт, а саме для визначення траєкторії руху сипких матеріалів та встановлення залежностей між параметрами установки та матеріалом.

Проведені дослідження дають можливість визначати траєкторію руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах.

Дана магістерська дисертація може бути корисною при дослідженні, проектуванні та виробництві обладнання для змішування сипких матеріалів в барабанних апаратах.

СИПКІ МАТЕРІАЛИ, БАРАБАННІ АПАРАТИ, ОБЕРТОВИЙ БАРАБАН,
РУХ, ЗМІШУВАННЯ.

РЕФЕРАТ

УДК 67.017

Аттестационная магистерская работа “Движение сыпучего материала во вращающихся барабанных аппаратах” / КПИ им. Игоря Сикорского; Руководитель В. Ю. Щербина. — К., 2018. — 105 с., 66 ил. - Исп. В. О. Точинский. — Библиогр.

Цель исследования: экспериментальное определение режимов работы сыпучего материала во вращающихся барабанных аппаратах.

Объект исследования: процесс перемещения сыпучей среды.

Предмет исследования: особенности динамики движения сыпучей среды во вращающихся барабанных аппаратах при низких и средних скоростях вращения.

Актуальность исследования: научно-экспериментальное исследование траектории движения сыпучих материалов во вращающемся барабане.

Результаты работы: имеющиеся в литературе данные, относящиеся к движению сыпучих материалов во вращающихся барабанных аппаратах не описывают в полной мере сегрегацию компонентов сыпучих материалов по их физико-механическим свойствам, что является одним из важных факторов для повышения эффективности смешивания сыпучих материалов во вращающихся барабанных аппаратах.

Для выполнения задания был использован экспериментально-теоретический подход и метод исследования. На основе экспериментальных исследований были разработаны методики определения траектории и скорости движения сыпучих материалов во вращающихся барабанных аппаратах.

Исследовано движение частиц плоской, цилиндрической и шаровой формы во вращающемся барабане. Определена достоверность получения экспериментальных данных. Относительная погрешность не превышает 15%.

Для проведения экспериментов на кафедре ХПСМ ИХФ была разработана и изготовлена экспериментальная установка для моделирования разных режимов движения сыпучего материала во вращающихся барабанных аппаратах. Установка может использоваться в дальнейшем для проведения лабораторных работ, а именно

для определения траектории движения сыпучих материалов и определения зависимостей между параметрами установки и материалом.

Проведенные исследования дают возможность определить траекторию движения сыпучих материалов во вращающихся барабанных аппаратах.

Данная магистерская диссертация может быть полезной при исследовании, проектировании и производстве оборудования для смешивания сыпучих материалов в барабанных аппаратах.

СЫПУЧИЕ МАТЕРИАЛЫ, БАРАБАНЫЕ АППАРАТЫ, ВРАЩАЮЩИЙСЯ БАРАБАН, ДВИЖЕНИЕ, СМЕШИВАНИЕ.

ABSTRACT

UDC 67.017

Master's thesis: «Movement of bulk materials in rotating drum units» / Igor Sikorsky KPI; Academic advisor V. J. Shcherbyna. — K., 2018. — 105 p., 66 ill. — Done by V. O. Tochynskyi. — Ref.:

Purpose of the study: experimental determination of operating modes of bulk materials in rotary drum machines.

Research object: the process of moving of bulk medium.

Subject of study: peculiarities of the dynamics of the movement of the bulk medium in rotating drum machines at low and medium speeds of rotation.

The relevance of research: scientific and experimental study of the trajectory of the movement of bulk materials in rotating drum units.

The results of the work: the data available in the literature relating to the movement of bulk materials in rotating drum machines does not fully describe the segregation of components of bulk materials according to their physical and mechanical properties, which is one of the important factors for increasing the efficiency of mixing bulk materials in rotating drum machines.

To accomplish the task, the experimental-theoretical approach and the method of research were used. Based on experimental studies, techniques for determining the trajectory and velocity of bulk material in rotating drum machines were developed.

The motion of flat, cylindrical and ball shape particles in a rotating drum is explored. The authenticity of obtaining experimental data is determined. Relative error does not exceed 15%.

When experimenting at the CPSM FCE department, a laboratory installation was developed for the simulation of different modes of movement of bulk material in rotating drum machines. The installation can be used in the future for laboratory work, in particular to determine the trajectory of bulk material movement and to establish the relationship between the parameters of the installation and the material.

The conducted research give an opportunity to determine the trajectory of the movement of bulk materials in rotating drum machines.

This master's thesis can be useful in researching, designing and manufacturing equipment for mixing bulk materials in drum machines.

BULK MATERIALS, DRUM-TYPE APPARATUS, ROTATING DRUM, MOVEMENT, MIXING.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І	
ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ	
ДОСЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОЗРОБКИ.....	
1.1 Загальна характеристика сипких матеріалів	19
1.2 Аналіз актуальності роботи і завдань дослідження	19
1.3 Опис експериментальних установок для дослідження руху сипкого матеріалу в	
оберткових барабанних апаратах	20
1.4 Особливості установок для дослідження сипкого матеріалу в оберткових	
барабанних апаратах	23
1.5 Математичні моделі руху сипкого матеріалу в оберткових барабанних	
апаратах	27
1.7 Висновки до аналітичного огляду стану питання	32
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	34
2.1 Опис експериментальної установки.....	34
2.2 Технічна характеристика експериментальної установки	35
2.3 Режими руху сипкого матеріалу в експериментальній установці	36
3 МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ	39
3.1 Послідовність обробки та аналізу отриманих даних.....	39
3.2 Методи обробки результатів.....	41
3.3 Достовірність розрахункових значень	44
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	48
4.1 Дослідження руху частинок плоскої форми.....	48
4.2 Дослідження руху частинок циліндричної форми	55
5.3 Дослідження руху частинок пірамідальної форми.....	62

5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РУХУ ДИСПЕРСІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА	67
5.1 Рівняння руху	67
5.2 Математичні моделі в змінних Гельмгольца	71
5.3 Використання різничних схем	73
6 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПО МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ.....	79
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	85
7.1 Механічна небезпека	85
7.2 Пожежна небезпека.....	86
7.3 Електрична небезпека.....	87
7.4 Промислове освітлення	88
8 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	89
8.1 Опис ідеї проекту	89
8.2 Загальна інформація про компанію.....	90
8.3 Аналіз факторів макромаркетингового середовища	93
8.4 Аналіз факторів мікромаркетингового середовища.....	99
ВИСНОВОК.....	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

ρ	– густина, кг/м ³ ;
p	– тиск, Н/м ² ;
μ	– динамічна в'язкість, Па·с;
λ	– об'ємна (друга) в'язкість, Па·с;
\vec{v}	– лінійна швидкість руху середовища, с ⁻¹ ;
\vec{F}	– вектор масових сил, діючих на одиницю маси речовини
ν	– кінематична в'язкість, Па·с;
K	– питома інтенсивна енергія, Дж/кг;
$\vec{\omega}$	– вектор завихреності;
ψ	– функція току;
\sqrt{g}	– коефіцієнт обсягу;
H_i	– Коефіцієнти Ляме при $i = 1, 2, 3$;
\vec{e}_i, \vec{e}^i	– базисний координатний вектор;
δ_{ij}	– символ Кронекера;
Γ_{mn}^m	– символ Кристофеля 2 роду;
ϵ^{*mn}	– тензор Леві-Чивіті;
V	– об'єм, м ³ ;
$g^{ij} (g_{ij})$	– контрваріантні (коваріантні) компоненти метричного тензора.

Основні скорочення:

ІХФ	– інженерно-хімічний факультет;
ЕОМ	– електронна обчислювальна машина;
СЕ сітка	– скінченно-елементна сітка;

НДС – напружено-деформований стан.

Інші символи:

- – оператор скалярного добутку векторів;
- × – оператор векторного добутку векторів;
- ∴ – оператор подвійного скалярного добутку.
- ∇ – оператор Гамільтона (“набла”), ротор;
- Δ – оператор Лапласа.

ВСТУП

Для моделювання ряду процесів хімічних, фармацевтичних, харчових, металургійних виробництв, важливим є дослідження поведінки сипкого матеріалу в обертовому барабані. Кількість досліджень, присвячених даній тематиці, значно збільшилась за останній час. Потрібно відмітити роботи, які є пов'язані із параметричним аналізом частинок під час обертання барабана. Серед них є роботи, присвячені розрахункам товщини спадаючого шару, розрахункам середнього часу перебування гранул, а також дослідженням верхніх і нижніх кутів укусу.

Для оцінки факторів, які впливають на поведінку сипкого матеріалу, проводився ряд експериментів з метою збору необхідних даних для подальшого моделювання і оцінки його розрахункової моделі [1].

Мета дослідження: експериментальне визначення режимів роботи сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.

Об'єкт дослідження процес переміщення сипкого середовища.

Предмет дослідження: особливості динаміки руху сипкого середовища в обертових барабанних апаратах при низьких і середніх швидкостях обертання.

Актуальність дослідження: науково-експериментальне дослідження траєкторії руху сипких матеріалів в обертовому барабані.

Завдання досліджень:

1. Провести літературний аналіз існуючих досліджень руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.
2. Розробити експериментальну установку для дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.
3. Розробити методику та програмне забезпечення для обробки даних, отриманих в результаті проведення експериментальних досліджень.
4. Розробити математичну модель для дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах. Порівняти отримані дані з експериментальними даними.

Дослідження ґрунтуються на методах:

- чисельного та літературного дослідження траєкторії руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах з метою оцінки показників ефективності використання і експлуатації обертових барабанних апаратів в цілому;
- експерименту та математичного моделювання із застосуванням положень механіки суцільного середовища.

Наукова новизна:

1. Розроблено методики та програмне забезпечення для обробки руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.
2. Розроблено експериментальну установку для дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.
3. Запропонована математична модель дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах з використанням рівнянь Нав'є – Стокса в змінних Гельмгольца для криволінійної неортогональної системи координат з уточнюючим коефіцієнтом збурення який визначається функцією сітчастого числа Рейнольдса.

Практична значимість: результати роботи у вигляді отриманих залежностей траєкторії руху сипкого матеріалу можуть бути використані в різних галузях промисловості, які експлуатують обертові барабанні апарати і сипкі матеріали.

1. Розроблено програмне забезпечення з використанням функціональної мови AutoLisp та C++ для обробки зображень та дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.

2. Розроблено та сконструйовано експериментальну установку для дослідження руху сипкого матеріалу в барабанних апаратах.

3. Розроблено експериментальну установку, яка планується використовуватись в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського при викладанні дисципліни «Процеси та апарати хімічної технології» та «Обладнання хімічних, полімерних і силікатних виробництв» для спеціальностей «Прикладна механіка» і «Галузеве машинобудування».

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОЗРОБКИ

1.1 Загальна характеристика сипких матеріалів

Часто в технічній літературі використовується поняття зернистого матеріалу наряду із сипким матеріалом. Це пояснюється розділенням зернистих матеріалів на зв'язні і сипкі у зв'язку із різною пористістю. Сипкий матеріал описується наступними властивостями: насипною густиною (об'ємною вагою), гігроскопічністю, гранулометричним складом, корозією, крихкістю, вибухонебезпечністю, вологістю, самозаймистістю, опором переміщенню щодо твердих поверхонь, шкідливістю та отруйністю для здоров'я персоналу, липкістю, зв'язністю та рухливістю частинок матеріалу, абразивністю, злежуваністю. Важливе значення на рух дисперсійного середовища відіграють обертові барабанні апарати.

Нижче за текстом описані способи визначення властивостей сипких матеріалів та властивості сипких матеріалів.

Гранулометричний склад. Гранулометричним склад сипкого матеріалу – це кількісний розподіл складових частинок за їх величиною; крупність частинки визначається її найбільшим розміром (рисунок 1.1). Гранулометричний склад сипкого матеріалу зазвичай визначається просіюванням порцій матеріалу через набір сит.

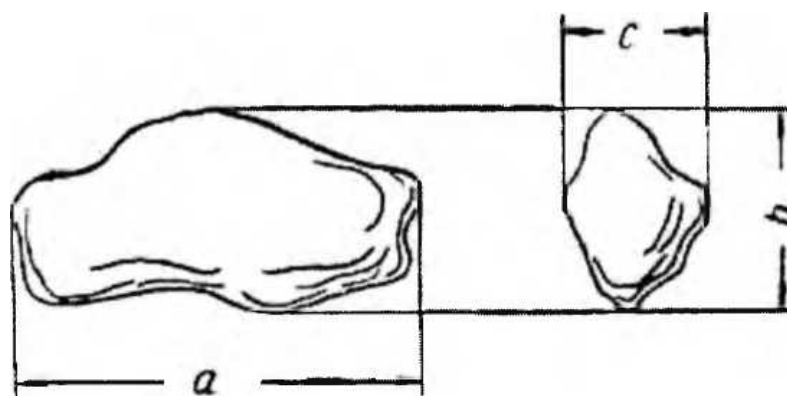


Рисунок 1.1 - Розміри частинок сипкого матеріалу:
a – найбільший розмір; b, c – розміри частинки.

Сипкі матеріали в залежності від розміру типових кусків поділяються на ряд категорій:

- а) крупно кускові ($a_{max} > 160\text{мм}$);
- б) середньо кускові ($60 < a_{max} < 160\text{ мм}$);
- в) дрібно кускові ($10 < a_{max} < 60\text{ мм}$);
- г) крупнозернисті ($2 < a_{max} < 10\text{мм}$);
- д) дрібнозернисті ($0,5 < a_{max} < 2\text{ мм}$);
- е) порошкоподібні ($0,05 < a_{max} < 0,5\text{ мм}$);
- ж) пиловидні ($a_{max} < 0,05\text{ мм}$).

Вологість. Існують наступні різновиди вологи, що міститься в сипких матеріалах:

- а) „конституційна” волога, хімічно пов'язана з сипким матеріалом;
- б) „гігроскопічна” волога, що вбирається частинками сипкого матеріалу та крізь навколишнє повітря;
- в) „зовнішня” волога, яка, у свою чергу, ділиться на „плівкову” або „молекулярну” вологу, утворюючи плівки на поверхні частинок, і „гравітаційну” вологу, що заповнює пори між частинками сипкого матеріалу.

Сипкі матеріали, що містять лише конституційну вологу, називаються сухими; такий стан сипких матеріалів досягається висушуванням їх в сушильній шафі при температурі біля $+105^{\circ}\text{C}$ до постійної ваги.

Матеріали, що містять конституційну і гігроскопічну вологу, називаються повітряно-сухими; такий стан, що досягається тривалим зберіганням сипкого матеріалу на повітрі за умови захисту від атмосферних опадів, називається також станом природної вологості сипкого матеріалу.

Вологість сипкого матеріалу розраховується наступним чином:

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_2}, \quad (1.1)$$

де G_1 - вага порції до просушування;

G_2 - вага порції після просушування в сушильній шафі.

Насипна густина (об'ємна вага). Насипною густиною ρ_n сипкого матеріалу називається маса одиниці займаного їм об'єму. Зазвичай насипна густина визначається в кг/м³.

Насипна густина визначається за формулою

$$\rho_n = \frac{G_0 - G_1}{V_1}, \quad (1.2)$$

де G_0 - вага сосуду з сипким матеріалом;

G_1 - власна вага сосуду;

V_1 - об'єм сосуду.

Класифікація сипких матеріалів по об'ємній вазі:

а) легкі (об'ємна вага менше 600 кг/м³);

б) середні (об'ємна вага лежить в межах від 600 до 1100 кг/м³);

в) важкі (об'ємна вага лежить в межах від 1100 до 2000 кг/м³);

г) дуже важкі (об'ємна вага від 2000 кг/м³ і більше).

Питомою вагою сипкого матеріалу називається середня питома вага складових його твердих частинок. Для визначення питомої ваги сипкого матеріалу в скляну судину насипають порцію сухого матеріалу, наливають рідину, що змочує, але не розчинює частинки матеріалу, ретельно перемішують їх і потім визначають об'єм отриманої суспензії; питома вага δ визначається по формулі

$$\delta = \frac{G_{CM}}{V_C - V_P}, \quad (1.3)$$

де G_{CM} - вага порції сухого матеріалу;

V_C - об'єм суспензії;

V_P - об'єм рідини.

Опір сипких матеріалів переміщенню щодо поверхні твердих тіл, що викликається силою тертя, характеризується коефіцієнтом зовнішнього тертя f_i , який визначають за допомогою трибометра.

Розрізняють коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об тверді поверхні в стані спокою і в стані відносного руху; порівняльні випробування показують, що коефіцієнт тертя об тверді поверхні в русі складає 70—90% величин коефіцієнта тертя у спокої. Коефіцієнт зовнішнього тертя знаходять за формулою:

$$f_1 = \frac{T - T_p}{F}, \quad (1.4)$$

де T - зрушуюче зусилля;

T_p - опір рамки;

F - вертикальне навантаження.

При орієнтовних розрахунках бункерів а тих випадках, коли дійсне значення коефіцієнта тертя даного сипкого матеріалу об стінки бункера невідоме, але відоме значення коефіцієнта тертя даного сипкого матеріалу об матеріал іншого роду, необхідний коефіцієнт тертя може бути знайдений з наступного наближеного співвідношення, побудованого на середніх даних різних випробувань

$$f_{1c}:f_{1д}:f_{1г}:f \approx 15:16:17:20, \quad (1.5)$$

де f_{1c} - коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об сталь;

$f_{1д}$ - коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об дерево;

$f_{1г}$ - коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об гуму;

f - коефіцієнт внутрішнього тертя, до якого приблизно прирівнюється коефіцієнт тертя по бетону.

Відносна взаємна рухливість частинок сипкого матеріалу визначається наявністю сил щеплення між окремими частинками і величиною сил тертя, що виникає при переміщенні частинок відносно друг друга.

Злежуваністю сипких матеріалів називається властивість матеріалів втрачати рухливість частинок при тривалому зберіганні в бункерах, силосах і інших судинах. До злежуваності схильні такі матеріали, як глина, вапно, сода, цемент та інші. Деякі сипкі матеріали особливо схильні до злежування в умовах підвищеної вологості, наприклад, пісок, кам'яна сіль і ін.

Липкістю називається властивість деяких сипких матеріалів прилипати до твердих тіл. Липкістю володіють порошкоподібні і пилоподібні фракції сипких матеріалів, головним чином вологих. Проте і деякі сухі матеріали є липкими; так, наприклад, сіра і тальк прилипають до сталі, крейда прилипає до дерева.

Вологі сипкі матеріали (зола, пісок), а також деякі сухі матеріали, що хімічно взаємодіють з матеріалом стінок бункерів (селітра аміачна, солод, сіль куховарська), що викликають корозію стінок бункерів, є корозійними.

Сипкі матеріали, що стирають стінки спускових лотків і бункерів, робочі органи затворів і живильників називають абразивними. До них відносяться апатитовий концентрат, боксит, зола, кокс, окисли алюмінію і кремнію, руда, формувальна земля, цемент і ін. Помірно абразивними є кам'яне вугілля, зерно. Неабразивні матеріали (чиста картопля) можуть набути властивостей абразивності при забрудненні піском і іншими абразивними домішками.

До крихких відносяться сипкі матеріали, частинки яких легко піддаються руйнуванню (дробленню) в процесі переміщення, вантаження і вивантаження. Крихкими матеріалами є кокс, антрацит, насінне зерно та інші.

Самозаймистість - властивість деяких сипких матеріалів спалахувати під дією тепла, що виділяється при протіканні в них хімічних процесів. До самозаймистих матеріалів відносяться вологі вугілля, тирса, стружки і тріски деревинні, карбід кальцію, сіра, промаслена металева тирса та інші.

Окрім власне вибухових матеріалів до вибухонебезпечних відносяться матеріали, що виділяють пил, здатний вибухати (крохмаль, мука, тирса деревинна, зерно, вугілля), а також матеріали, що створюють вибухові суміші з іншими матеріалами (селітра, бертолетова сіль).

Матеріали, схильні вбирати атмосферну вологу (сіль куховарська, селітра аміачна, тирса суха деревинна, сульфат натрію технічний, суперфосфат), носять назву гігроскопічних.

Окрім отруйних матеріалів (свинцеві білила, солі миш'яку і порошкоподібний миш'як, фтористий натрій, насіння рицини і ін.), до шкідливих для здоров'я робочих, обслуговуючих бункерні пристрої, відносяться матеріали, що порошать, здатні викликати захворювання очей, органів дихання і нервової системи (вапно хлорне, кріоліт пилоподібний, цемент).

Обертові барабанні барабани із сипким матеріалом застосовують не лише в хімічній, а й у інших галузях промисловості, серед яких металургійна, гірничорудна,

харчова і хімічна. Обробка сипких матеріалів проводиться завдяки обертовим барабанним апаратам, в яких матеріали набувають необхідних фізико-механічних властивостей [2].

Вирішення задачі приготування однорідної суміші викликає ряд проблем. Ці проблеми пов'язані з широким спектром змін фізико-механічних властивостей матеріалів, які підлягають переробленню, з вимогами, які ставляться до якості і до складу продукту, продуктивності, енерго- та металоємкості обладнання.

Важливим фактором, що стримує вирішення задачі підвищення ефективності змішувачів, є сегрегація компонентів сипких матеріалів за їх фізико-механічними властивостями. Це явище призводить до погіршення якості кінцевого продукту в силу коливань його властивостей за об'ємом складу, що може проявитись зниженням ефективності хімічних реакцій, якості отриманих матеріалів [3].

На рисунку 1.2 зображена схема обертового барабанного апарата.

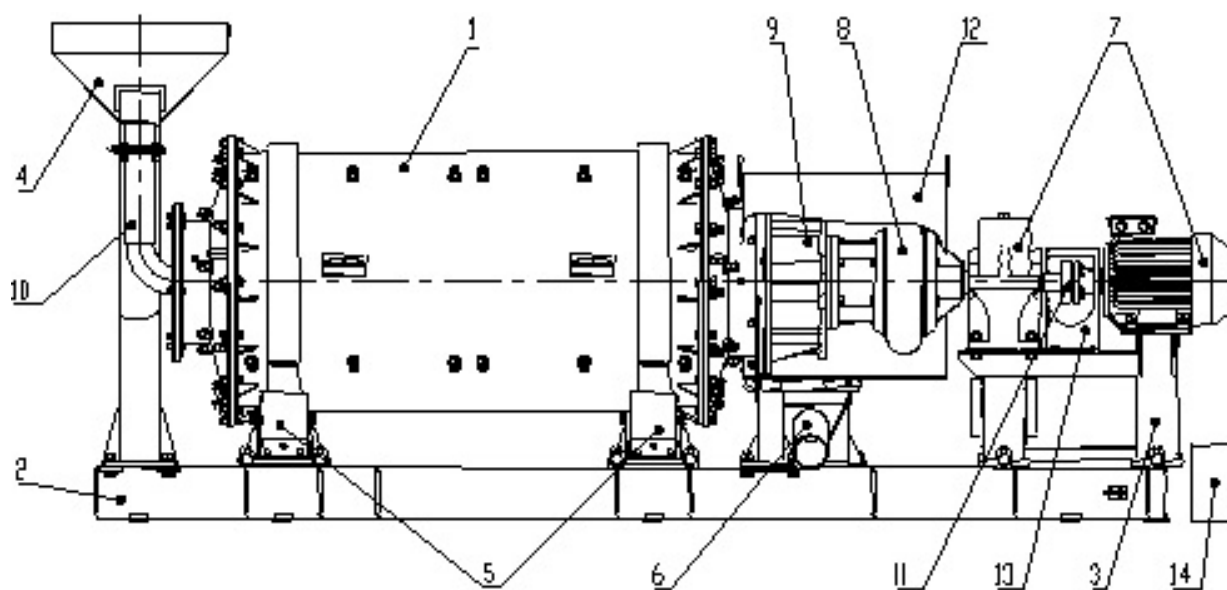


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд обертового барабанного апарата

1 – барабан; 2 – рама; 3 – рама вертикальна; 4 – бункер завантажувальний;
 5 – кожух; 6 – бункер розвантажувальний; 7 - привод; 8 - цапфа; 9 – пристрій
 завантажувальний; 10 – патрубков; 11 - муфта; 12 - загорожа; 13 – кожух;
 14 – панель керування [5]

На рух сипкого матеріалу в барабанних апаратах впливає багато факторів: твердість руди, вміст вологи, вміст цінного компонента та шкідливих домішок, характер включень зерен, хімічні властивості та інші характеристики. Виходячи з цього, на підприємствах гірничо-збагачувальної промисловості застосовуються різні схеми змішування. Вибір тієї чи іншої схеми визначається фізико-механічними характеристиками сипкого матеріалу [4].

1.2 Аналіз актуальності роботи і завдань дослідження

Задача дослідження в обертових барабанних апаратах руху сипких матеріалів представляє великий інтерес. Особливе значення надається дослідженню траєкторії руху сипкого матеріалу при низьких та високих швидкостях обертання барабана. На основі аналізу робочих процесів цих систем всі види руху оброблюваного матеріалу можуть бути зведені до двох найбільш характерних рухів в'язкої ньютонівської рідини та сипкого тіла [6].

В даній роботі досліджується траєкторія руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.. Для них притаманний рух (циркуляція) основного потоку матеріалу по замкненому контуру різної складності. Рух сипкого матеріалу по циркуляційному контуру забезпечує або перемішуючий орган, або ж спеціальні транспортери. Зона руху перемішуючого органу складає незначну частку загального робочого об'єму змішувача. Найбільш поширені змішувачі циркуляційного типу – планетарно-шнекові, відцентрово-лопатеві, змішувачі з центральною циркуляційною трубкою. До основних переваг цього типу змішувачів відноситься простота та надійність конструкції, невисока споживана енергія. Але їх широке застосування в промисловості обмежене через недостатньо високу якість отриманої суміші, особливо при змішуванні компонентів, які схильні до сегрегації. Впорядкований характер руху частинок в циркуляційних змішувачах дає змогу, в результаті моделювання процесу, який протікає в змішувачі, прогнозувати отримуваний результат, а також видавати рекомендації по проведенню процесу змішування і характеру завантаження компонентів, що змішуються. Це доволі важко

зробити для інших типів змішувачів через неупорядкований характер руху частинок матеріалу [7].

1.3 Опис експериментальних установок для дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах

Збільшення продуктивності апаратів барабанного типу з найменшими витратами енергетичних та матеріальних ресурсів, у який відбувається змішування сипких матеріалів, вимагає дослідження руху сипких матеріалів в барабанних апаратах. Вирішення цієї задачі в інтересах хімічних, фармацевтичних, харчових та металургійних виробництв.

Метою і задачами проведення патентних досліджень є:

- моніторинг установок, які дозволяють визначити траєкторію руху матеріалу;
- визначення патентноспроможності та інших форм захисту інтелектуальної власності, що має відношення до установок для дослідження сипкого матеріалу.

На сьогоднішній день дослідженням траєкторії руху сипких матеріалів в апаратах барабанного типу займаються багато інститутів, проектних організацій та заводів. Незважаючи на це, підвищення продуктивності барабанних апаратів неможливе лише за рахунок теоретичного моделювання процесу змішування сипких матеріалів в обертовому барабані, не проводячи дослідження поведінки частинок матеріалу в апаратах барабанного типу. Наразі багато правил та закономірностей розрахунку подібного устаткування не є достатньо ефективними та точними через те, що вони отримані емпіричним шляхом. Постійно ведеться інженерний та науковий пошук вдосконалення технології змішування сипких матеріалів, розробка нових машин та принципів роботи, що забезпечують підвищення їх ефективності та продуктивності.

Для змішування сипких матеріалів широко використовуються різноманітні барабанні апарати (рисунок 1.3). Проте низька інтенсивність протікаючих процесів та їх локалізація в обмеженій зоні приводить до більш довгої реалізації технологічного процесу змішування частинок матеріалу.

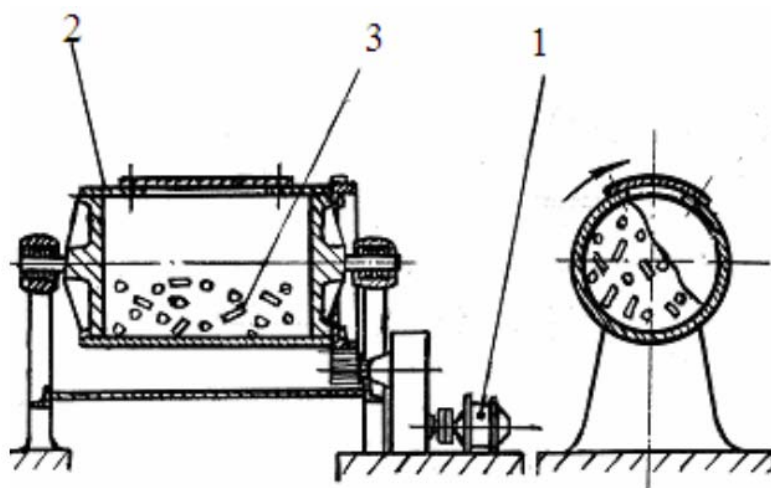


Рисунок 1.3 – Барабанний пристрій для змішування сипких матеріалів:

1 – привід; 2 – барабан; 3 – сипкий матеріал [8]

Змішування є однією з найважливіших операцій при виготовленні матеріалів та виробів з порошків. Воно полягає в приготуванні однорідної механічної суміші із порошків різного хімічного та гранулометричного складу. Задачі змішування – перетворення сукупності частинок твердих компонентів в макрооднорідну суміш.

Результат змішування визначається формою та величиною частинок, кількістю компонентів, які змішуються, а також співвідношенням їх кількостей, коефіцієнтом тертя між частинками, здатністю частинок до злипання та іншими факторами.

Найбільш розповсюдженим є механічне змішування компонентів в кульових млинах, які є аналогічними до тих, що застосовуються при подрібненні. При змішуванні в кульовому млині відбувається одночасне подрібнення компонентів. Якщо подрібнення або змішування небажане, то використовуються змішувачі різних типів. Це можуть бути барабанні, в тому числі так звані “п’яні бочки”, застосування яких на сьогоднішній день обмежене через недостатню ефективність, шнекові, лопатеві, відцентрові, планетарні, конусні та установки безперервної дії.

Змішування в лопатевих або шнекових змішувачах проводять при приготуванні пастоподібних сумішей. Такі змішувачі ефективні при додаванні до порошку різних речовин, що покращують процес пресування, наприклад розчин каучуку в бензині, парафіну або його розчину в бензині.

При змішування компонентів з кардинально відмінними густинами використовують особливі прийоми. Наприклад, застосовують завантаження компонентів по частинах, змішуючи спочатку найбільш легкі з більш важким компонентом, а потім до такої суміші додають інші компоненти. В деяких випадках хороші результати досягаються при змішуванні у вакуумі компонентів з різною густиною. В цьому випадку поводження компонентів не залежить від їх густини і частинки всередині змішувача рухаються з однаковими швидкостями, що забезпечує високу рівномірність об'ємного розподілу компонентів в суміші.

У випадку поганих технологічних характеристик суміші (низька текучість, пресованість) її піддають грануляції, під якою розуміють операцію утворення стійких комків сфероїдальної форми, що складаються з порівняно великої кількості частинок.

Результати змішування контролюють або за фізико-технологічними властивостями шихти, визначаючи гранулометричний склад, насипну масу, текучість, пресованість, або за хімічним аналізом проб. На практиці зазвичай контролюють частину технологічних характеристик суміші і проводять хімічний аналіз проб з неї [9].

Рух сипкого матеріалу в обертовому барабані можна класифікувати на два граничних режими: інерційний та квазистатичний. Квазистатичний режим руху сипкого матеріалу характеризується малою швидкістю зсуву та описується теорією граничної рівноваги. Інерційний режим характеризується порівняно великими швидкостями зсуву та описується "теорією швидких рухів гранульованого середовища".

Інерційний режим передбачає появу в матеріалі внутрішніх напружень. Це пов'язано із переносом частинами матеріалу імпульсу. Для апаратів, в яких відбувається змішування сипких матеріалів, характерний цей режим руху сипкого матеріалу. Квазистатичний режим руху сипкого матеріалу передбачає появу між частинками сипкого матеріалу сухого кулонівського тертя та внаслідок цього внутрішні напруження.

На рисунку 1.4 зображена схема пристрою для змішування сипких матеріалів [10].

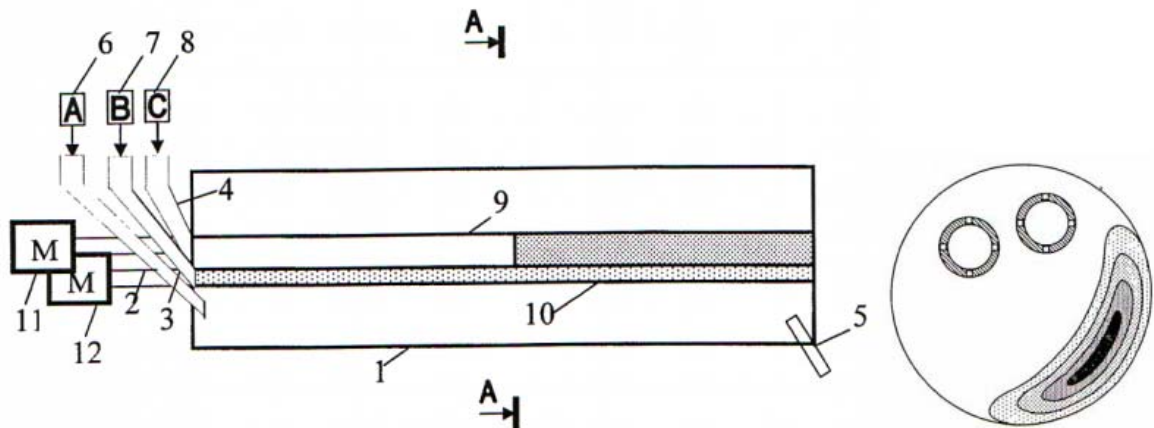


Рисунок 1.4 – Пристрій для змішування сипких матеріалів:

1 – барабан; 2-4 – вузли завантаження; 5 – вузол розвантаження однорідної суміші; 6-8 – дозатори безперервної подачі компонентів А, В, С; 9, 10 – перфоровані труби; 11, 12 – приводи; А, В, С – сипкі матеріали (А – основний компонент).

Пристрій, що зображений на рисунку 1.10, працює наступним чином. Основний матеріал А завантажується через вузол завантаження 2. Інші сипкі матеріали завантажуються у вузли завантаження 3, 4, після чого потрапляють в перфоровані труби. Приводи 11 та 12 обертають труби 9, 10 навколо своєї осі, в результаті чого матеріал з труб через отвори перфорації змішується із основним сипким матеріалом А. Труба 9 перфорована тільки на деякій відстані від вузла розвантаження однорідної суміші 5.

Переваги: швидке та якісне змішування за рахунок рівномірного і поступового завантаження одного із сипких матеріалів, що підлягають змішуванню.

Недоліки: складність виробництва перфорованої труби.

1.4 Методи обробки результатів експерименту

Для обробки результатів дослідження руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах використовуються необхідне використання сучасних точних та зручних методів.

Традиційно для таких вимірів застосовується термоанемометр - непрямий метод вимірювання швидкості потоків рідини або газу. Він заснований на залежності тепловіддачі чутливого елемента датчика від швидкості руху, температури і складу середовища, що рухається. В даний час проведення експерименту за допомогою термоанемометра дозволяє отримати найбільш широкий частотний діапазон вимірювань. У той же час, термоанемометр має ряд істотних недоліків. Термоанемометр - контактний метод вимірювання швидкості. Датчик термоанемометра дозволяє отримати швидкість потоку тільки в одній точці і отримання поля швидкості за допомогою термоанемометра пов'язане з великими труднощами. До інших недоліків відносяться висока трудомісткість вимірювань, необхідність проведення частих калібрувань через забруднення датчиків або зміни контактних опорів у вимірювальній системі, мала стійкість датчиків до зовнішніх впливів, значні труднощі в розшифруванні показань приладу.

Для апроксимації значень за зворотною середньою відстанню використовується метод IDW (inverse distance weighting). Цей спосіб дозволяє проводити багатомірну інтерполяцію на нерегулярній сітці

$$f(x) = \frac{\sum_i w_i(x) y_i}{\sum_i w_i(x)}, w_i(x) = \left(\frac{1}{\|x - x_i\|} \right)^p, p = 2, \quad (1.6)$$

де x_i - набір точок в просторі розмірністю p ; y_i - значення функції в цих точках.

Переваги IDW-методу:

1. Простота в реалізації.
2. Застосування методу до простору будь-якої розмірності.
3. Можливість використання нерівномірної сітки.

Недоліки IDW-методу:

1. Велика затрата часу при обчисленні та велике використання пам'яті ЕОМ.
2. Висока чутливість до випадкових похибок при інтерполяції.
3. У вузлах інтерполяція функції не відбувається.

В дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах для інтерполяції швидкостей до вузлів сіткової моделі використовується модифікація

IDW-методу, а саме модифікований метод Шепарда для інтерполяції на нерівномірній сітці. Модифікований метод Шепарда має наступний вигляд:

$$f(x) = \frac{\sum_{i \in K} W_i(x) Q_i(x)}{\sum_{i \in K} W_i(x)}, \quad |K_x| = N_W < N \quad (1.7)$$

$$W_i(x) = \left(\frac{R_x - \|x - x_i\|}{R_x \|x - x_i\|} \right)^2, \quad R_x = \max_{i \in K} \|x - x_i\| \quad (1.8)$$

$$Q_i(x) = x^T A x + b^T x + c, \quad A \in R^{D \times D}, \quad b \in R^D, \quad c \in R \quad (1.9)$$

Переваги методу в наступному:

1. Можливість застосування методу для вирішення задач регресії.
2. Можливість інтерполяції в околі вузлів при використанні лінійних і квадратичних вузлових функцій.
3. Застосування методу як для рівномірної, так і для нерівномірної сітки та для простору будь-якої розмірності.

Недоліки методу:

1. Великі затрати часу та ресурсів на розрахунок.
2. При малій кількості значень використання методу невиправдане через низьку продуктивність.
3. Можливість розривів функції [11].

Для вимірювання швидкості потоку існує оптичний метод PIV (particle image velocimetry) - метод, заснований на вимірюванні швидкості зважених в потоці розсіюваних світлом частинок.

Метод PIV (Particle Image Velocimetry) - це вимірювання швидкості потоку частинок за їх зображенням. Основу двовимірної реалізації методу PIV становить вимір величини зміщення поміщених в потік частинок за відомий інтервал часу. Результатом є візуалізація миттєвих двокомпонентних полів швидкості у вимірювальній площині, що формується світловим ножем. Основна перевага PIV-технології полягає в можливості вимірювання миттєвих полів швидкості безконтактним методом. До переваг методу відносяться панорамності і неінвазивний, відносна простота калібрування.

Оптичний метод PIV призначений для панорамного вимірювання швидкості потоку шляхом цифрової реєстрації зображень зважених в рідині або газі дрібних частинок. Принцип роботи методу наступний. Досліджувану площину підсвічують лазерним ножем. За допомогою цифрової камери фіксують два зображення частинок через заданий проміжок часу, які вибирається залежно від швидкості потоку. Отримана пара зображень розбивається на невеликі розрахункові області, для кожної з яких визначається зміщення в пікселях за допомогою процедури кроскореляції. Калібрування дозволяє визначити масштабний коефіцієнт і отримати з зміщення частинок в пікселях зміщення частинок в одиницях довжини.

За відомою тимчасової затримки і зміщення обчислюють проекцію вектора місцевої швидкості потоку на площину лазерного ножа. Процедура повторюється для кожної розрахункової області. Для отримання чіткого зображення частинок необхідний досить короткий світловий імпульс, щоб частки не встигли значно зміститися за час імпульсу.

Недоліки методів полягають в наступному:

1. Затримка повинна бути досить великою, щоб зміщення частинок можна було визначити. Це призводить до вильоту частинок з великою швидкістю з площини лазерного ножа.
2. Розмір розрахункової області повинен бути досить малим, щоб різні швидкості в межах розрахункової області суттєво не впливали на результати.
3. Виникнення нерівномірного поля освітленості внаслідок роботи одного з лазерів. Нерівномірне і слабка освітленість другого кадру збільшує помилки при обробці кадрів і обмежує максимальну частоту зйомки.
4. Необхідно використовувати в оптичній системі циліндричної лінзи з більшою фокусною відстанню, що необхідно для збільшення інтенсивності світла в досліджуваній ділянці.
5. Вважається, що швидкість потоку в елементарній області незмінна і всі частинки роблять однаково. Цей недолік є найсуттєвішим і робить метод непридатним для дослідження руху сипкого матеріалу в обертових

барабанних апаратах, адже суть дослідження полягає у визначенні швидкостей частинок матеріалу в різних шарах матеріалу [12].

Із вищезазначених недоліків існуючих методів можна зробити висновок про те, що для визначення траєкторії руху та швидкості частинок необхідно розробляти нових метод.

1.5 Математичні моделі руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах

Сипкий матеріал займає по своїх властивостях проміжне місце між твердим тілом і рідиною. Сипкий матеріал не має постійної щільності. Щільність залежить від того, як розташовані частинки одна відносно іншої, які їхні розміри і які сили взаємодії між ними. Властивості сипкого матеріалу змінюються в залежності від ущільнюючого навантаження, вологості, від того, як довго частинки перебували в спокої.

Один з очевидних прийомів моделювання сипкого є розгляд силової взаємодії безлічі частинок і застосування при дослідженнях статистичних методів. Однак в силу складності подібного моделювання розрахунки базуються на феноменологічній моделі, де сипке середовище розглядається як турбулентний рух в рідинному середовищі.

В моделі повинен бути опис основних чинників, що впливають на виробничий процес для забезпечення отримання максимально точного визначення значень параметрів апарату та отримати інформацію про способи пришвидшення виробництва (геометричні характеристики, граничні умови, фізичні властивості середовищ, турбулентність) і можливість рішення рівнянь. Математичні моделі дуже швидко вдосконалюються та надають все більше інформації щодо шляху збільшення розмірності моделі (разом з методами чисельного рішення), та щодо більш точного опису фізичних процесів, що протікають. Реалізація математичної моделі ускладнюється рішенням і моделюванням для задачі.

На підставі середніх арифметичних значень величин виконане детерміноване описання руху частинок у турбулентному закрученому потоці [13]. Це означає, що в суцільній фазі пульсаційні поля швидкості не взаємодіють. Цей метод призначений для застосування для матеріалу, частинки якого перевищує або близький до турбулентності за масштабом. Крім того, даний метод простий у реалізації та має досить високу точність, що важливо при інтегруванні та обчисленні рівнянь для пульсаційного руху матеріалу. Метод є універсальним через те, що апроксимація емпіричним шляхом не потрібна для значень, що використовуються в стохастичних і дифузійних моделях типу коефіцієнта інтенсивності для випадкових впливів або коефіцієнта турбулентної дифузії.

Популярним є метод обчислення з використанням числа Рейнольдса та усереднених рівнянь Нав'є – Стокса турбулентних течій. Оскільки рівняння є нерілійними, то рівняння з використанням числа Рейнольдса є незамкнутими. Тому необхідне використання рівнянь турбулентності для їх замикання. Моделювання на основі рівнянь Рейнольдса проходить з використанням всього спектру різномасштабних структур. При цьому властивості великомасштабних структур змінюються в залежності від властивостей обраних для розгляду течій. Іншими словами, одержані математичні моделі, в яких використовується моделі турбулентності та напівемпіричні рівняння не можуть описувати різні типи турбулентних течій, а це означає що математичні моделі не є універсальними.

Для опису турбулентних потоків застосовується числове пряме моделювання з використанням нестационарних рівнянь Нав'є – Стокса [14]. Пряме числове моделювання відрізняється великою затратою часу для проведення розрахунків та великим використанням пам'яті. Це все обумовлено складністю турбулентності. При прийнятті 10 секундного прирощення часу на ЕОМ при проведенні розрахунків, для обчислення течії необхідно буде близько 3 років при $Re=10000$.

Обмеженість можливостей сучасної обчислювальної техніки у використанні методів прямого чисельного моделювання стала стимулом для розвитку методу великомасштабних структур. При використанні даного методу виконується математичне розділення великих і дрібних структур. При цьому для розрахунку

дрібномасштабної турбулентності необхідні емпіричні або напівемпіричні моделі турбулентності. Розрахунок великих вихрів здійснюється прямим чисельним моделюванням. Спектри дрібномасштабної турбулентності практично не відрізняються одна від іншої для різних типів течій. Тому метод моделювання великих вихрів є проміжним між підходом Рейнольдса і прямого чисельного моделюванням. Цей метод позбавлений суттєвого недоліку при використанні методу Рейнольдса зв'язаного з усередненням турбулентності по всіх масштабах, і вимагає, в порівнянні з методом прямого чисельного моделювання, менших затрат машинного часу. Однак досвід, накопичений при використанні даних методів не дозволяє зробити висновок про його однозначну перевагу в порівнянні з підходом Рейнольдса при чисельному моделюванні великомасштабної турбулентності.

В літературі досить широко описані різного роду напівемпіричні моделі турбулентності, що використовуються в практиці розрахунків і при наукових дослідженнях. При розрахунку диференціальних рівнянь основні напівемпіричні моделі турбулентності для удаваних турбулентних напружень засновані на концепції турбулентної в'язкості.

1. Модель турбулентної в'язкості.

Для течій загального виду, Буссинеском уведена турбулентна в'язкість, що зв'язує градієнтами швидкостей усередненого потоку з напруженнями Рейнольдса, та може бути записана в тензорному вигляді в такий спосіб:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_\tau \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

де u_i - складові швидкості; x_j - складові координат.

Член, що містить символ Кронекера δ_{ij} вказує на те, що сума трьох нормальних напружень рівна подвоєній кінетичній енергії турбулентності k . Коефіцієнтом турбулентної в'язкості є множник ν_τ , який залежить від стану турбулентності. Коефіцієнт турбулентної в'язкості розраховується на уявленні про його пропорційність турбулентним масштабам швидкості \bar{u} і довжини l :

$$\nu_\tau = \bar{u} l \quad (10)$$

Концепція турбулентної в'язкості використовується в різних моделях турбулентності, що відрізняються способами розрахунку турбулентних масштабів.

Шлях змішання задається емпірично. Отримані допустимі результати для простих течій, в яких довжина шляху змішання може бути задана нескладними виразами. Модель змішання потребує нульових значень турбулентної в'язкості в місцях, де $\partial u / \partial y = 0$. Але зазвичай це не відповідає дійсності. Відповідно до моделі, перенос турбулентної енергії відсутній, тобто дисипація дорівнює генерації турбулентної енергії, а турбулентність повинна знаходитися в стані локальної рівноваги, що є основним недоліком.

2. Моделі переносу напружень Рейнольдса.

Модель переносу напружень Рейнольдса характеризується застосуванням рівняння для переносу при окремих компонентів турбулентних напружень, що є удаваними. Моделі, що базуються на використанні цих рівнянь, називають схемами замикання другого порядку. Рівняння для турбулентних дотичних напружень можуть бути виведені точно, але для отримання замкнутої системи необхідне залучення модельних співвідношень. Моделі цього класу мають великі потенційні можливості для розрахунку складних течій, але є значно більш складними, чим попередній клас моделей.

3. Моделювання з використанням k - ϵ моделі.

У роботах для розрахунку закрученого потоку, де використовувалась стандартна k - ϵ модель, виявилось, що при досить інтенсивному закрученні отримана істотна розбіжність з експериментальними даними. Тому були зроблені виправлення в підборі нових значень модельних констант, що входять у модель турбулентності. Однак такий підхід через сильну залежність значень констант від характеру і режиму течій не виправдує себе що істотно знижує універсальність моделі.

Ефективним способом модифікації напівемпіричних моделей турбулентності є використання аналогії між ефектом масових сил, обумовлених доцентровим і коріолісовим прискоренням, та ефектом масової сили, обумовленої гравітаційним полем. При цьому довжину шляху змішання l представляють у виді лінійної функції числа Річардсона Ri :

$$l = l_0 (1 - \beta Ri) \quad (1.11)$$

де β - емпірична константа, l_0 - довжина шляху змішання для стандартної моделі.

Відношення турбулентної енергії масових сил до дотичних напружень визначається числом Річардсона. При цьому масові сили можуть бути створені гравітаційним полем або полем відцентрових сил.

Такий підхід був успішно використаний для чисельного аналізу розвитку граничного шару на скривленій поверхні і розвитку пристінного тангенціально спрямованого потоку на круглому циліндрі.

Незважаючи на успіхи в застосуванні методу, було встановлено, що при використанні настільки простої моделі, як модель шляху змішання, для кожної нової геометрії течії необхідно вводити свій розподіл довжини цього шляху.

Лінійний масштаб в двохпараметричних моделях турбулентності визначається шляхом рішення рівнянь переносу для швидкості дисипації турбулентної кінетичної енергії і турбулентної кінетичної енергії, тому модифікація не можлива в простому представленні лінійного масштабу у виді функції числа Річардсона. Вона повинна моделюватися заміною коефіцієнтів у членах рівнянь переносу турбулентних характеристик на вирази, що залежать від числа Річардсона Ri . Проте таке рівняння є менш точним і містить велику частку емпіризму, чим рівняння переносу турбулентної кінетичної енергії.

4. Чисельне рішення рівнянь гідромеханіки.

Розвиток ЕОМ, чисельних алгоритмів, моделей турбулентності визначили появу робіт, у яких розрахунок гідродинаміки ведеться на основі чисельного рішення рівнянь гідромеханіки [15].

При використанні системи рівнянь Нав'є – Стокса рух рідини розглядається в площині, перпендикулярній до осі апарата, де має місце тільки тангенціальна і радіальна складові швидкості. Отже осьова швидкість приймаються рівними нулю як і похідні по осьовій координаті. Також передбачається, що сталий рух рідини. Автором також робиться допущення, виходячи з умови нерозривності розподілу радіальної швидкості, що $v_r = \text{const}$.

В технічних рішеннях при застосування вихрових апаратів були виявлені специфічні аеродинамічні особливості - малі подовжні градієнти статичного і повного тиску, значні поперечні та істотні перевищення тангенціальних компонентів усереднених швидкостей відносно осьових і радіальними, неоднозначність режимів течії, неоднорідний характер турбулентності, прецесія вихрового ядра, ежекційний ефект в осьовій зоні закрученого потоку, ефект Ранка (енергорозділення) і інші. Розглянуто задачу як симетричну відносно вісі, при розв'язку задачі використовуються змінні Гельмгольца.

1.6 Висновки до аналітичного огляду стану питання

Недоліками існуючих установок для змішування є: відсутність можливості регулювання коефіцієнта тертя шляхом заміни внутрішнього покриття барабана, відсутність можливості встановлення пересипних полиць в барабані. Установа для дослідження змішування сипкого матеріалу, конструкція якої буде відрізнятися від зазначених вище тим, що буде містити регульоване внутрішнє покриття барабана та можливість закріплення та зняття пересипних полиць, значно покращить дослідження траєкторії руху сипкого матеріалу. Крім того, експериментальна установка відрізнятиметься від інших універсальністю, що важливо.

Аналіз існуючих підходів до математичного опису змішування сипкого матеріалу в обертовому барабані показав, що доцільне використання диференціального рівняння Нав'є – Стокса, що передбачає підрахунок зміни тиску та швидкості. При використанні рівняння Нав'є – Стокса в сипкого матеріалу із самого початку задана певна кількість енергії, що може концентруватись в турбулентних потоках. Складність полягає в складності турбулентних потоків, які математична модель повинна описати, оскільки турбулентність вивчена науковою спільнотою недостатньо. Окрім цього, важливо враховувати в'язкість сипкого матеріалу. Інакше кажучи, складнощі виникають при забезпечення хорошої апроксимації рівняння нерозривності та реалізації граничних умов. Проте при програмній апроксимації швидкостей сипкого матеріалу до вузлових значень області

руху сипкого матеріалу та невеликому кроку сітки, використання рівняння Нав'є – Стокса є перспективним та доцільним.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Опис експериментальної установки

На кафедрі ХПСМ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” впроваджена лабораторна установка та розроблена методика визначення швидкостей і траєкторій руху сипких матеріалів в барабанних апаратах. Схема установки приведена на рисунку 2.1.

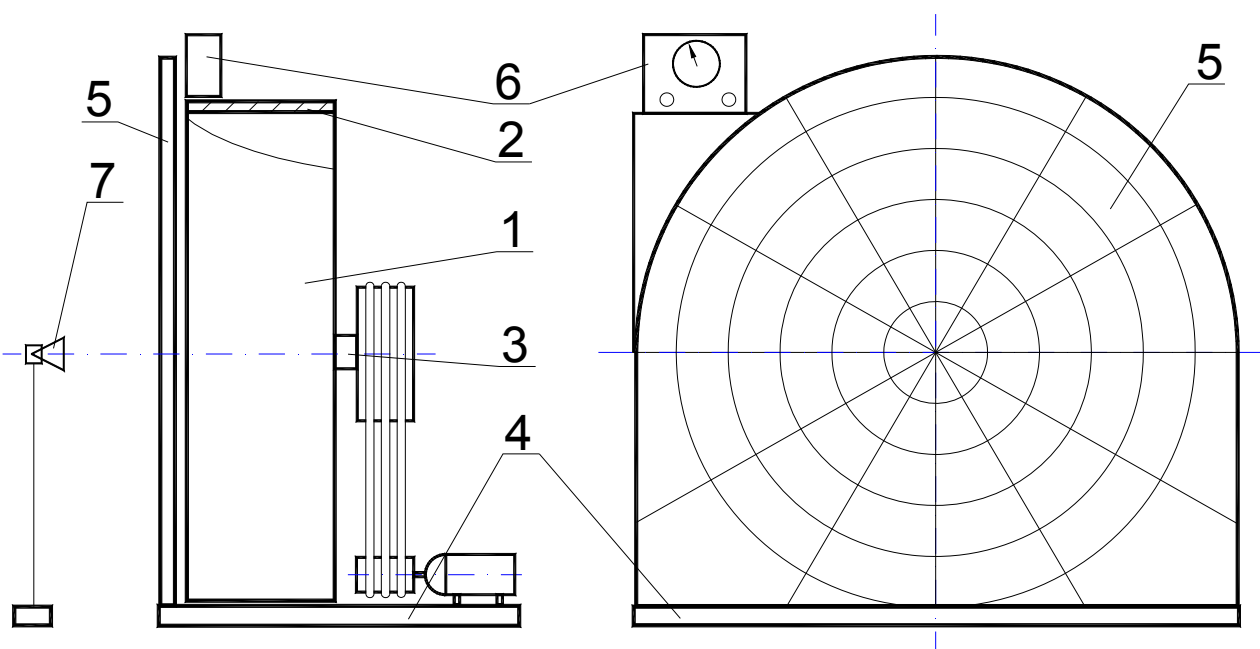


Рисунок 2.1 — Схема експериментальної установки:

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

Лабораторна установка, що наведена на рисунку 2.1, містить такі елементи конструкції: барабану 1, який містить металевий і прозорий диски та обичайку. Робоча камера має розмір $\text{Ø}485 \times 175$ мм. Обичайка, що знаходиться всередині барабану, має внутрішнє покриття 2 з можливістю заміни для моделювання різних значень зовнішнього тертя між сипким матеріалом і корпусом утановки. Також є можливість встановлення пересипних полиць. Диск 5, що є нерухомим, встановлено перед установкою. На диску 4 нанесена шкала з використанням циліндричної системи координат. Це дозволяє наочно спостерігати та визначати процес стабілізації руху при фільмуванні експерименту. Диск барабану 1 є металевий та з'єднаний з

приводом 3. Привід, барабан та нерухомий прозорий диск встановлені на рамі 4. панель індикації та управління 6 міститься над барабаном. Відеокамера 7 встановлена співвісно з барабаном.

Дослідна установка працює наступним чином. Привідний механізм забезпечує рух барабану за допомогою приводу із швидкістю від 0 до 100 обертів за хвилину на холостому ході, при завантаженні 5 кг до 50 об/хв. Завантаження сипкого матеріалу відбувається через бокову стінку барабана. Завантаження сипкого матеріалу відбувається вагою в 1 кг, 3 кг, 5 кг. Відбувається запис на камеру після встановлення сталого режиму руху матеріалу, яка має розширення 1920x1080 пк та частоту 60 кадрів за секунду.

При дослідженнях та експлуатації установки відносна похибка вимірювання, визначена постійною швидкістю обертання барабану, становить до 15%.

2.2 Технічна характеристика експериментальної установки

Технічна характеристика експериментальної установки для дослідження траєкторії руху сипких речовин в барабанних апаратах, описана в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Технічна характеристика експериментальної установки

Внутрішній діаметр барабана	$D_0 = 0,485 \text{ м}$
Довжина барабана	$L_0 = 0,175 \text{ м}$
Товщина футеровки	$\delta = 0,003 \text{ м}$
Кількість камер	$n = 1$
Вага матеріалу в барабані	$P = 1; 3; 5 \text{ кг}$
Форма часток матеріалу	напівсферична, циліндрична, кубічна

Продовження таблиці 2.1

Максимальна швидкість, з якою обертається барабан на холостому ході	$V = 100 \frac{\text{об}}{\text{хв}} = 1,6 \frac{\text{об}}{\text{с}}$
Розміри частинок матеріалу	$L_m = 4 - 6 \text{ мм}$
Роздільна здатність відеокамери	1920x1080 пк
Кадрова частота відеокамери	60 $\frac{\text{кадр}}{\text{с}}$

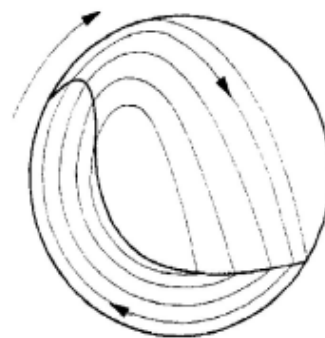
2.3 Режими руху сипкого матеріалу в експериментальній установці

В барабанних апаратах виділяють декілька режимів руху завантаження в барабані під час змішування матеріалу [16-18]:

1. Водоспадний режим. При водоспадному режимі (рисунок 2.2) сипкий матеріал піднімається на певну висоту та опускається траєкторією, яку описує функція параболи.



а)



б)

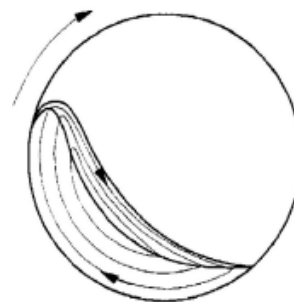
Рисунок 2.2 — Водоспадний режим руху:

а) знімок роботи експериментальної установки; б) схема барабанного апарата

2. Каскадний режим. При каскадному режимі (рисунок 3.3) сипкий матеріал не піднімається високо, проте частинки матеріалу внаслідок перекочування обертаються. Інтенсивний каскадний режим руху є найбільш пагубним для цілісності частинок сипкого матеріалу через потужні удари частинок матеріалу об стінки барабана та інші частинки матеріалу.



а)



б)

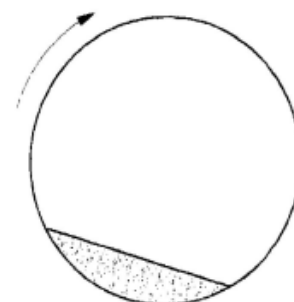
Рисунок 2.3 — Каскадний режим руху:

а) знімок роботи експериментальної установки; б) схема барабанного апарата

3. Перехідний режим. Перехідний режим також називаються змішаним. Рух сипкого матеріалу в цьому режимі характеризується для деякої кількості частинок матеріалу каскадним режимом, а для іншої – каскадним.

На експериментальній установці визначено наступні режими руху: ковзання, підйом, прокат, каскадний, водоспадний, центрифугування.

При ковзанні маса сипкого матеріалу сковзає по поверхні обертового барабана і взаємне переміщення барабана і матеріалу майже відсутнє. Режим ковзання показаний на рисунку 2.4.



а)

б)

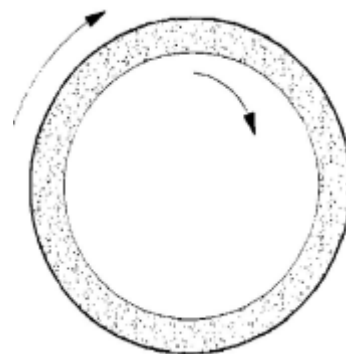
Рисунок 2.4 — Режим руху ковзання:

а) знімок роботи експериментальної установки; б) схема барабанного апарата

Центрифугування – це процес розділення неоднорідних систем під дією поля відцентрових сил. Знаковою відмінністю цього режиму руху сипкого матеріалу є високі швидкості обертання барабана (рисунок 2.5).



а)



б)

Рисунок 2.5 — Режим руху центрифугування:

а) знімок роботи експериментальної установки; б) схема барабанного апарата

3 МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Послідовність обробки та аналізу отриманих даних

Після того, як в барабан експериментальної установки засипали дозовано сипкий матеріал, деякі частинки якого пофарбовані в яскравий колір для наочності, та досягнули сталого режиму руху сипкого матеріалу, знімаємо на камеру процес змішування частинок сипкого матеріалу.

Проводимо кадрування відзнятого фільму на окремі рисунки з інтервалом часу 0.020 сек. для визначення траєкторії руху та швидкостей частинок матеріалу.

Визначаємо траєкторії та швидкості руху частинок за допомогою програм, написаних на функціональній мові AutoLisp в середовищі AutoCAD. Отримані дані записуються в файл для обробки за допомогою редактора електронних таблиць MS Excel.

Будуємо сіткову модель за допомогою програм AutoLisp для подальшої обробки в редакторі ParaView.

Інтерполюємо швидкості до вузлів сіткової моделі за допомогою програмного забезпечення, написаного на мові програмування C++, із застосуванням методики зважування із зворотною відстанню (The inverse-distance weighted procedure - IDW). Цей спосіб інтерполяції базується на використанні величин зворотних відстаней між вузлами інтерполяції, зведених в деяку ступінь. IDW метод характеризується універсальністю, високим ступенем точності та легкою реалізацією на ЕОМ.

IDW метод характеризується тим, що частинки сипкого матеріалу, які знаходяться близько один до одної, мають схожі властивості. Для знаходження шуканого значення використовуються опорні точки в околі точки, що шукається.

Інтерполяцію значень поверхні з урахуванням значень в околі найближчих точок має високу ступінь точності при однакових характеристиках поверхні в різних частинах досліджуваної області. Суть методу полягає у зменшенні значення ваги

при збільшенні відстані від шуканої точки. Кількість опорних точок збільшує точність розрахунку.

У рамках IDW методу, шукане значення функції для довільної точки визначається рівнянням (3.1):

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^G \frac{P_j}{D_{ij}^n}}{\sum_{j=1}^G \frac{1}{D_{ij}^n}} \quad (3.1)$$

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 $n = 2$).

Обробка отриманих значень проводиться за допомогою програмного забезпечення ParaView та програмного забезпечення, написаного на мову програмування C++. Вказаний програмний комплекс дає можливість візуалізації розрахункових сіток, полів швидкостей, векторних полів, ліній току, побудови ізометричних поверхонь та алгебраїчних перетворень над заданими полями. Рішення рівнянь для визначення ліній току здійснюється методом Рунге – Кутта четвертого порядку точності.

Перевага методів Рунге-Кутта полягає в тому, що обчислювальні алгоритми є однорідними, тобто не змінюються при переході від однієї точки до іншої, а крок змінюється відповідно до потреби точності обчислень, без ускладнення обчислювального алгоритму.

Методи Рунге-Кутта мають високу точність, причому обчислення можна проводити із змінним кроком: неважко зменшити крок там, де функція швидко змінюється, і збільшити в протилежному випадку.

Недоліком методів Рунге-Кутта є те, що для відшукування наближеного розв'язку в точці заданого відрізка необхідно виконати декілька обчислень значень функцій [19].

3.2 Методи обробки результатів

Розроблено 3 методи обробки результатів, серед яких:

- автоматизований режим;
- інтерактивний режим по двох позиціях частинки сипкого матеріалу;
- інтерактивний режим по траєкторії переміщення.

Для всіх методів розроблене відповідне програмне забезпечення: для автоматизованого режиму – за допомогою мови програмування C++, а для інтерактивний – за допомогою функціональної мови AutoLisp.

Автоматизований режим обробки результатів експерименту зображено на рисунку 3.1, 3.2. ЕОМ автоматично визначає частинки сипкого матеріалу на виділеній області.

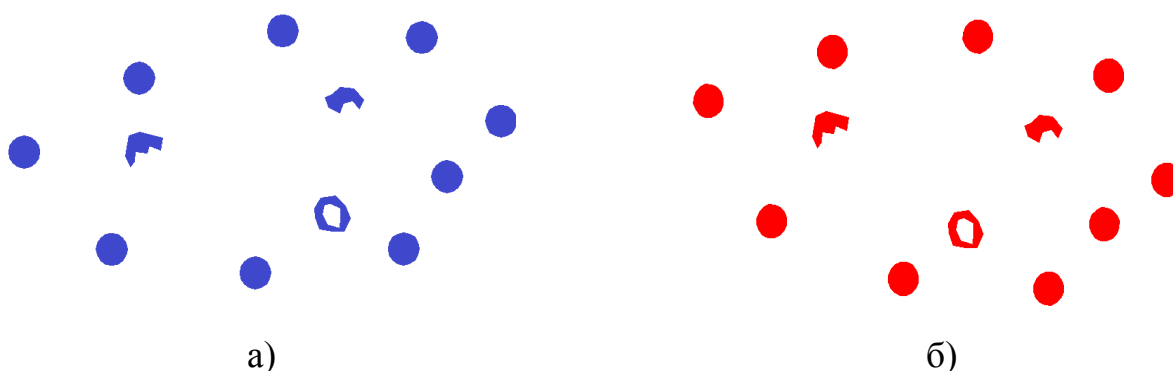


Рисунок 3.1 – Автоматизований режим обробки результатів:

а) фотографія 1; б) фотографія 2.

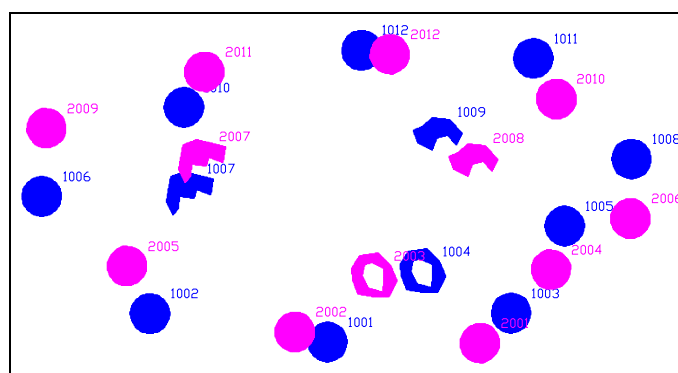
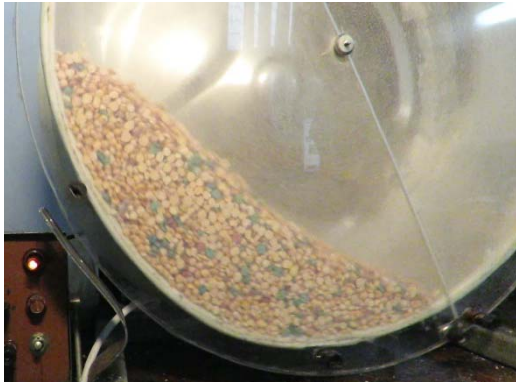
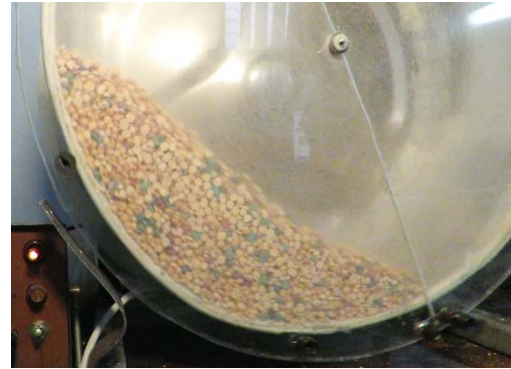


Рисунок 3.2 – Визначення переміщення частинок за допомогою автоматизованого методу обробки результатів експерименту.

Інтерактивний режим (рисунок 3.3, 3.4) по двом позиціям частинки вимагає ручного виділення частинок матеріалу. У всьому іншому принцип схожий на попередній метод.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Інтерактивний режим по 2 фотографіям обробки результатів:

а) фотографія 1; б) фотографія 2.

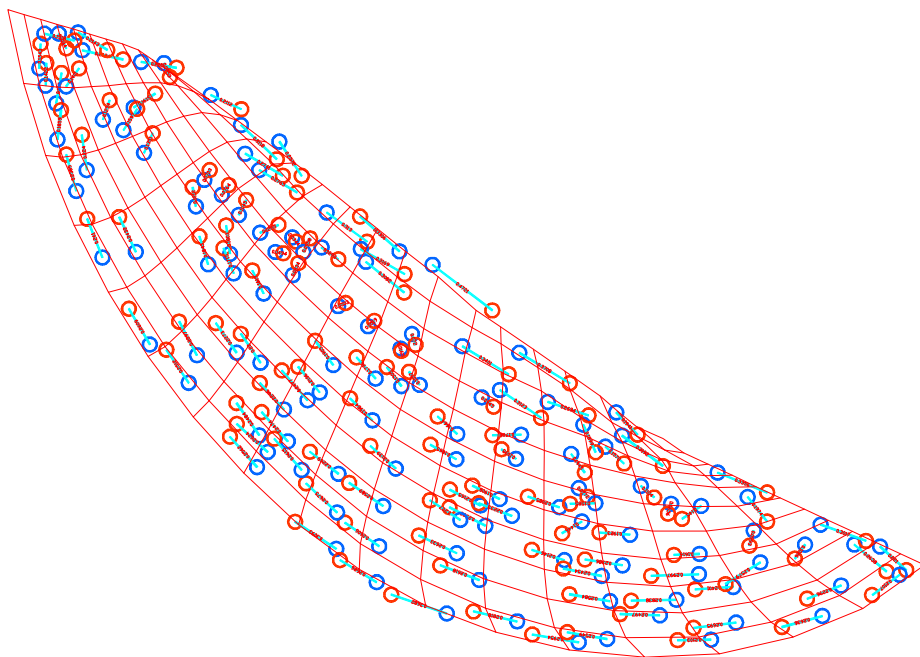


Рисунок 3.4 – Визначення переміщення частинок за допомогою інтерактивного режиму по 2 фотографіям частинки обробки результатів експерименту.

Інтерактивний режим (рисунок 3.5, 3.6) по траєкторії переміщення передбачає почергове виділення частинок матеріалу, використовуючи фотографії, створені кадруванням фільму.

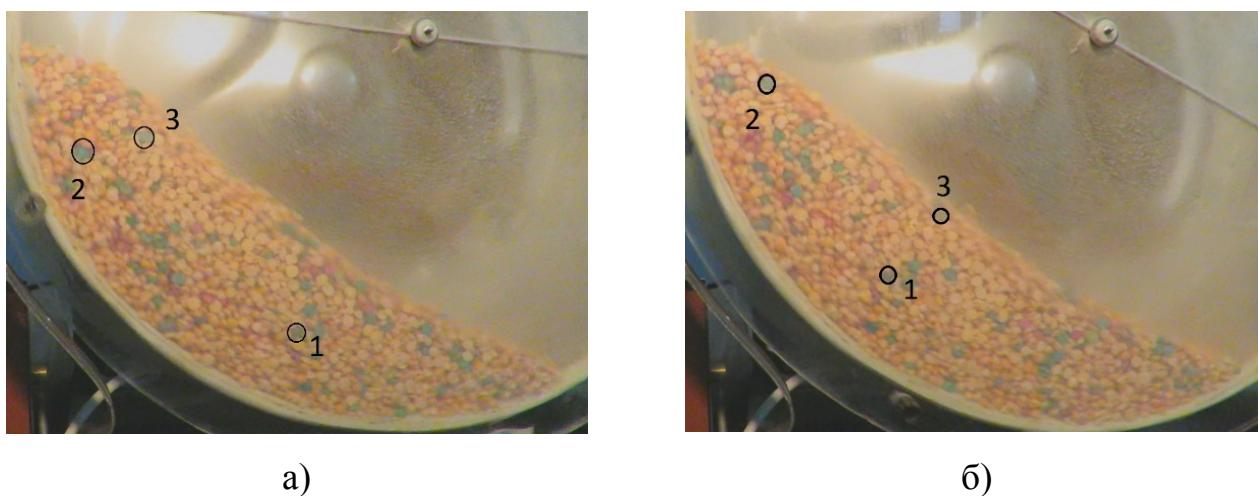


Рисунок 3.5 – Інтерактивний режим по траєкторії переміщення обробки результатів: а) фотографія 1; б) фотографія 2.

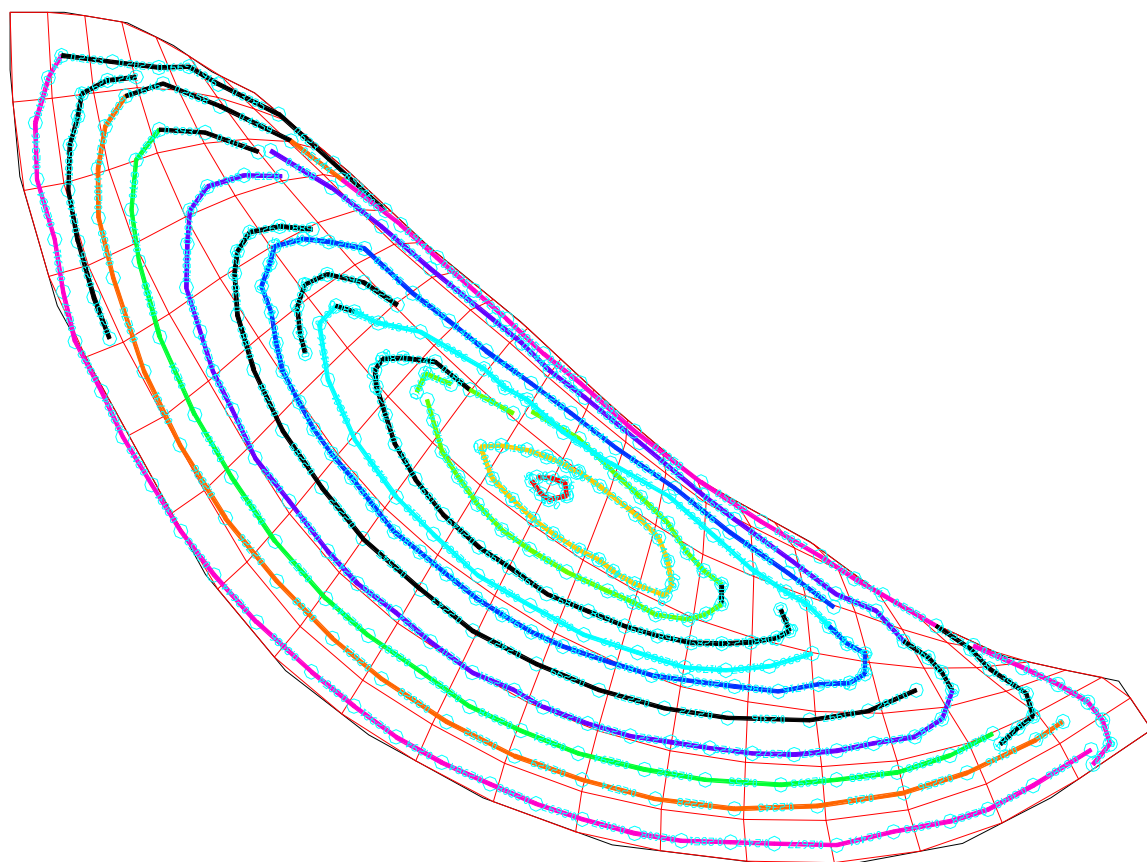


Рисунок 3.6 – Визначення переміщення частинок за допомогою інтерактивного режиму по траєкторії переміщення обробки результатів експерименту.

3.3 Достовірність розрахункових значень

Достовірність розрахункових значень експериментальних даних вимагає визначення похиби та довірчої ймовірності, що їй відповідає [20-26]. Використання прямих методів для обробки результатів вимірювань вимагає для розрахунків наступного алгоритму.

Наведена залежність для визначення середньоарифметичного або дійсного значення величини, що вимірюється:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2)$$

де x_i - значення величини, що вимірюється, n – число вимірювань.

Для визначення абсолютних значень похибок при окремих вимірюваннях використовується наступна залежність:

$$\Delta x = |\bar{x} - x_i| \quad (3.3)$$

Піднесені до квадрату при окремих вимірюваннях абсолютні похибки визначаються наступним чином:

$$(\Delta x_1)^2, (\Delta x_2)^2, (\Delta x_3)^2, \dots, (\Delta x_n)^2 \quad (3.4)$$

Враховується дисперсія S , що є чисельною мірою випадкової похибки внаслідок неконтрольованих та невідомих параметрів.

Для визначення при окремому результаті вимірювання середньої квадратичної похибки використовувалась наступна залежність:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (3.6)$$

Для визначення усередненої квадратичної похибки середнього арифметичного використовувалась наступна залежність:

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.7)$$

Оскільки для досить великої кількості вимірювань є справедливими значення, що визначені внаслідок рівняння (3.7), то визначається довірча ймовірність та довірчий інтервал для невеликої кількості вимірювань. При розрахунках використовується розподіл ймовірностей Стюдента [21, 23, 24]. Коефіцієнт Стюдента для шести вимірювань коефіцієнт Стюдента $t = 1,1037; 2,447; 5,376$, оскільки під час визначення довірчої ймовірності зазвичай приймаються наступні значення: $P = 0,68; 0,95; 0,997$.

Виходячи із цього, похибка середнього результату прямих вимірювань визначається наступним чином:

$$\theta = S_r \cdot t \quad (3.8)$$

Внаслідок неточностей датчиків, приладів для вимірювання та інструментів, виникають випадкові і систематичні похибки. Ці похибки, тобто похибки інструментального характеру, враховуються при визначенні похибки середнього вимірювання, що у загальному випадку визначається наступним чином:

$$\delta(\bar{x}) = \sqrt{\delta_{\text{дат}}^2 + \delta_{\text{пр}}^2 + \delta_{\text{окр}}^2}, \quad (3.9)$$

де $\delta_{\text{дат}}$ - похибки вимірювального датчика, приладу і округлення.

Похибка прямого вимірювання визначається рівнянням (3.10):

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\theta^2 + \delta^2(\bar{x}) + \delta^2(\psi_k)}, \quad (3.10)$$

де $\delta^2(\psi_k)$ - методична і систематична похибки.

Для повного значення величини, що вимірюється, використовується наступне рівняння:

$$\begin{cases} x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm \sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,68; \\ x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm 2\sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,95; \\ x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm 3\sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,997, \end{cases} \quad (3.11)$$

де $\mp \sigma(\bar{x})$, $\mp 2\sigma(\bar{x})$, $\mp 3\sigma(\bar{x})$ – границі довірчих інтервалів;

$\psi_k = \frac{\Delta x_k}{\bar{x}}$ – поправка на вплив систематичної похибки k – го фактору;

Δx_k – абсолютна систематична похибка k – го фактору.

Для визначення відносної похибки результату вимірювань використовується наступна залежність:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (3.12)$$

Всі похибки, перераховані вище, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Похибки вимірювань

Перетин № точки	T ₍₁₎	T ₍₂₎	T ₍₃₎	T ₍₄₎	T ₍₅₎	T ₍₆₎	\bar{x}	S	S _r	S _r *t	$\delta(\bar{x})$	ε
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1_1	0,12	0,11	0,13	0,11	0,12	0,10	0,11	0,00	0,004	0,011	0,01	10,60
1_2	0,13	0,14	0,33	0,12	0,16	0,15	0,17	0,01	0,033	0,080	0,08	46,84
1_3	0,14	0,18	0,35	0,15	0,20	0,17	0,20	0,01	0,031	0,076	0,08	39,37
1_4	0,17	0,17	0,36	0,17	0,20	0,20	0,21	0,01	0,030	0,074	0,07	35,15
1_5	0,22	0,17	0,34	0,15	0,21	0,20	0,22	0,00	0,028	0,068	0,07	31,63
1_6	0,25	0,18	0,38	0,19	0,23	0,20	0,24	0,01	0,030	0,074	0,07	31,47
2_1	0,25	0,28	0,46	0,17	0,20	0,20	0,26	0,01	0,043	0,106	0,11	41,02
2_2	0,28	0,21	0,44	0,21	0,26	0,19	0,27	0,01	0,038	0,092	0,09	34,96
2_3	0,30	0,24	0,46	0,23	0,22	0,20	0,27	0,01	0,039	0,096	0,10	35,38
2_4	0,29	0,23	0,50	0,27	0,23	0,20	0,29	0,01	0,044	0,108	0,11	38,04
2_5	0,27	0,24	0,46	0,34	0,25	0,20	0,30	0,01	0,038	0,093	0,09	32,03
2_6	0,27	0,24	0,46	0,23	0,20	0,20	0,27	0,01	0,040	0,097	0,10	36,89
3_1	0,29	0,21	0,37	0,24	0,23	0,20	0,26	0,00	0,026	0,064	0,06	25,26
3_2	0,24	0,24	0,37	0,18	0,21	0,21	0,24	0,00	0,027	0,067	0,07	28,23
3_3	0,20	0,27	0,39	0,19	0,21	0,20	0,25	0,01	0,032	0,077	0,08	31,86
3_4	0,24	0,24	0,42	0,20	0,19	0,20	0,25	0,01	0,035	0,085	0,09	34,33
3_5	0,17	0,19	0,41	0,29	0,14	0,21	0,23	0,01	0,041	0,099	0,10	42,92
3_6	0,09	0,14	0,20	0,21	0,09	0,11	0,14	0,00	0,022	0,053	0,05	38,80
4_1	0,12	0,11	0,22	0,08	0,12	0,10	0,13	0,00	0,019	0,047	0,05	37,94
4_2	0,13	0,17	0,34	0,13	0,18	0,14	0,18	0,01	0,033	0,081	0,08	44,62
4_3	0,15	0,20	0,38	0,18	0,22	0,19	0,22	0,01	0,034	0,082	0,08	38,18
4_4	0,19	0,18	0,38	0,21	0,21	0,21	0,23	0,01	0,030	0,073	0,07	32,63
4_5	0,26	0,20	0,42	0,15	0,20	0,19	0,24	0,01	0,040	0,097	0,10	41,09

Таблиця 3.1 – Похибки вимірювань (продовження)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4_6	0,25	0,19	0,41	0,20	0,23	0,18	0,24	0,01	0,035	0,085	0,09	35,44
5_1	0,25	0,32	0,42	0,18	0,21	0,19	0,26	0,01	0,038	0,094	0,09	36,47
5_2	0,25	0,21	0,42	0,24	0,26	0,19	0,26	0,01	0,033	0,082	0,08	31,68
5_3	0,27	0,23	0,43	0,23	0,24	0,20	0,27	0,01	0,033	0,082	0,08	31,22
5_4	0,27	0,23	0,47	0,24	0,23	0,19	0,27	0,01	0,040	0,098	0,10	36,15
5_5	0,27	0,26	0,52	0,24	0,25	0,19	0,29	0,01	0,047	0,116	0,12	40,57
5_6	0,27	0,22	0,51	0,24	0,23	0,19	0,28	0,01	0,047	0,115	0,12	42,02
6_1	0,30	0,23	0,43	0,26	0,27	0,20	0,28	0,01	0,033	0,081	0,08	29,27
6_2	0,28	0,26	0,40	0,20	0,21	0,20	0,26	0,01	0,032	0,077	0,08	30,52
6_3	0,25	0,25	0,48	0,21	0,23	0,19	0,27	0,01	0,043	0,105	0,11	39,54
6_4	0,23	0,19	0,41	0,17	0,23	0,18	0,23	0,01	0,037	0,091	0,09	39,12
6_5	0,14	0,16	0,34	0,16	0,14	0,15	0,18	0,01	0,032	0,079	0,08	44,21
6_6	0,09	0,12	0,20	0,19	0,07	0,08	0,13	0,00	0,022	0,054	0,05	43,19

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Дослідження руху частинок пласкої форми

Однією з основних задач при проектуванні машин і апаратів безперервної дії є розрахунок розподілу сипкого матеріалу за об'ємом барабана і часом його перебування. Для її вирішення необхідно визначити траєкторію руху матеріалу та швидкість окремих частинок, що оброблюються в апараті. Відомі дослідження, спрямовані на вивчення характеру руху сипкого матеріалу [27, 28], не дозволяють отримати точні дані про траєкторію руху та швидкість частинок.

Сипкий матеріал, що розглядається в роботі, складається з дискретних частинок макроскопічного розміру, між якими діють неконсервативні контактні сили. Для дослідження руху плаского матеріалу використовувався матеріал напівсферичної форми. Дослідження проводилось на лабораторній установці, яка показана на рисунку 4.1, відповідно методики розглянутої в попередній роботі. Маса завантажувального матеріалу становить 4 кг, та займає площу 17.8% перетину барабану. Розміри частинок 4-6 мм. Кількість обертів барабану складає 12.6 об/хв. Об'ємна вага – 785 кг/м³. Коефіцієнт внутрішнього тертя 0,44 – 0,53. Коефіцієнт тертя по внутрішньому покритті барабану 0,26 – 0,35 [29].

Траєкторія руху частинок визначалась за маркерами, і представлена на рисунку 5.1 у вигляді відповідних ліній току.

При кількості обертів барабану 13,6 об/хв, масі 3 кг, показанні вольтметра 10В, швидкість становить $W=0,3580$ м/сек.

Як видно із рисунку 4.2, режим руху матеріалу в барабані каскадний, тобто відбувається циркуляційний рух, при якому матеріал утворює замкнутий циркуляційний контур, при цьому частина матеріалу рухається по відкритій поверхні викривленого сегмента, або ж перебуває в контакті зі стінкою барабану.



Рисунок 4.1 – Лабораторна установка

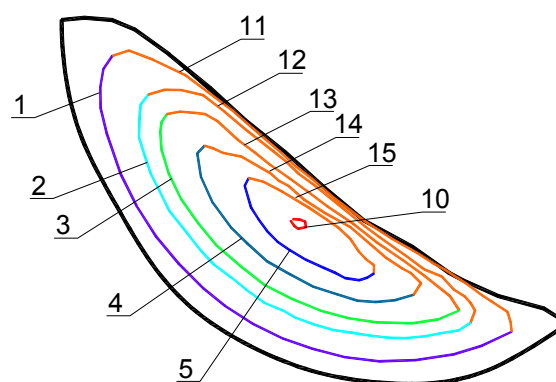


Рисунок 4.2 – Траєкторія руху

При циркуляційному русі в поперечному перерізі барабана (рисунок 4.2) весь матеріал можна розділити на дві зони – та, що рухається в напрямку обертання, а також та, що рухається у зворотному напрямку. В залежності від швидкості обертання та кількості матеріалу, існує точка або відрізок, де знаходиться циркуляційне ядро, навколо якого сипучий матеріал рухається по замкнутому контуру. В шарі, що рухається в напрямку обертання, частинки рухаються по концентричним траєкторіям, тому для наочності розглядаються швидкості руху окремо для вказаних шарів.

За визначеними напрямками та довжиною переміщення частинок, з урахуванням часу визначена швидкість руху частинок. На рисунку 4.3 приведена швидкість частинок для шарів що рухаються в напрямку обертання барабану, на рисунку 4.4 — в зворотному напрямку, або для шарів, що скочуються по відкритій поверхні, відповідно лініям току показаних на рисунку 4.2.

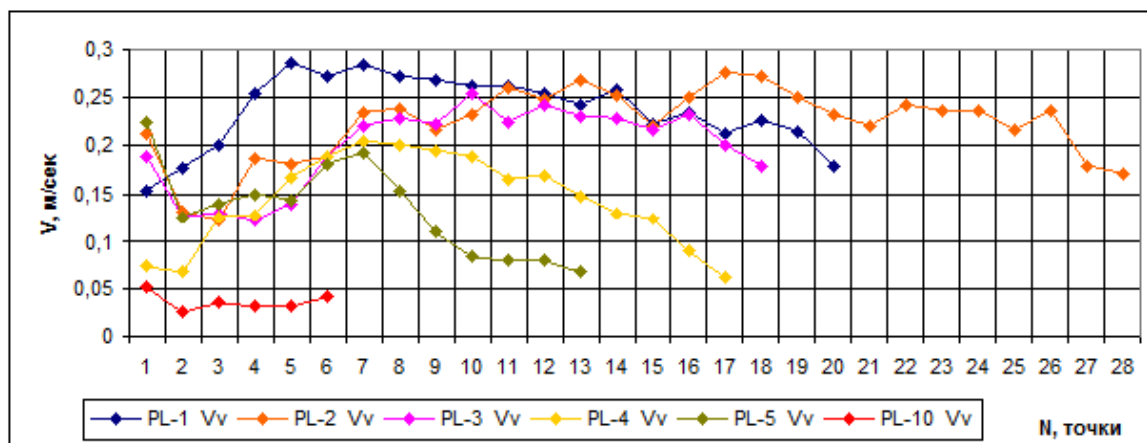


Рисунок 4.3 — Швидкість частинок в напрямку обертання барабану

З рисунків видно зміну швидкості в різних шарах матеріалу. Максимальна швидкість становить $V=0.28$ м/сек і знаходиться в зоні контакту з боковою стінкою. По мірі приближення до циркуляційного ядра середня швидкість зменшується, і становить $V=0.041$ м/сек.

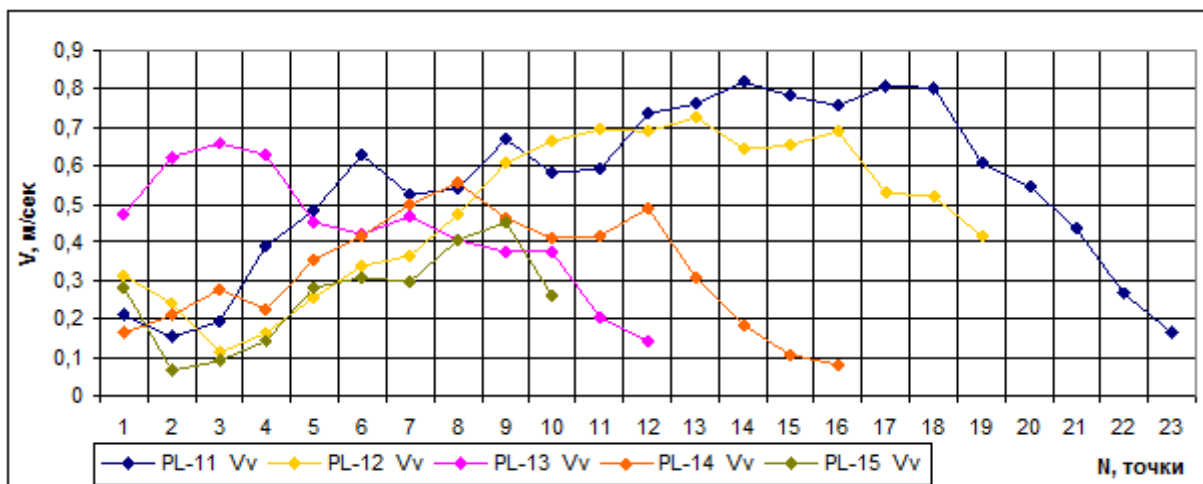


Рисунок 4.4 — Швидкість частинок в напрямку протилежному обертанню барабану

Швидкість матеріалу, що знаходиться вище циркуляційного ядра, збільшується по мірі віддалення, і максимальна швидкість на відкритій поверхні становить $V=0.82$ м/сек.

Зазвичай рух сипкого матеріалу є основою цілого ряду технологічних процесів. Наприклад, теплообмін в обертових теплообмінних апаратах, таких як печі, сушила, теплообмінники та інші, де необхідно враховувати рух твердої фази. Для подальших досліджень і можливості використання чисельного моделювання, необхідно на розрахункову область нанести сіткову модель, що являє собою сукупність вузлів і елементів. У даному випадку використана сіткова область розмірністю 27×15 скінчених елементів. Після інтерполяції складових швидкості до відповідних вузлів сітки отримаємо результати, які приведені на рисунках 4.5 – 4.9. Візуалізація виконана за допомогою програми ParaView.

Як видно з приведених рисунків, на сітковій моделі адекватно відображається рух матеріалу.

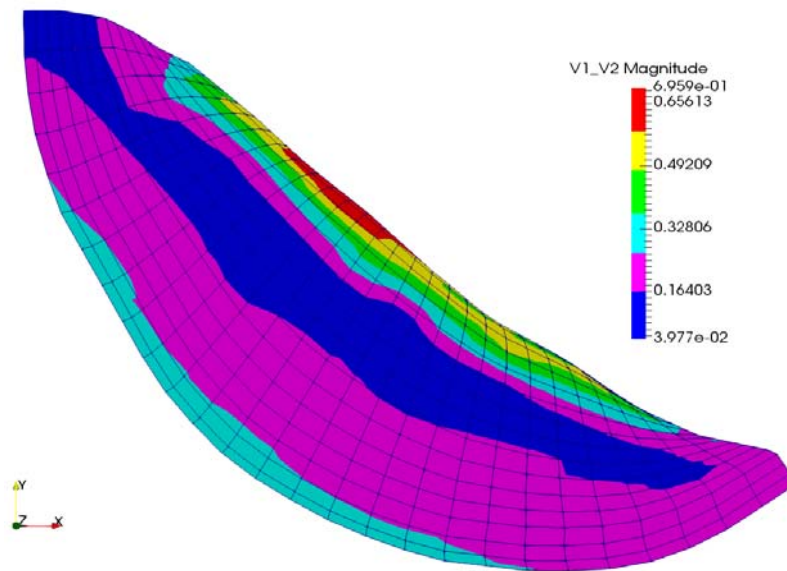


Рисунок 4.5 – Загальна швидкість

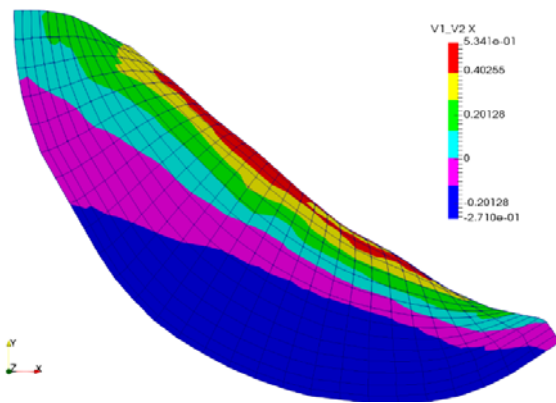
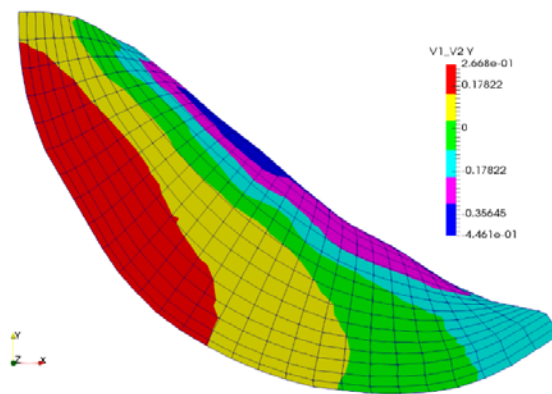
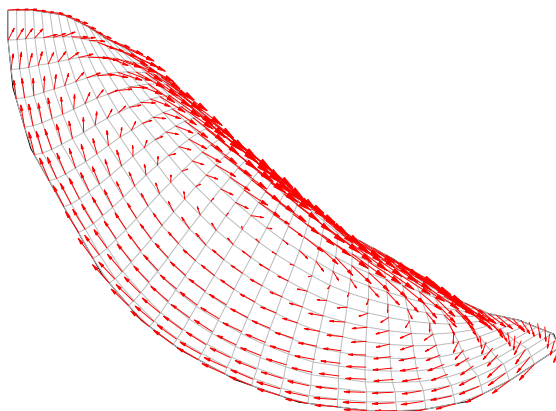
Рисунок 4.6 – Складова швидкості V_x Рисунок 4.7 – Складова швидкості V_y 

Рисунок 4.8 – Вектори швидкості

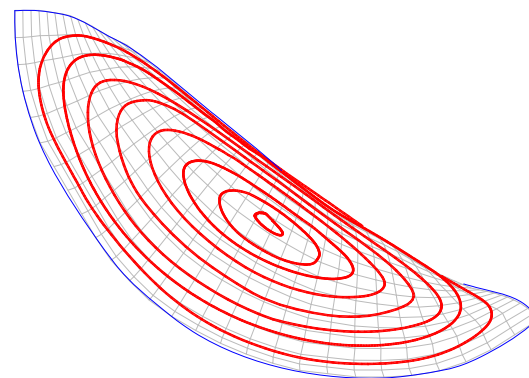
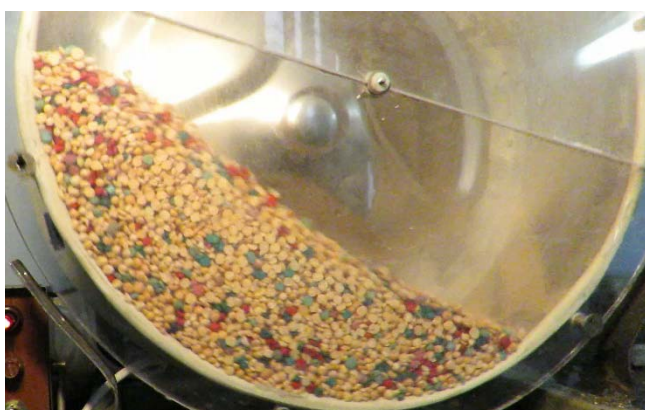
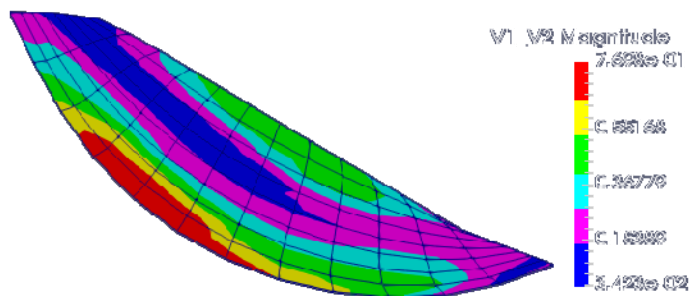


Рисунок 4.9 – Функція току

На рисунках 4.10 – 4.13 зображено дослідження сипкого матеріалу при завантаженості матеріалу в 19% та швидкості обертання барабану 60 об/хв.



а)



б)

Рисунок 4.10: а) Експериментальна установка при завантаженості в $S=19\%$ та швидкості обертання барабану $W=60$ об/хв; б) загальна швидкість матеріалу

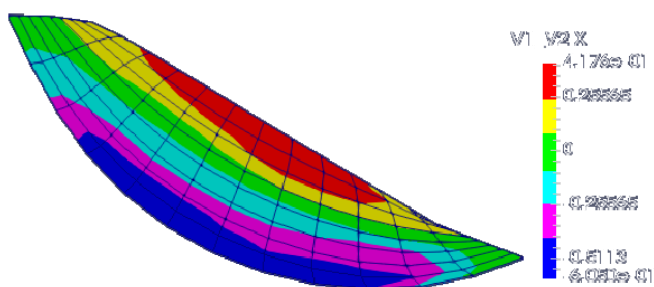
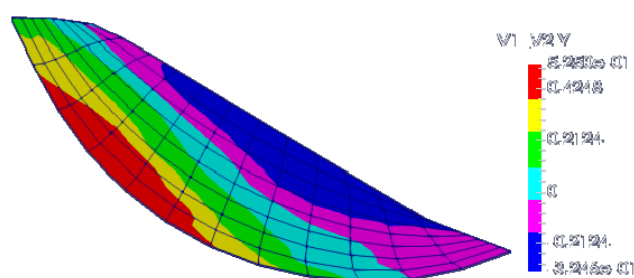
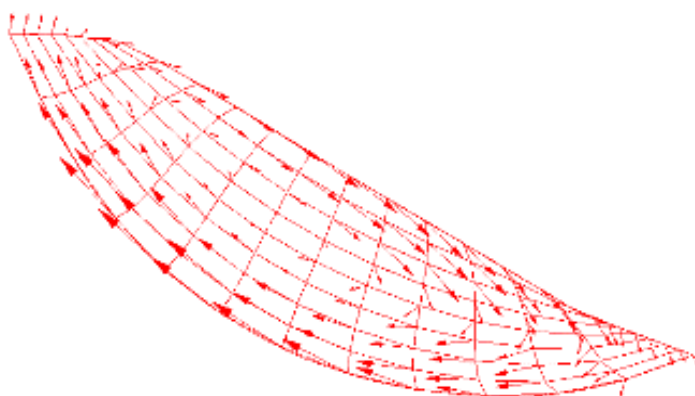
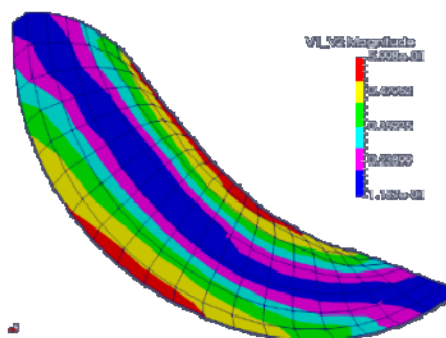
Рисунок 4.11 – Складова швидкості V_x Рисунок 4.12 – Складова швидкості V_y 

Рисунок 4.13 – Векторне поле

На рисунках 4.14 – 4.17 зображено дослідження сипкого матеріалу при завантаженості матеріалу в 22% та швидкості обертання барабану 35.5 об/хв.



а)



б)

Рисунок 4.14: а) Експериментальна установка при завантаженості в $S=22\%$ та швидкості обертання барабану $W=35.3$ об/хв; б) загальна швидкість матеріалу

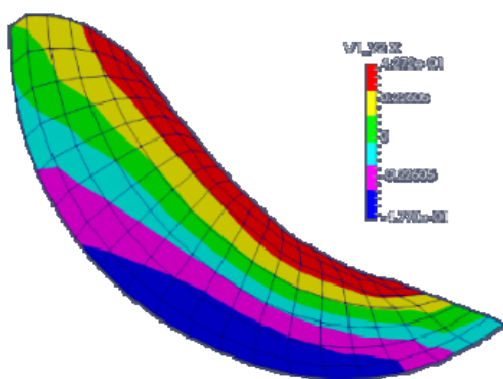
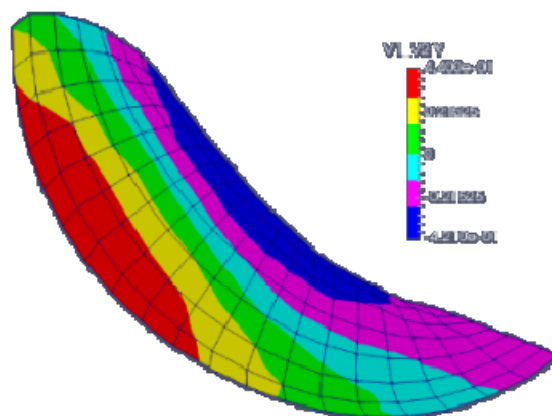
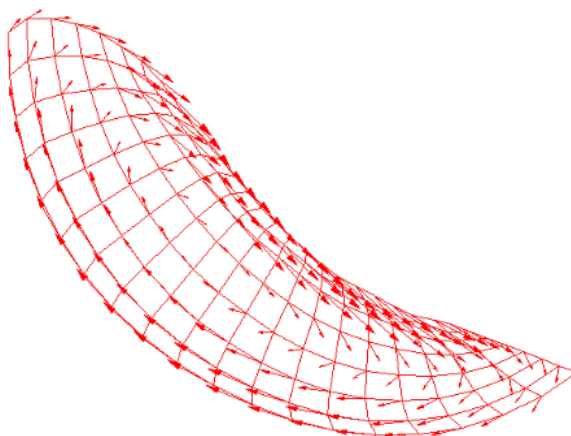
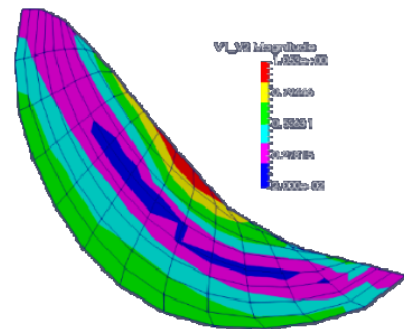
Рисунок 4.15 – Складова швидкості V_x Рисунок 4.16 – Складова швидкості V_y 

Рисунок 4.17 – Векторне поле

На рисунках 4.17 – 4.21 зображено дослідження сипкого матеріалу при завантаженості матеріалу в 22% та швидкості обертання барабану 12.6 об/хв.



а)



б)

Рисунок 4.17: а) Експериментальна установка при завантаженості в $S=22\%$ та швидкості обертання барабану $W=12.6$ об/хв; б) загальна швидкість матеріалу

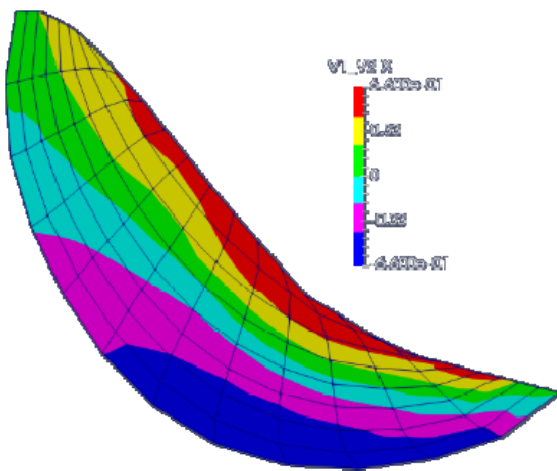
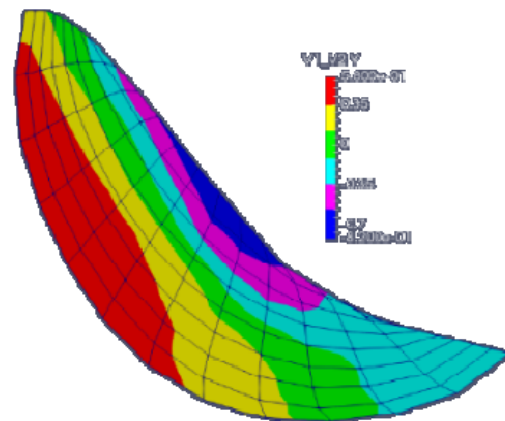
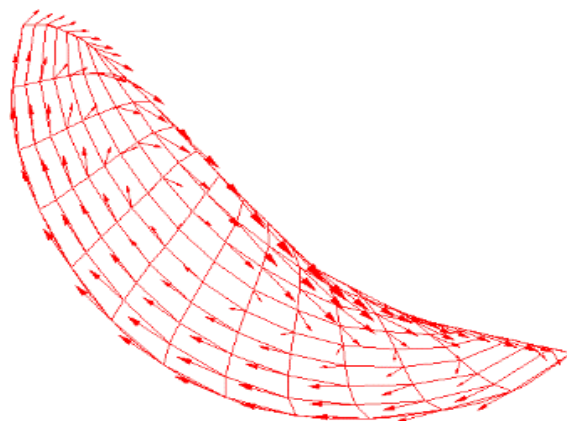
Рисунок 4.18 – Складова швидкості V_x Рисунок 4.19 – Складова швидкості V_y 

Рисунок 4.20 – Векторне поле

Аналіз процесу руху сипкого матеріалу в поперечному перерізі гладкого обертового барабана дозволяє зробити наступні висновки:

– в матеріалі утворюється циркуляційне ядро, навколо якого сипучий матеріал рухається по замкнутому контуру;

– при числі обертів 12.6 об/хв та заповненні 17.8% перетину барабану, максимальна швидкість частинок на відкритій поверхні викривленого сегмента становить $V=0.82$ м/сек;

– в шарі, що рухається в напрямку обертання барабану, частинки рухаються по концентричних траєкторіях з швидкостями, які залежні від кутової швидкості обертання барабана та внутрішнього тертя між частинками.

В подальшому планується дослідити рух сипкого матеріалу при зміні заповнення та швидкості обертання барабану, що дозволить визначити закономірності руху в залежності від вказаних факторів.

4.2 Дослідження руху частинок циліндричної форми

Машини барабанного типу широко застосовуються в промисловості для переробки дрібнодисперсних сипких матеріалів з специфічними властивостями, які часто ускладнюють протікання хімічних реакцій і процесів масо- і теплообміну. До них відносяться реактори, печі, сушили, холодильники, змішувачі, грохоти, гранулятори та інші. В даній роботі досліджено рух сипучого матеріалу з частинками циліндричної форми в обертовому барабанному апараті. Вказана система є загальною для значного класу машин і широко використовується в різних галузях промисловості.

Розрахунок розподілу сипучого матеріалу по об'єму барабана є основною задачею при проектуванні машин і апаратів безперервної дії. Для вирішення даного питання необхідно визначити швидкість руху матеріалу в різних частинах барабану і їх траєкторію руху в барабанному апараті.

Сипкий матеріал який використовується в досліді складається з однорідних частинок циліндричної форми, характеристики яких зображено в таблиці 4.1. Дослідження проводились на лабораторній установці, яка зображена на рис.1. Маса завантаженого матеріалу становить 2 і 3 кг. Розмір частинок матеріалу 3-4 мм. Тип синтетичної смоли: термопластичні. Частота обертання барабану становить 85 об/хв.

Таблиця 4.1 — Характеристики матеріалу циліндричної форми

Властивості	Умови випробування	Величина
Фізичні		
Об'ємна вага		1.04 кг/см ³
Ливарна усадка, 3.2 мм		0.4-0.7 %
Показник текучості розплаву	220°C/10 кг	21 г/10хв
Механічні		
Межа міцності при розтягуванні, 3.2 мм	50 мм/хв	460 кг/см ²
Відносне подовження при розриві, 3.2 мм	50 мм/хв	40 %
Модуль пружності при розтягуванні, 3.2 мм	1 мм/хв	21.2 кг/см ²
Напруження при згині, 3.2 мм	15 мм/хв	740 кг/см ²
Модуль пружності при згині, 3.2 мм	15 мм/хв	25 кг/см ²
Ударна в'язкість за методом Ізода, 6.4 мм (з надрізом)	23°C	32 кг/см ²
	-30°C	13 кг/см ²
Ударна в'язкість за методом Ізода, 3.2 мм (з надрізом)	23°C	35 кг/см ²
	-30°C	13 кг/см ²
Твердість за Роквеллом	Шкала R	108
Термічні		
Температура згину під навантаженням, 6.4 мм (необпалений зразок)	18.6 кг	87°C
	4.6 кг	91°C
Температура розм'якшення за Віка	5 кг, 50°C/год	93°C

Траєкторія руху частинок в барабані визначалась за допомогою маркерів і показана на рисунку 4.19 у вигляді ліній току.



Рисунок 4.18 - Лабораторна установка

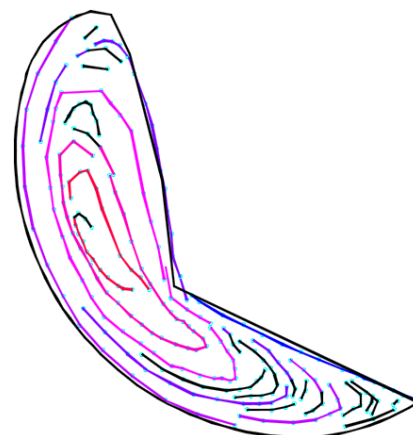


Рисунок 4.19 - Траєкторія руху частинок

Із зображення видно що режим руху матеріалу водоспадний, тобто переважна кількість матеріалу відривається від стінок барабану а не перекочується як при каскадному русі. Скінченноелементна сітка та її границі зображено на рисунку 4.20 і рисунку 4.21.

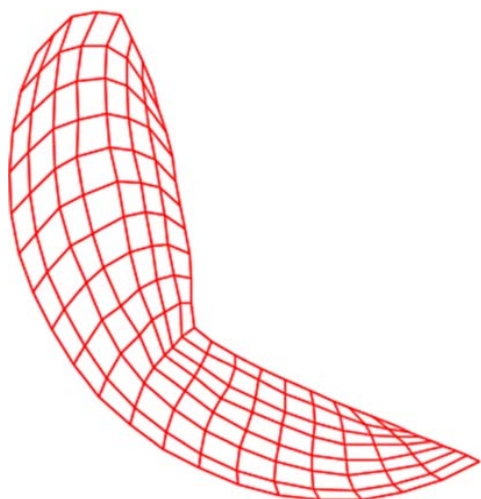


Рисунок 4.20 – SE сітка

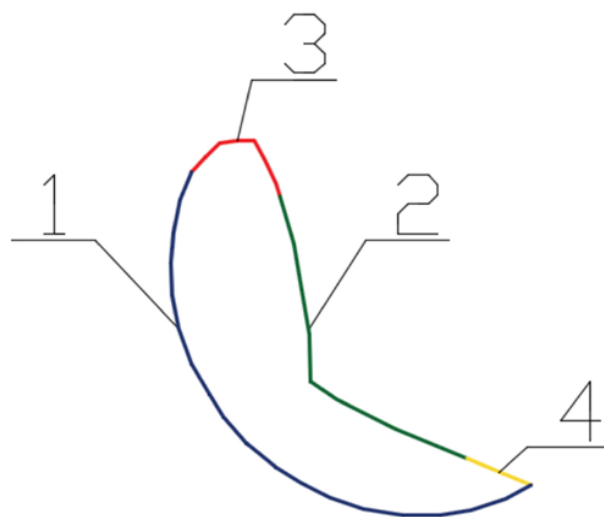


Рисунок 4.21 – Границі SE сітки

Щоб забезпечити можливість використовувати метод чисельного моделювання, і виконання подальших досліджень необхідно нанести сіткову модель

на розрахункову область, яка являє собою сукупність вузлів і елементів. Сіткова область яка використана в даному випадку має розмірність 20x8 скінченних елементів. Після інтерполяції складових швидкості до відповідних вузлів сітки отримаємо результат, приведений на рисунку 4.23. За допомогою програми ParaView була виконана візуалізація.

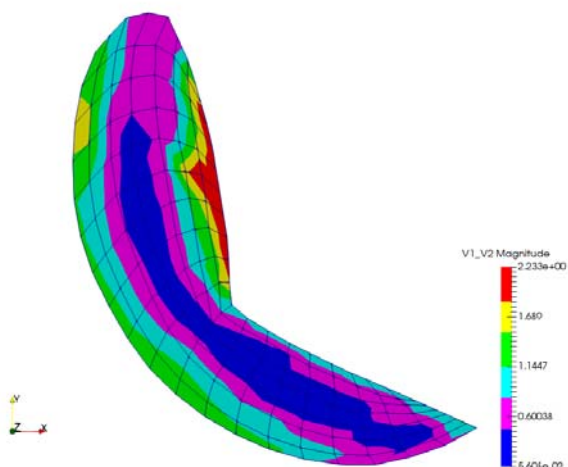


Рисунок 4.22 - Загальна швидкість

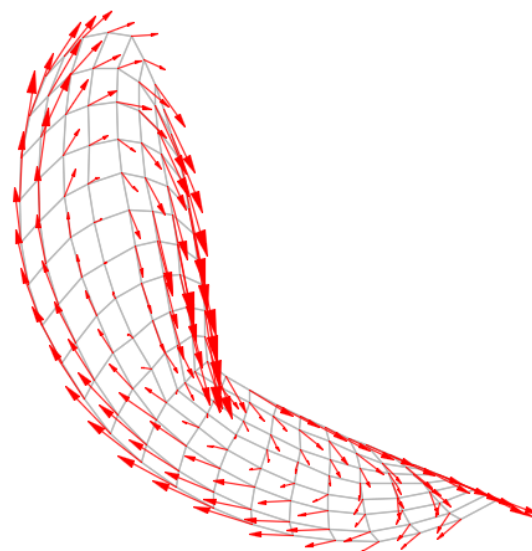


Рисунок 4.23 - Вектори швидкості

З рисунків видно, що в процесі руху виникає 2 циркуляційних контури, один з яких знаходиться в шарі каскадного режиму руху, інший у шарі водоспадного режиму. Максимальна загальна швидкість становить $V=2.2$ м/сек і знаходиться в зоні водоспадного режиму руху матеріалу (рисунки 4.14).

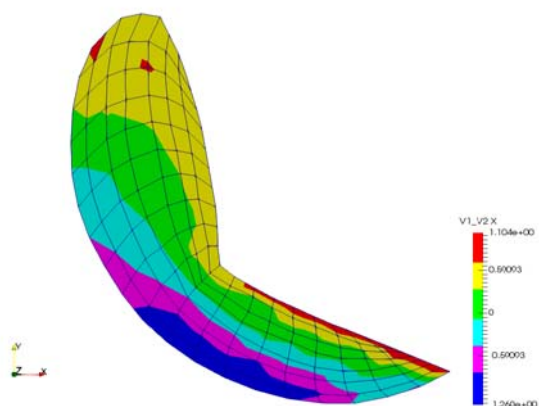


Рисунок 4.24 - Складова швидкості V_x

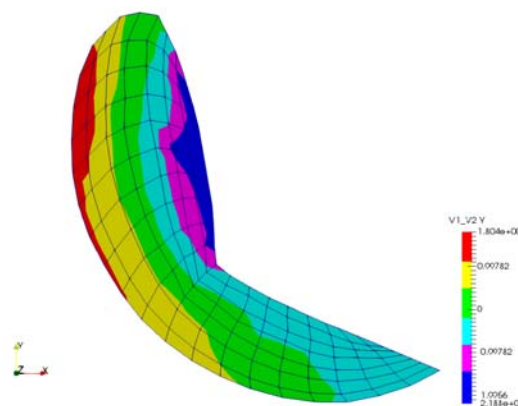


Рисунок 4.25 - Складова швидкості V_y

Вектори швидкості зображено на рисунку 4.24. З отриманих даних видно, що максимальна складова швидкості по осі 0–X становить $V_x=1.1$ м/сек і знаходиться на відкритій поверхні сегменту матеріалу в каскадному режимі (рисунок 4.24). Максимальна складова по 0–У становить $V_y=1.8$ м/сек та знаходиться в зоні контакту матеріалу з поверхнею барабану. По контурах СЕ сітки побудовані залежності швидкості (рисунок 4.26-4.29).

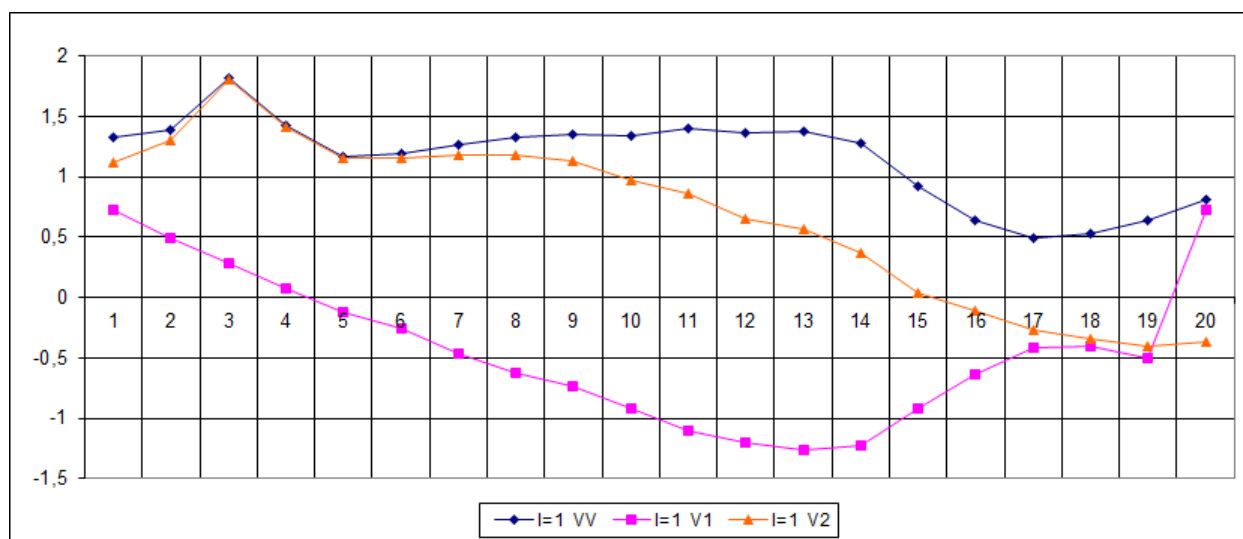


Рисунок 4.26 – Швидкість частинок по 1 контуру

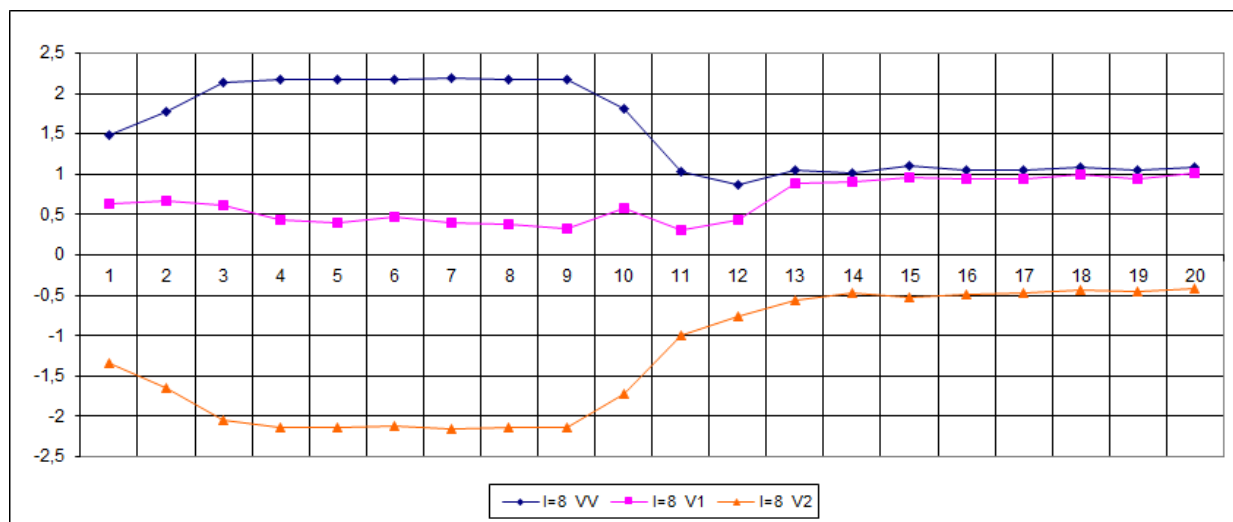


Рисунок 4.27 – Швидкість частинок по 2 контуру

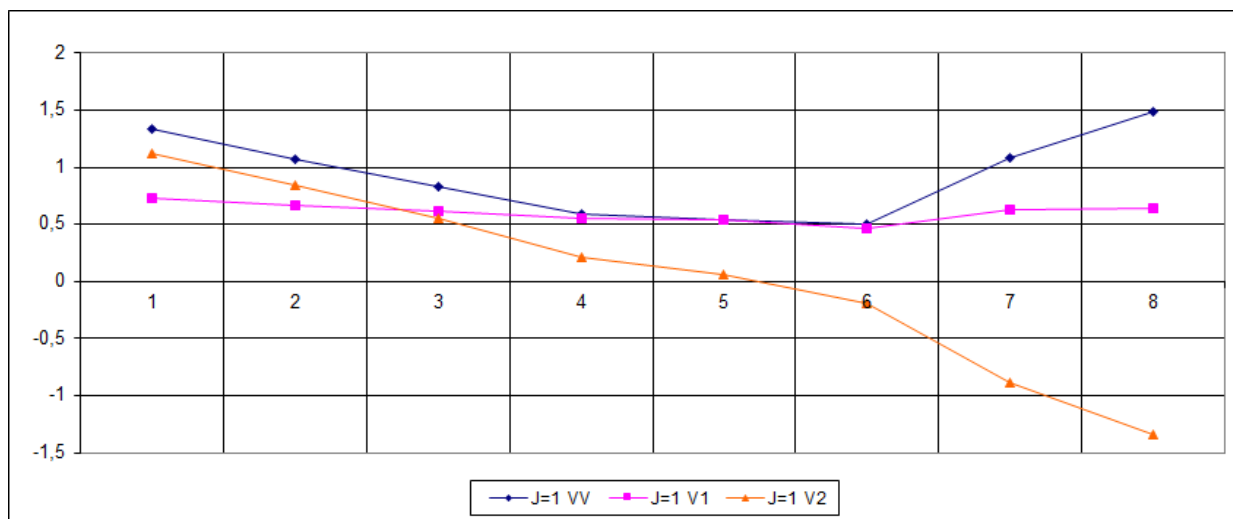


Рисунок 4.28 – Швидкість частинок по 3 контуру

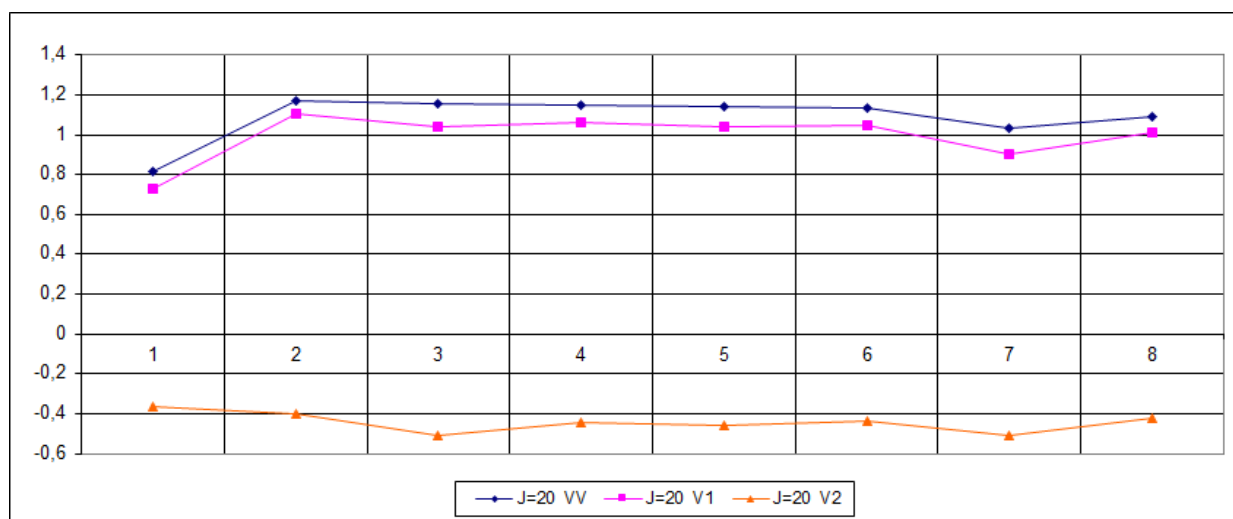
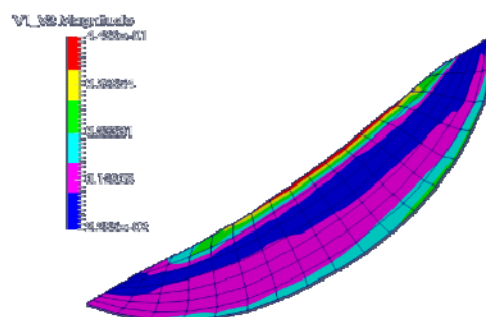


Рисунок 4.29 – Швидкість частинок по 4 контуру



а)



б)

Рисунок 4.30: а) Експериментальна установка при завантаженості в $S=17\%$ та швидкості обертання барабану $W=120$ об/хв; б) загальна швидкість матеріалу

На рисунках 4.30 – 4.33 зображено дослідження сипкого матеріалу при завантаженості матеріалу в 17% та швидкості обертання барабану 120 об/хв.

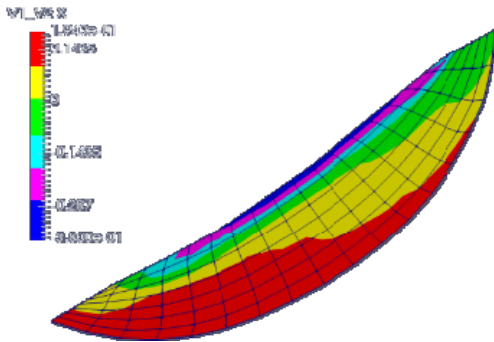


Рисунок 4.31 – Складова швидкості V_x

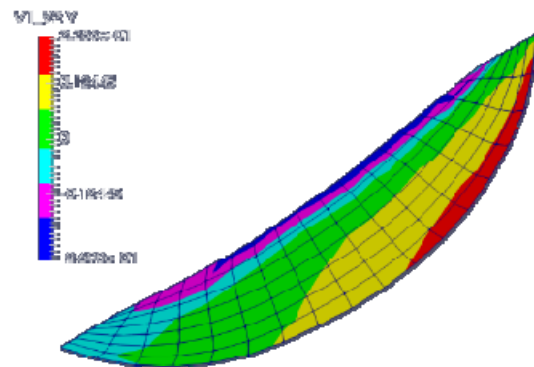


Рисунок 4.32 – Складова швидкості V_y

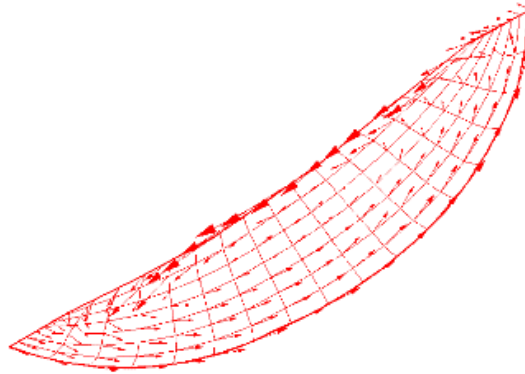


Рисунок 4.33 – Векторне поле

В результаті досліджень руху сипкого матеріалу в барабанних апаратах можна зробити наступні висновки:

- при частоті обертання 85 об/хв в барабані установлюється водоспадний режим;
- максимальна загальна швидкість становить $V=2.2$ м/сек;
- в шарі матеріалу що рухається в напрямку обертання барабану частинки рухаються по концентричних траєкторіях, їх швидкість залежить від частоти обертання барабана та внутрішнього тертя між частинками.

4.3 Дослідження руху частинок пірамідальної форми

Для дослідження руху матеріалу пірамідальної форми використовувались зерна гречки. Дослідження проводилось на лабораторній установці, яка показана на рисунку 4.22. Маса завантажувального матеріалу становить 4 кг, та займає площу 17.8% перетину барабану. Розміри частинок 4,2-6,2 мм. Кількість обертів барабану складає 12.6 об/хв. Об'ємна вага – 800 кг/м³. Значення коефіцієнта внутрішнього тертя 2,4 – 3,4 [30].

Лабораторна установка з наповнений матеріалом зображена на рисунку 4.22. Траєкторія руху частинок визначалась за маркерами, і представлена на рисунку 4.23 у вигляді відповідних ліній току.



Рисунок 4.22 – Лабораторна установка

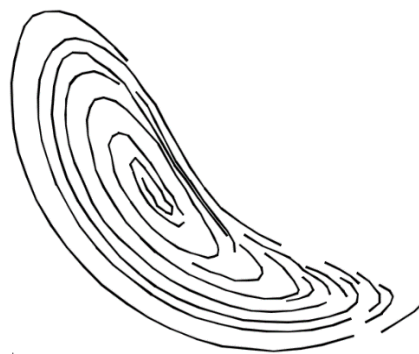


Рисунок 4.23 – Траєкторія руху частинок

За визначеними напрямками та довжиною переміщення частинок, з урахуванням часу визначена швидкість руху частинок. Вектори швидкості зображено на рисунку 4.24. На рисунку 4.25 приведена швидкість частинок для шару, що знаходиться найближче до периферії барабану, на рисунку 4.25 — для середнього шару, на рисунку 4.27 — для шару, що знаходиться найближче до центру барабану.

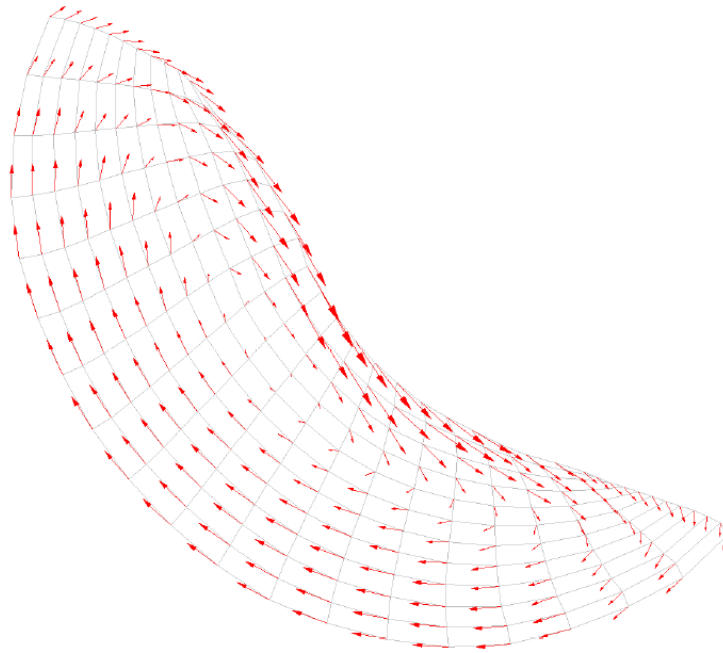


Рисунок 4.24 – Вектори швидкості

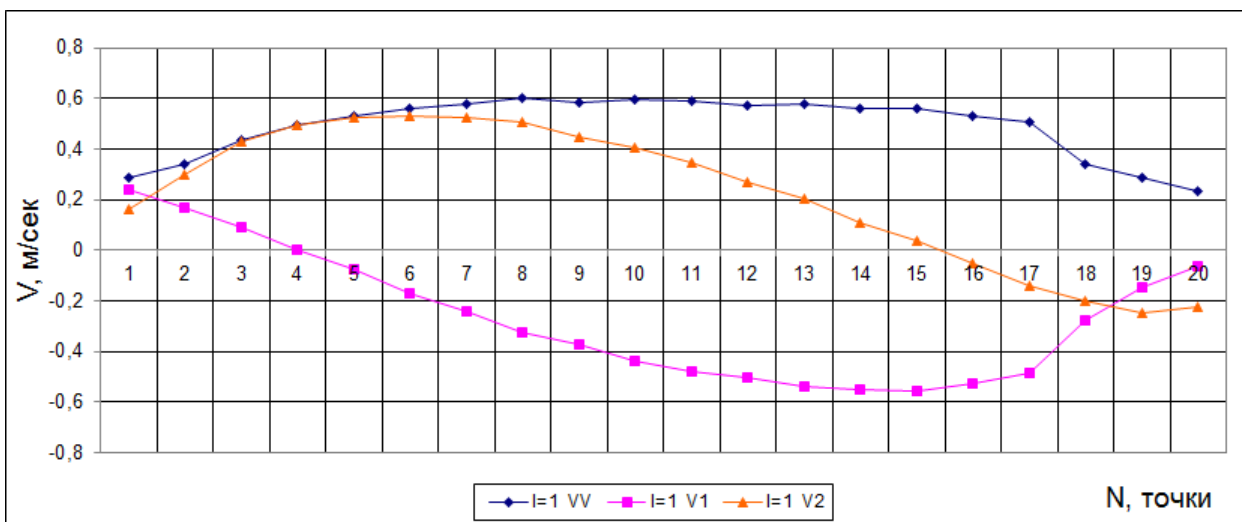


Рисунок 4.25 — Швидкість частинок для шару, що знаходиться найближче до периферії барабану

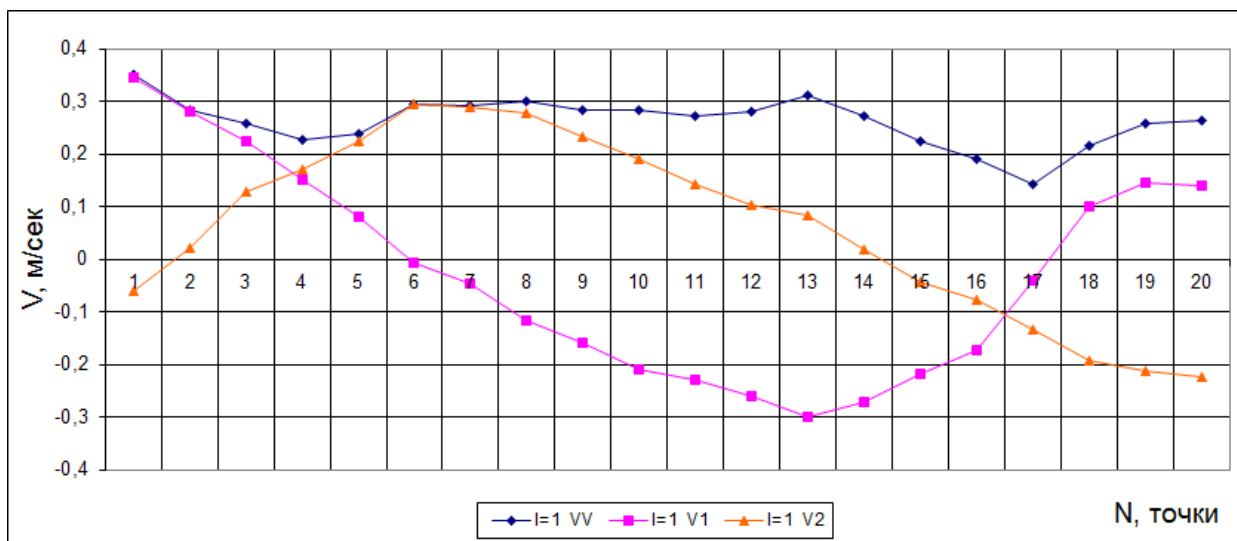


Рисунок 4.26 — Швидкість частинок для середнього шару

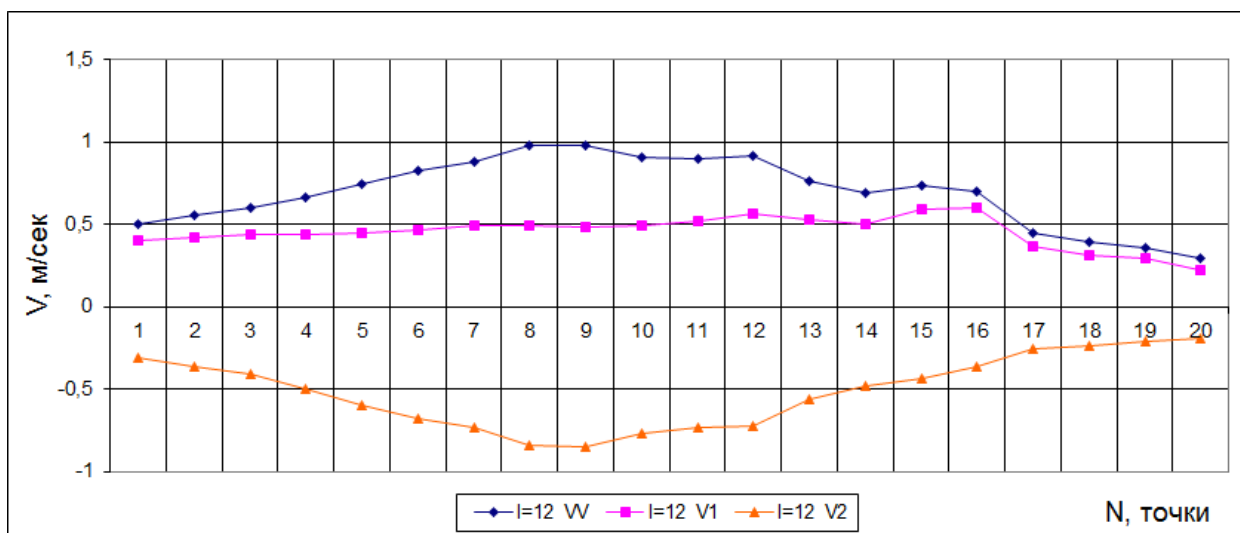


Рисунок 4.27 — Швидкість частинок для шару, який знаходиться найближче до центру барабана

З рисунків видно зміну швидкості в різних шарах матеріалу. 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, і становить $V=0.27$ м/сек.

Максимальна швидкість частинок біля периферії барабану становить $V=0.6$ м/сек.

Використовувалась сіткова область розмірністю 27×15 скінчених елементів. Після інтерполяції складових швидкості до відповідних вузлів сітки отримаємо результати, які приведені на рисунках 4.28 - 4.30. Візуалізація виконана за допомогою програми ParaView.

Як видно з приведених рисунків, на сітковій моделі адекватно відображається рух матеріалу.

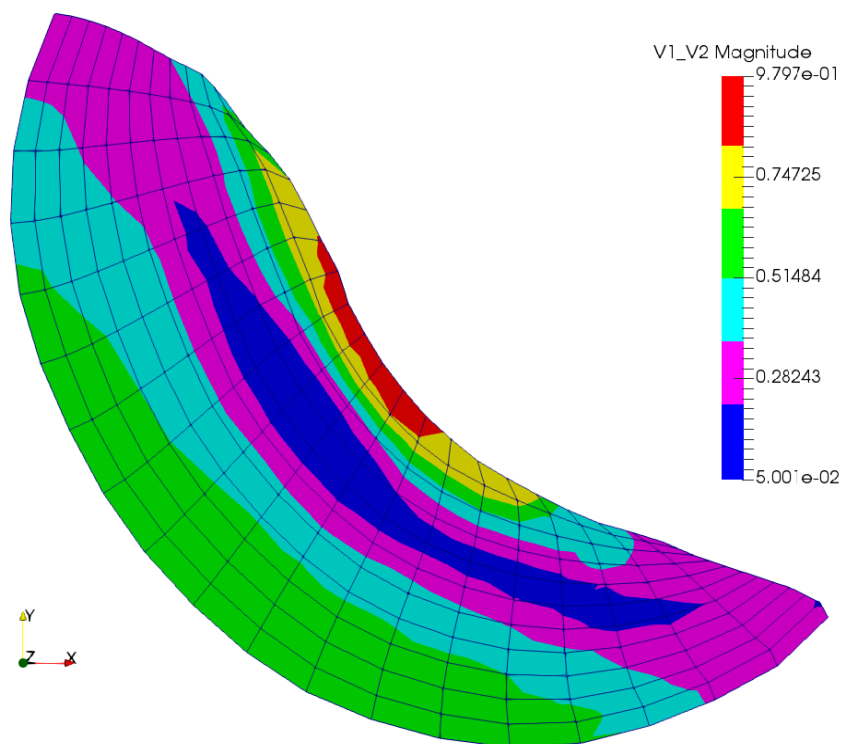


Рисунок 4.28 – Загальна швидкість

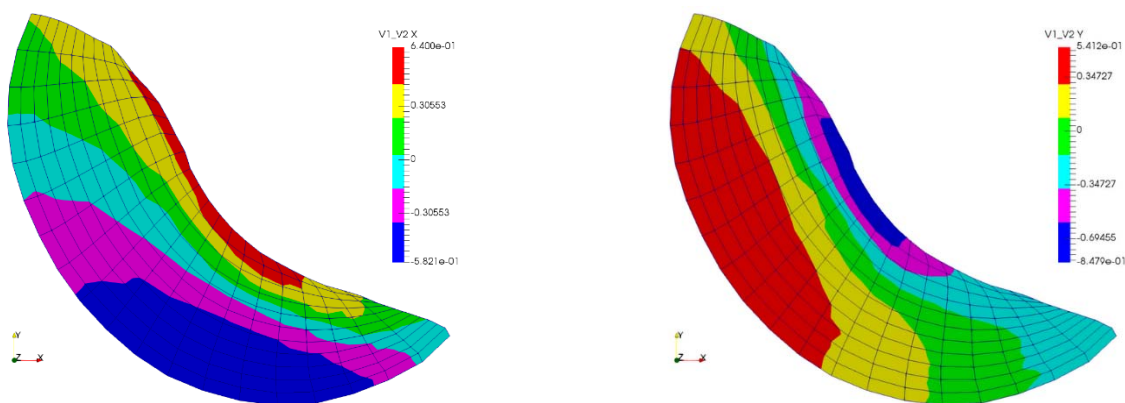


Рисунок 4.29 – Складові швидкості V_x Рисунок 4.30 – Складові швидкості V_y

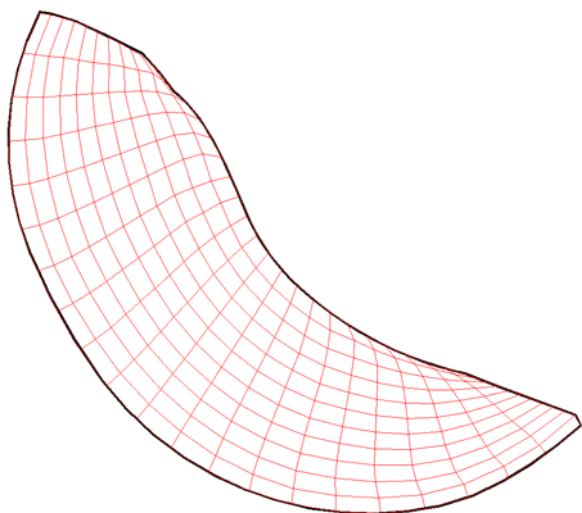


Рисунок 4.31 – SE сітка

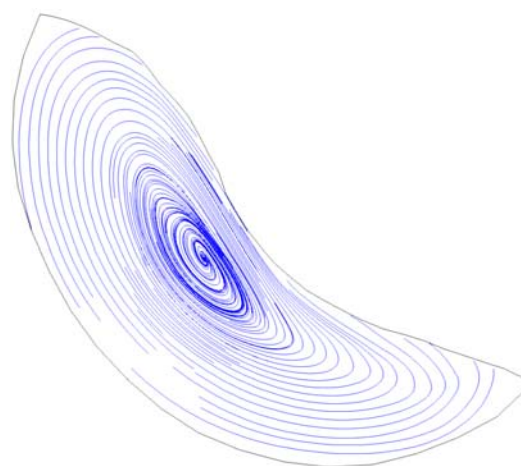


Рисунок 4.32 – Функція току

Аналіз процесу руху сипучого матеріалу в поперечному перерізі гладкого обертового барабана дозволяє зробити наступні висновки:

- в матеріалі утворюється циркуляційне ядро, навколо якого сипучий матеріал рухається по замкнутому контуру;

- при числі обертів 12.6 об/хв та заповненні 17.8% перетину барабану, максимальна швидкість частинок на відкритій поверхні викривленого сегмента становить $V=0.97$ м/сек;

- в шарі, що рухається в напрямку обертання барабану, частинки рухаються по концентричних траєкторіях з швидкостями, які залежні від кутової швидкості обертання барабана та внутрішнього тертя між частинками.

5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РУХУ ДИСПЕРСІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

Для розрахунку траєкторії руху сипких матеріалів в обертовому барабані розроблена математична модель. Вона включає всі основні характеристики, що мають істотний вплив на сам процес руху матеріалу в апаратах барабанного типу, а саме: граничні умови, фізичні властивості середовищ, геометричні характеристики, турбулентність. Використання математичної моделі дозволяє досить точно описати процес руху сипких матеріалів в обертовому барабані.

5.1 Рівняння руху

Чисельне дослідження руху рідини можна проводити на підставі диференціального рівняння Нав'є - Стокса. Це рівняння слідує з рівняння переносу імпульса, якщо в нього підставити вираження для тензора в'язких напруг з урахуванням об'ємної в'язкості

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu[\nabla\vec{v}] + (\nabla v_c) \right\} + \nabla \left[\left(\chi - \frac{2}{3}\mu \right) (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho\vec{F} \right], \quad (5.1)$$

де ρ - густина, p - тиск; μ - динамічна в'язкість, χ - об'ємна в'язкість; \vec{F} - вектор масових сил, діючих на одиницю маси речовини; \vec{v} - лінійна швидкість руху середовища.

У випадку нестискуваної рідини ($\rho = \text{const}$), $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ рівняння запишеться в вигляді:

$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}\vec{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \left\{ \nu[\nabla\vec{v} + (\nabla v_c)] \right\} + \vec{F} \quad (5.2)$$

де $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ - кінематична в'язкість.

Рівняння Нав'є – Стокса, з урахуванням співвідношення $\nabla \cdot [(\nabla \vec{v}_c)] = \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) = 0$, при $\mu = \text{const}$, то прийме вигляд:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} + F \quad (5.3)$$

Рівняння (5.3), що використовується в механіці рідини і газу є класичною формою рівняння Нав'є - Стокса.

Для рішення задачі про рух оброблюваного в перетині апарату матеріалу розглядаються двомірні стаціонарні рівняння.

Відомо, що чисельні дослідження двомірних стаціонарних рівнянь руху рідини можна робити в динамічних змінних (компоненти швидкості), або в змінних Гельмгольца (завихореність, функція току). При цьому рівняння дифузії і енергії в першому і в другому випадках залишаються без змін.

Для рішення задачі скористуємось системою рівнянь руху рідини Гельмгольца. В цих змінних міститься на одне рівняння менш, ніж в динамічних - явно не міститься тиск P , що може бути визначений з рівняння Нав'є - Стокса. Система рівнянь в змінних Гельмгольца зручна для проведення розрахунку, коли в краєвих умовах не міститься тиску. Інша перевага полягає в однотипності всіх рівнянь, що особливо важливо при реалізації рішення на ЕОМ.

Побудуємо математичну модель двомірної стаціонарної течії в'язкої рідини в неортогональній криволінійній системі координат x^1, x^2, x^3 . Зважаючи, що компоненти вектору швидкості u_1, u_2, u_3 і густина ρ залежать тільки від координат x^1, x^2 . Стаціонарне рівняння Нав'є - Стокса при постійній динамічній в'язкості μ для рідини, що стискається, має вигляд:

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + (\mu/3 + \chi) \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \vec{F}; \quad (5.4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.5)$$

Щоб перейти до перемінних Гельмгольца, застосуємо векторні тотожності.

$$(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla(\vec{v}^2 / 2) - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v});$$

$$\nabla^2 \vec{v} = \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) - \nabla \times \nabla \times \vec{v}.$$

Тоді рівняння (5.4) запишеться наступним чином:

$$\rho \nabla(\vec{v}^2 / 2) - \rho \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v}) = -\nabla p - \mu \nabla \times \nabla \times \vec{v} + (4\mu/3 + \chi) \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \vec{F} \quad (5.6)$$

Застосуємо оператор ротор до обох частин рівності (5.6). Враховуючи, що $\nabla \times (\nabla f) = 0$ для довільної функції, отримаємо:

$$\nabla \times (\rho \nabla K) - \nabla \times (\rho \vec{v} \times \vec{\omega}) = -\mu \nabla \times \nabla \times \vec{\omega} + \nabla \times (\rho \vec{F}) \quad (5.7)$$

де $K = \vec{v}^2 / 2$ питома інтенсивна енергія; $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}$ вектор завихореності.

Використовуючи тотожність

$$\nabla \times (\rho \nabla K) = \rho \nabla \times (\nabla K) + (\nabla \rho) \times (\nabla K) = (\nabla \rho) \times (\nabla K)$$

перетворимо рівняння (5.7) до вигляду:

$$-\nabla \times (\rho \vec{v} \times \vec{\omega}) + (\Delta p) \times (\nabla K) = \mu \nabla \times \nabla \times \vec{\omega} + \nabla \times (\rho \vec{F}) \quad (5.8)$$

В двомірному випадку немає необхідності робити подальші перетворення, бо в вхідній системі рівнянь основними змінними є функція току ψ і ω_3 -проекція вектору завихореності на вісь.

Рівняння для завихореності ω_3 одержуємо, множачи скалярно вираз (5.8) на вектор $\vec{\ell}_3$ [30].

Отримаємо

$$\nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \mu \nabla \cdot \left[\frac{1}{H_3^2} \nabla (H_3 \omega_3) \right] + \frac{1}{H_3} \vec{\ell}_3 \cdot \left[\nabla \left(\frac{\rho v_3^2}{H_3} \right) \times \nabla H_3 + \nabla K \times \nabla \rho + \nabla \times (\rho \vec{F}) \right] \quad (5.9)$$

Рівняння для функції току визначаємо з рівняння нерозривності (5.5). З нього витікає, що вектор $\rho \vec{v}$ є соленоїдальним, тобто існує векторний потенціал, при використанні якого рівняння нерозривності задовольняється тотожно.

У випадку двомірної стаціонарної задачі завжди можна ввести функцію току, що задовольнить рівнянням нерозривності. Множачи скалярно рівняння завихореності на вектор $\vec{\ell}_3$, будемо мати:

$$\vec{\omega} \cdot \vec{\ell}_3 = \vec{\ell}_3 \cdot (\nabla \times \vec{v}).$$

Представивши в координатній формі матимемо:

$$\frac{g_{33}}{\sqrt{g}} \left(\frac{\partial v_1}{\partial x^2} - \frac{\partial v_2}{\partial x^1} \right) + \omega_3 = 0.$$

Якщо ввести функцію току шляхом співвідношення

$$v^1 = \frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^2}; \quad v^2 = -\frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^1} \quad (5.10)$$

то отримаємо рівняння для визначення функції току. В векторній формі це рівняння запишеться так

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho \sqrt{g}} \nabla \psi \right) + \omega_3 = 0 \quad (5.11)$$

При математичному моделюванні руху рідини в специфічних апаратах промисловості будматеріалів (циклони, сепаратори, класифікатори та ін.) часто виникають двомірні задачі, в яких ці функції залежать тільки від координат X_1 і X_2 , а вектор швидкості \vec{v} має два відмінні від нуля компоненти v_1, v_2 . Тому має сенс дослідження вісесиметричного потоку. Рівняння v_3 отримаємо, множачи скалярно вираз (5.6) на вектор \vec{l}_3 з урахуванням незалежності розподілу скалярних параметрів від X_3

$$-\vec{l}_3 \cdot [\rho \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v})] = -\frac{1}{H_3} \frac{\partial p}{\partial x_3} - \mu \vec{l}_3 \cdot (\nabla \times \nabla \times \vec{v}) + p \vec{F}_3 \quad (5.12)$$

В рівнянні (5.12) збережений член $\partial p / \partial x_3$, тобто є процеси, в математичних моделях яких тиск залежить лінійно від X_3 , а $\partial p / \partial x_3$ - відома функція.

Виходячи з [31] маємо:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} H_3 v_3) = \mu \nabla \cdot \left[H_3^2 \nabla \left(\frac{v_3}{H_3} \right) \right] + 2\mu H_3 v_3 \nabla^2 (l_n H_3) - \frac{\partial p}{\partial x_3} + H_3 \rho F_3. \quad (5.13)$$

В рівнянні (5.13) друга складова перетворюється в нуль, якщо $l_n H_3$ являє собою гармонійну функцію координат X_1, X_2 , що справедливо для площинних і вісесиметричних потоків.

Більш адекватні результати дають моделі турбулентного руху в'язкої рідини, основані на рівнянні Нав'є - Стокса вираженому в змінних Гельмгольца з урахуванням швидкості V_3 . Однак і тут виникає цілий ряд труднощів, зв'язаних із замиканням вихідних рівнянь, несуперечливою постановкою граничних умов, громіздкістю отриманих моделей і складністю їхньої чисельної реалізації, але успіхи досягнуті в цьому напрямку, дозволяють розглядати цей метод як найбільш перспективний.

5.2 Математична модель в змінних Гельмгольца

Рівняння завихореності в тензорній формі для криволінійної неортогональної системи координат у векторній формі має вигляд:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) &= \mu \nabla \cdot \left[\frac{1}{H_3^2} \nabla (H_3 \omega_3) \right] + \\ &\frac{1}{H_3} \vec{l}_3 \cdot \left[\nabla \left(\frac{\rho v_3^2}{H_3} \right) \times \nabla H_3 + \nabla K \times \nabla p + \nabla \times (p \vec{F}) \right]. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Побудуємо математичну модель для двомірної стаціонарної течії рідини в криволінійній неортогональній системі координат X_1, X_2, X_3 .

Здійснимо наступні перетворення:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) &= \vec{l}^m \cdot \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\rho v^n \vec{l}_n \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \delta_n^m \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\rho v^n \frac{\omega_3}{H_3} \right) + \vec{l}^m \cdot \frac{\partial \vec{l}_n}{\partial x^m} \left(\rho v^n \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\rho v^m \frac{\omega_3}{H_3} \right) + \Gamma_{mn}^m \rho v^n \frac{\omega_3}{H_3} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\rho v^m \frac{\omega_3}{H_3} \right) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial \sqrt{g}}{\partial x^m} \rho v^m \frac{\omega_3}{H_3} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\rho v^m \sqrt{g} \frac{\omega_3}{H_3} \right) \end{aligned} \quad (5.15)$$

де - \vec{l}^m, \vec{l}_n - базисний координатний вектор; \sqrt{g} - коефіцієнт обсягу; δ_n^m - символ Кронекера; Γ_{mn}^m - символ Кристофеля 2 роду.

Однак, при рішенні задачі в змінних Гельмгольца зручніше визначити $\nabla \cdot (\rho \vec{v} \omega_3 / H_3)$ через функцію току ψ . Підставивши значення компонент швидкості (5.11), отримаємо:

$$\nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \varepsilon^{3mn} \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\frac{\tilde{\omega}_3}{H_3} \right) \frac{\partial \psi}{\partial x^n}, \quad (5.16)$$

де $\tilde{\omega}_3 = \omega_3 / H_3$; ε^{3mi} - тензор Леві-Чевіти.

Перетворюючи перший член правої частини, отримаємо:

$$\mu \nabla \cdot \left[\frac{1}{H_3^2} \nabla (H_3 \omega_3) \right] = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^m} \left[\frac{\mu}{H_3^2} g^{mn} \sqrt{g} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) \right] \quad (5.17)$$

Другий член правої частини рівняння (6.14) в тензорній формі буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{H_3} \vec{l}_3 \cdot \left[\nabla \left(\frac{\rho v_3^2}{H_3} \right) \times \nabla H_3 + \nabla K \times \nabla \rho + \nabla \times (\rho \vec{F}) \right] = \\ & = \varepsilon^{3\alpha\beta} \left(\frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left(\frac{\rho \tilde{v}_3^2}{H_3} \right) \frac{\partial H_3}{\partial x^\beta} + \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left(\frac{\tilde{v}_3^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta} + \frac{\partial \rho F_\beta}{\partial x^\alpha} \right); \quad \alpha = 1, 2 \end{aligned} \quad (5.18)$$

Таким чином рівняння (6.14) можна представити в тензорній формі:

$$\begin{aligned} & \varepsilon^{3mn} \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\frac{\tilde{\omega}_3}{H_3} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x^n} = \\ & = \varepsilon^{3mn} \left(\frac{\partial}{\partial x^m} \left(\frac{\rho \tilde{v}_3^2}{H_3} \right) \frac{\partial H_3}{\partial x^n} + \frac{\partial H_3}{\partial x^m} \left(\frac{\tilde{v}_3^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x^n} + \frac{\partial \rho F_n}{\partial x^m} \right) \end{aligned} \quad (5.19)$$

Перетворюючи рівняння функції току (5.11) до тензорної форми запису і виходячи з тих же позицій як під час виводу формули (5.14), можемо записати:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{g} \rho} \nabla \psi \right) + \omega_3 = \frac{g_{33}}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^m} \left(\frac{g^{mn} \sqrt{g}}{g_{33} \rho} \frac{\partial \psi}{\partial x^n} \right) + \omega_3 = 0,$$

або

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^n} \left(\frac{g^{mn} \sqrt{g}}{\rho H_3^2} \frac{\partial \psi}{\partial x^n} \right) + \frac{\tilde{\omega}_3}{H_3} = 0 \quad (5.20)$$

де $\tilde{\omega}_3 = \omega_3 / H_3$; H_i - коефіцієнти Ляме при $i = 1, 2, 3$.

Залежність між функцією току і швидкістю визначається з виразу:

$$v^1 = \frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^2}; \quad v^2 = -\frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^1}. \quad (5.21)$$

5.3 Використання різничних схем

При побудові різничної схеми поставимо в відповідність безперервно визначеній (континуальній) функції дискретну функцію, визначену в вузлах різничної сітки. При цьому i змінюється від 1 до N_x , j від 1 до N_y .

При рішенні задач засобом кінцевих різниць застосуємо наступні сіткові апроксимації для похідних:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} = \frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta \xi^2} + O(\Delta \xi^2) \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \xi \partial \eta} = \frac{f_{i+1,j+1} - f_{i-1,j+1} + f_{i-1,j-1} - f_{i+1,j-1}}{4\Delta \xi \Delta \eta} + O(\Delta \xi^2, \Delta \eta^2) \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i,j}}{\Delta \xi} + O(\Delta \xi) \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} = \frac{f_{i,j} - f_{i-1,j}}{\Delta \xi} + O(\Delta \xi) \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} = \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2\Delta \xi} + O(\Delta \xi^2) \quad (5.26)$$

Як бачимо, при апроксимації $\partial f / \partial \xi$ формулою (5.26) порядок точності рішення вище, однак для того, щоб зробити систему стійкою ряд авторів [32, 33] рекомендує використовувати для визначення конвективних членів різниць назад (5.25) в тих випадках, коли швидкість хвилі позитивна, і різниці вперед (5.24) якщо швидкість хвилі негативна. Це дасть можливість зробити систему тривкою незалежно від величини кроку сітки.

Для виконання таких схем конвективні члени апроксимуються різницями, орієнтованими проти течії

$$\begin{aligned}
(U\Phi)_{i-1/2,j} &= \begin{cases} U_{i-1/2,j} \Phi_{i-1,j}, & U_{i-1/2,j} > 0; \\ U_{i-1/2,j} \Phi_{i,j}, & U_{i-1/2,j} < 0; \end{cases} \\
(V\Phi)_{i-1/2,j} &= \begin{cases} V_{i,j-1/2} \Phi_{i-1,j}, & V_{i,j-1/2} > 0; \\ V_{i,j-1/2} \Phi_{i,j}, & V_{i,j-1/2} < 0; \end{cases}
\end{aligned} \tag{5.27}$$

Якщо величини U та V можливо представити в вигляді сум

$$U = U^+ + U^-;$$

$$V = V^+ + V^-;$$

де

$$U^+ = 0.5(U + |U|); \quad U^- = 0.5(U - |U|);$$

$$V^+ = 0.5(V + |V|); \quad V^- = 0.5(V - |V|);$$

то вираз (5.27) можливо записати в вигляді:

$$\begin{aligned}
(U\Phi)_{i-1/2,j} &= U^+_{i-1/2,j} \Phi_{i-1,j} + U^-_{i-1/2,j} \Phi_{i,j} \\
(U\Phi)_{i+1/2,j} &= U^+_{i+1/2,j} \Phi_{i,j} + U^-_{i+1/2,j} \Phi_{i+1,j} \\
(V\Phi)_{i,j-1/2} &= V^+_{i,j-1/2} \Phi_{i-1,j} + V^-_{i,j-1/2} \Phi_{i,j} \\
(V\Phi)_{i,j+1/2} &= V^+_{i,j+1/2} \Phi_{i,j} + V^-_{i,j+1/2} \Phi_{i+1,j}
\end{aligned} \tag{5.28}$$

Крім цього відомо [32, 33], що для того, щоб отримати достатньо точне рішення при великих значеннях критерію Рейнольдса необхідно використовувати нерівномірну сітку з дрібним кроком, особливо в областях великих градієнтів швидкості потоку. При моделюванні явища турбулентності масштаби цього руху настільки малі, що необхідна кількість вузлів розрахункової сітки і малий розмір кроків по часу роблять обчислення практичні неможливими на сучасних ЕОМ [34-38]. Тому для рішення таких задач використовуються спеціальні методи, наприклад введення поняття коефіцієнта збурення χ , яким корегуються значення дифузійних членів рівняння.

Для визначення коефіцієнта збурення в [35] рекомендується використати близьку залежність

$$\chi = \left(1 + \frac{Rs}{2} + \frac{Rs^2}{6} + \frac{Rs^3}{15} \right) \tag{5.29}$$

Враховуючи, що при моделюванні руху сипких матеріалів важливе значення має відстань частинки від вільної поверхні Г. М. Островский [39, 40], для визначення тертя ковзання шару дисперсійного середовища рекомендує залежністю:

$$\tau = \sigma f_p + \mu \frac{v}{h_e} \quad (5.33)$$

де σ – нормальний тиск шару на площину ковзання; μ – в'язкість середовища; v – швидкість ковзання шару; h_e – характерна відстань від стінки, на якій реалізується зсувний рух.

Враховуючи (5.33) обчислення варіаційного коефіцієнту χ здійснюється по залежностях:

$$\begin{aligned} (Rs_{11})_{i+1/2,j} &= |v^1 / \mu|_{i+1/2,j} \cdot (x_{i+1}^1 - x_i^1) + |v^1 / \mu|_{i,j} \cdot h_e^{\min}; \\ (Rs_{11})_{i-1/2,j} &= |v^1 / \mu|_{i-1/2,j} \cdot (x_i^1 - x_{i-1}^1) + |v^1 / \mu|_{i,j} \cdot h_e^{\min}; \\ (Rs_{21})_{i,j+1/2} &= |v^2 / \mu|_{i,j+1/2} \cdot (x_{j+1}^2 - x_j^2) + |v^2 / \mu|_{i,j} \cdot h_e^{\min}; \\ (Rs_{22})_{i,j-1/2} &= |v^2 / \mu|_{i,j-1/2} \cdot (x_j^2 - x_{j-1}^2) + |v^2 / \mu|_{i,j} \cdot h_e^{\min} \end{aligned} \quad (5.34)$$

де Rs є функцією сітчного числа Рейнольдса: h_e^{\min} – мінімальна відстань від стінки, на якій реалізується зсувний рух.

В координатній формі для площини, рівняння для визначення завихореності (5.14) запишеться наступним чином

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^1} \left(\rho \frac{\sqrt{g} v^i \tilde{\omega}_3}{H_3} \right) = \\ & = \frac{\mu}{\sqrt{g}} \left[\frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial x^1} \cdot \frac{\partial}{\partial x^1} \frac{g^{11} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{11} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{(\partial x^1)^2} + \right. \\ & \quad + \frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial x^1} \cdot \frac{\partial}{\partial x^2} \frac{g^{12} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{12} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial x^1 \partial x^2} + \\ & \quad + \frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x^1} \frac{g^{21} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{21} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial x^2 \partial x^1} + \\ & \quad \left. + \frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x^2} \frac{g^{22} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{22} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{(\partial x^2)^2} \right] + \end{aligned} \quad (5.30)$$

$$v^1 = \frac{\partial \psi}{\partial x^2}; \quad v^2 = \frac{\partial \psi}{\partial x^1}; \quad W = \frac{\omega_3}{g_{33}};$$

$$a_{11} = \frac{g^{11} \sqrt{g}}{g^{33}} = \frac{g_{22}}{\sqrt{g}}; \quad a_{12} = -\frac{g_{12}}{\sqrt{g}}; \quad a_{22} = \frac{g_{11}}{\sqrt{g}}$$

$$\alpha = \frac{\rho(v_3)^2}{g_{33}}; \quad \beta = \frac{1}{2}[(v_1)^2 g_{11} + (v_2)^2 g_{22} + 2V_1 V_2 g_{12}]$$

$$\gamma_1 = \rho F_1; \quad \gamma_2 = \rho F_2; \quad \xi = 0.5(x_{i+1}^1 + x_{i-1}^1); \quad \xi_{i+1} = (x_{i+1}^1 - x_i^1);$$

$$\xi_i = (x_i^1 - x_{i-1}^1); \quad \eta = 0.5(x_{j+1}^2 - x_{j-1}^2); \quad \eta_{i+1} = (x_{j+1}^2 - x_j^2);$$

$$\eta_i = (x_i^2 - x_{j-1}^2);$$

Рівняння для функції току (5.23) можемо апроксимувати кінцево-різницевиими аналогами які використовуються для рішення явної схеми:

$$\begin{aligned} & \left[(a_{11})_{i+1/2,j} \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{\xi_{i+1}} - (a_{11})_{i-1/2,j} \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{\xi_i} \right] \frac{1}{\xi} + \\ & + \left[(a_{12})_{i,j+1/2} \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{\xi_{i+1}} - (a_{12})_{i,j-1/2} \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{\xi_i} \right] \frac{1}{\eta} + \\ & + \left[(a_{12})_{i+1/2,j} \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{\eta_{i+1}} - (a_{12})_{i-1/2,j} \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{\eta_i} \right] \frac{1}{\xi} + \\ & + \left[(a_{22})_{i,j+1/2} \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{\eta_{i+1}} - (a_{22})_{i,j-1/2} \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{\eta_i} \right] \frac{1}{\eta} + \\ & \frac{\omega_{i,j}}{H_3} = 0 \end{aligned} \tag{5.32}$$

Тут

$$a_{11} = \frac{g^{11} \sqrt{g}}{g^{33}} = \frac{g_{22}}{\sqrt{g}}; \quad a_{12} = -\frac{g_{12}}{\sqrt{g}}; \quad a_{22} = \frac{g_{11}}{\sqrt{g}}$$

$$\xi = 0.5(x_{i+1}^1 + x_{i-1}^1); \quad \xi_{i+1} = (x_{i+1}^1 - x_i^1);$$

$$\xi_i = (x_i^1 - x_{i-1}^1); \quad \eta = 0.5(x_{j+1}^2 - x_{j-1}^2); \quad \eta_{i+1} = (x_{j+1}^2 - x_j^2);$$

$$\eta_i = (x_i^2 - x_{j-1}^2);$$

$$\eta_i = (x_i^2 - x_{j-1}^2);$$

При розрахунку тестових та прикладних задач розрахунок рівняння здійснювався ітераційним методом з використанням явної схеми розрахунків [41].

Алгоритм для рішення задач складається з наступних кроків:

1. Задаються компоненти швидкостей на границях потоку.
2. Задаються умови перешкод для потоків.
3. Розв'язується рівняння завихрення.
4. Розв'язується рівняння функції току.
5. Визначається компоненти вектора швидкості.
6. Визначається нев'язка.
7. Якщо нев'язка перевищує допустиму, то повернення до кроку 3 та розрахунок повторюється поки не зійдеться.

В рівняннях швидкостей вводиться верхній релаксаційний параметр, який дозволяє зменшити кількість ітерацій. Сходження процесу визначається за значенням квадрата максимальних нев'язок за вектором швидкості \vec{V} .

6 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПО МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ

Проведене дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах. На кафедрі ХПСМ КПІ Ім. Ігоря Сікорського створене програмне забезпечення в середовищі AutoCad за допомогою функціональної мови програмування в AutoLisp. Результати розрахунку по математичній моделі та по отриманих експериментальних даних для завантаження барабану в 5 кг, $W = 13$ об/хв, $S = 48\%$ наведені нижче.



Рисунок 6.1 – Експериментальна установка

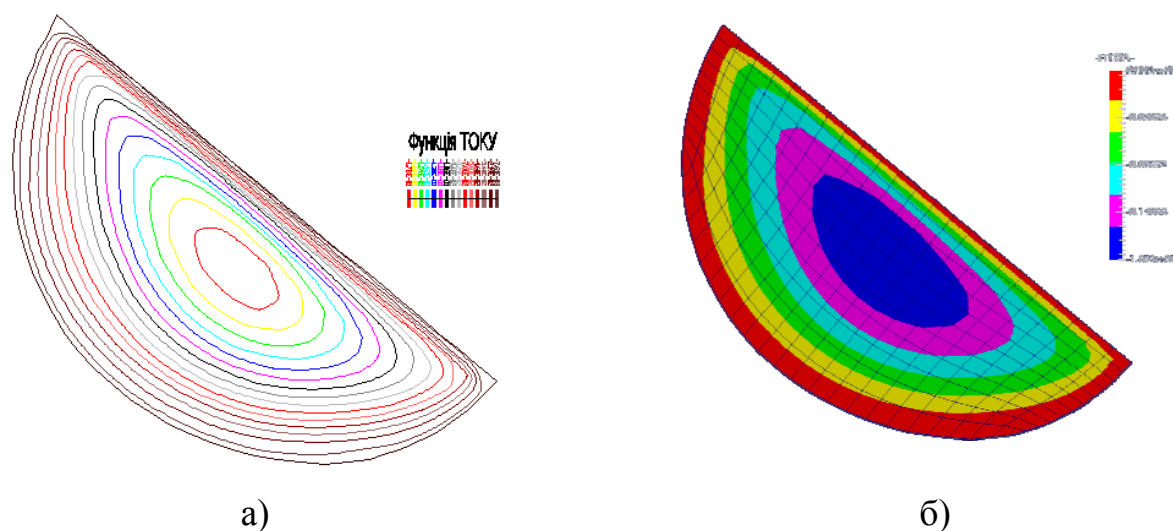


Рисунок 6.2 – Функція току:

а) функція току, отримана математичним шляхом; б) функція току, отримана експериментальним шляхом.

Проводячи порівняльний аналіз між двома функціями току встановленою математичним експериментальним шляхом мінімальне значення та максимальне значення, які описують так зване ядро сипкого матеріалу. Різниця між експериментальним та математичним значенням складає 21,282%.

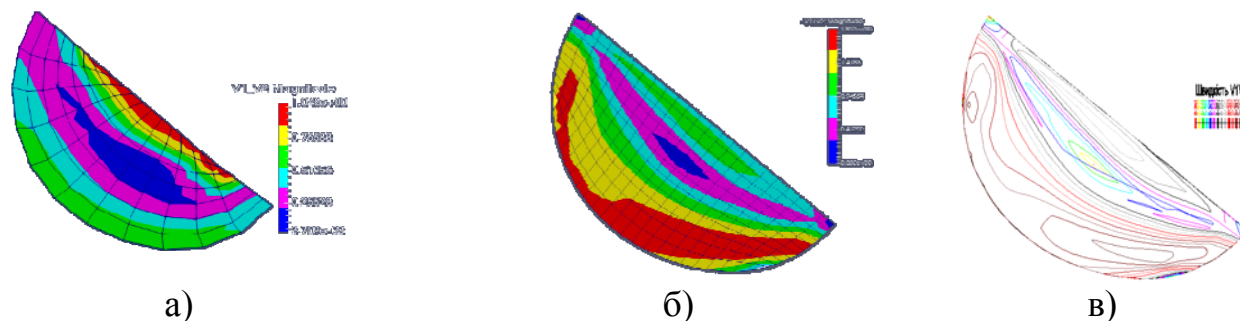


Рисунок 6.3 - Загальна швидкість V_{Σ} сипкого матеріалу:

а) дані експерименту; б) за розрахунком (в ParaView); в) за розрахунком (в ALisp).

На рисунку 6.5 зображено швидкості сипкого матеріалу по 1 та 2 напрямкам.

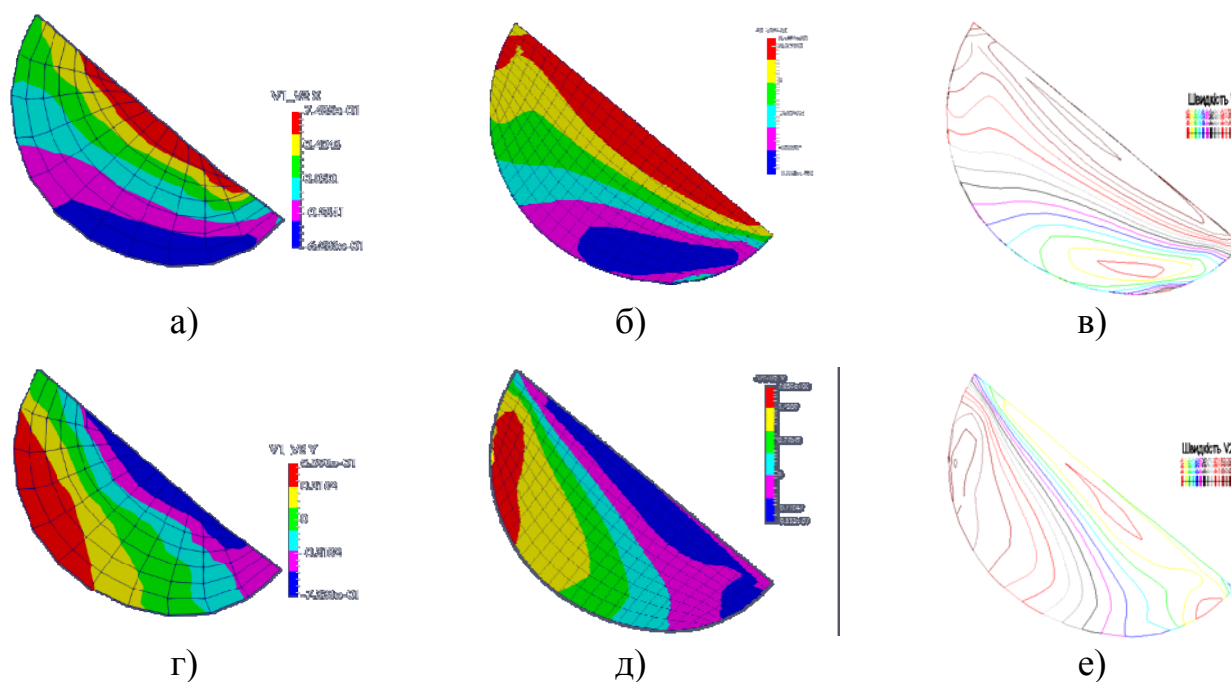


Рисунок 6.4 - Складові швидкості V_1 , V_2 :

а), г) дані експерименту для V_1 та V_2 ; б), д) за розрахунком (в ParaView);
в), е) за розрахунком (в ALisp).

На рисунку 6.5 зображено векторне поле сипкого матеріалу.

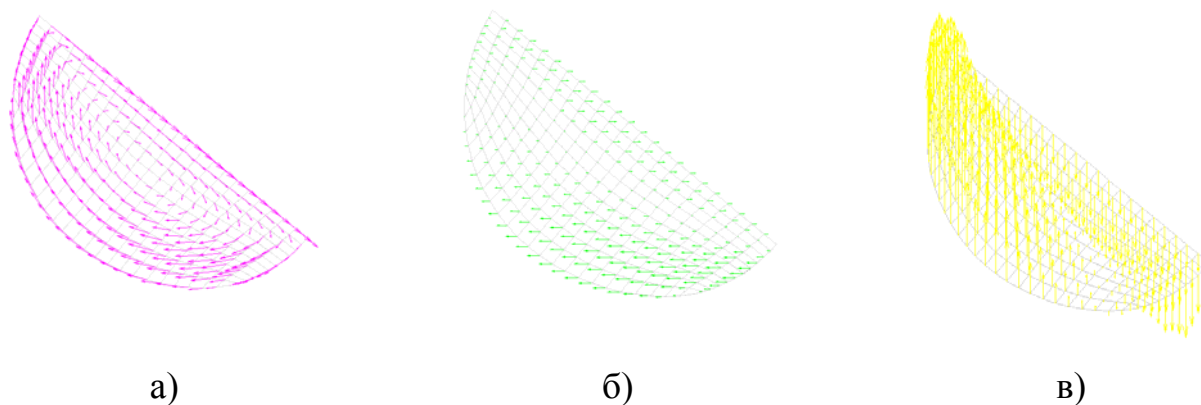


Рисунок 6.5 – Векторне поле сипкого матеріалу: а) загальна швидкість; б) швидкість по 1 напрямку; в) швидкість по 2 напрямку.

Функція завихореності зображена на рисунку 6.6.

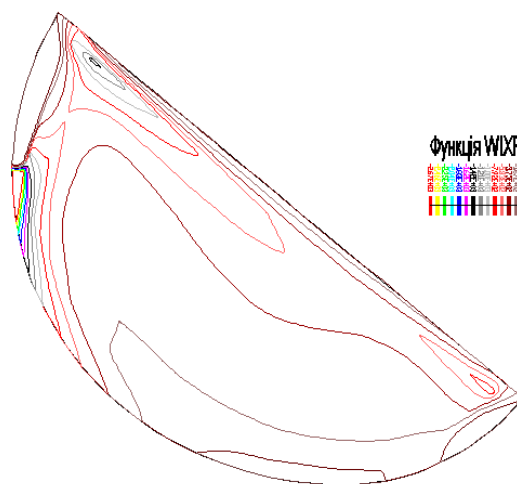


Рисунок 6.6 – Функція завихореності сипкого матеріалу

На рисунку 6.7 зображена експериментальна барабанна установка із сипким матеріалом іншої форми та ваги.



Рисунок 6.7 – Експериментальна установка при завантаженості матеріалу $S = 48\%$ та швидкістю барабану $W = 13$ об/хв

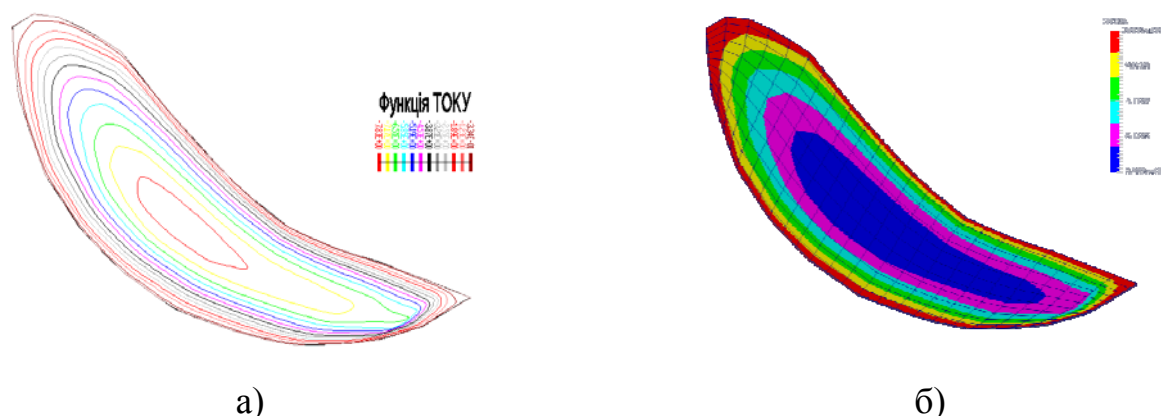


Рисунок 6.8 – Функція току:

а) функція току, отримана математичним шляхом; б) функція току, отримана експериментальним шляхом.

Проводячи порівняльний аналіз між двома функціями току: встановленою математичним (рисунок 6.9, а) і експериментальним шляхом (рисунок 6.9, б), встановлено, що мінімальне значення, становить 1.892 при проведенні експерименту та 1,8 при розрахунках по математичній моделі. Тобто, різниця між експериментальним та математичним значенням складає 4,86%.

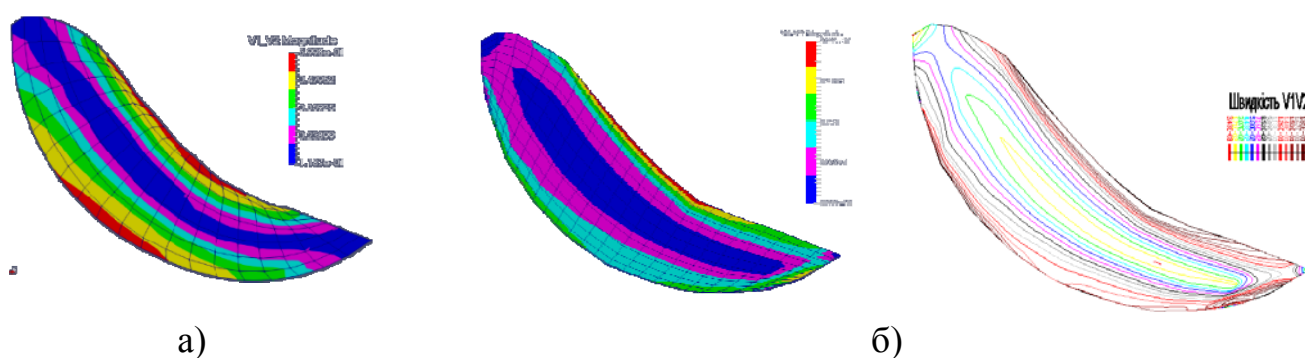


Рисунок 6.9 - Загальна швидкість сипкого матеріалу:

а) за математичною моделлю; б) за експериментом.

На рисунку 6.10 зображено швидкості сипкого матеріалу по 1 та 2 напрямкам.

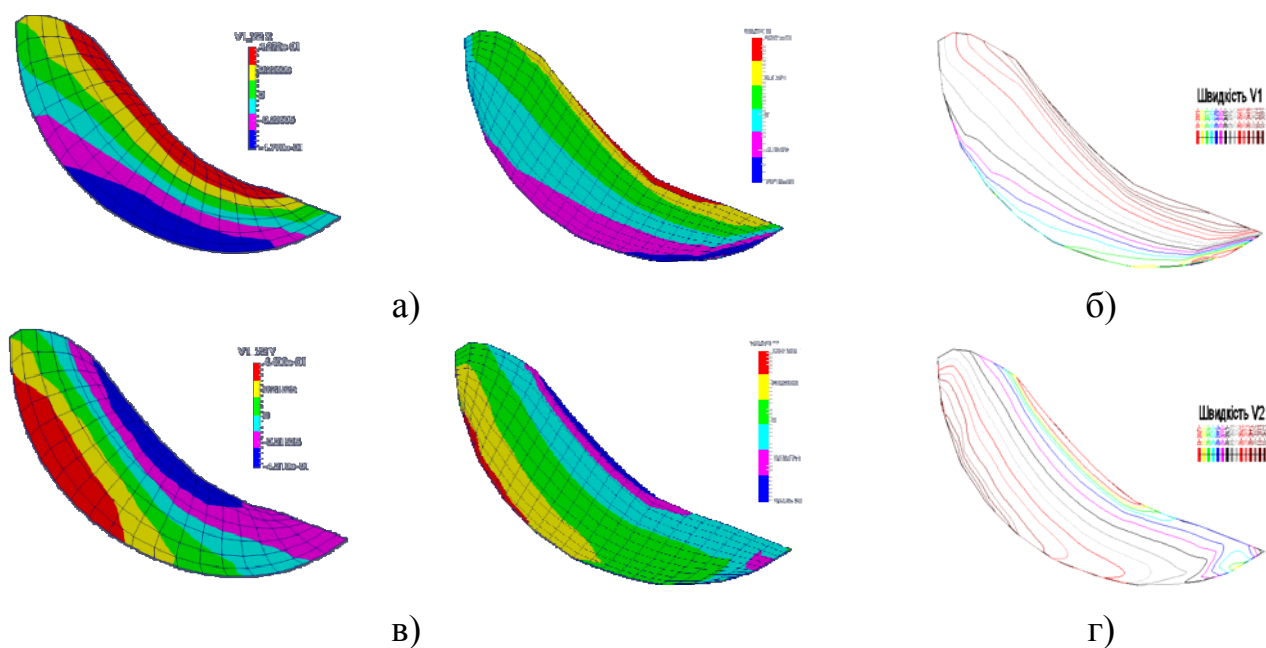


Рисунок 6.10 - Швидкість сипкого матеріалу: а) по 1 напрямку за експериментом; б) по 1 напрямку за математичною моделлю; в) по 2 напрямку за експериментом; г) по 2 напрямку за математичною моделлю.

На рисунку 6.11 зображено векторне поле сипкого матеріалу.

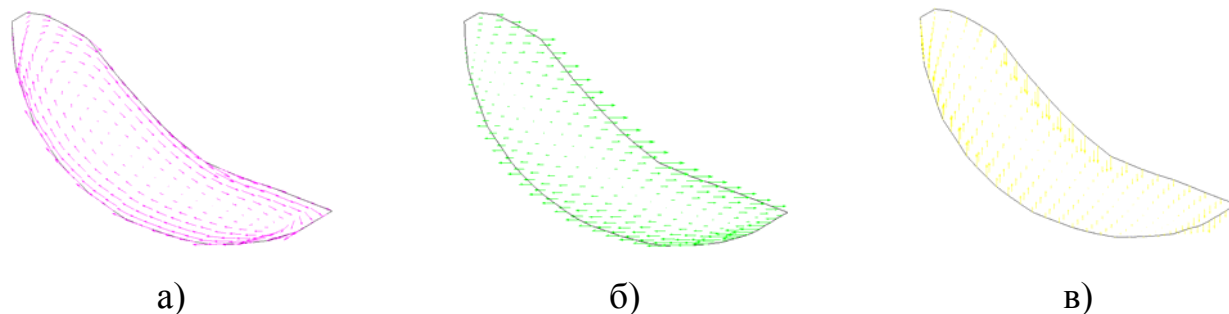


Рисунок 6.11 – Векторне поле сипкого матеріалу: а) загальна швидкість; б) швидкість по 1 напрямку; в) швидкість по 2 напрямку.

Функція завихореності зображена на рисунку 6.12.

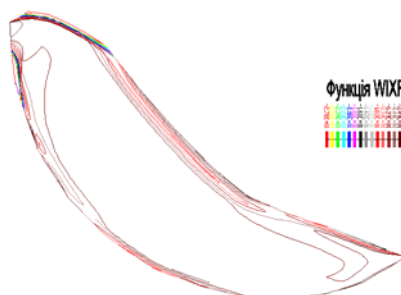


Рисунок 6.12 – Функція завихореності сипкого матеріалу

Виходячи з вищенаведених розрахунків, можна зробити висновки:

1. Проведення експерименту підтверджує та уточнює результати розрахунку математичної моделі.
2. Адекватність математичної моделі доводить використання динамічного коефіцієнту в'язкості.
3. При уточненні результатів так зване ядро сипкого матеріалу зміщувалось по 2 напрямку.

Таблиця 6.1 – Розрахунок нев'язки

№ ітерації	Дісн. нев'язка	Відн. нев'язка	Макс. нев'язка	Макс. нев'язка по 1 напрямку	Макс. нев'язка по 2 напрямку
1	4886,21	1	21,6971	2	12
50	0,412418	8,44E-05	0,110796	11	7
100	1,61E-02	3,29E-06	-2,74E-02	11	2
200	2,92E-06	5,98E-10	3,89E-04	23	5
300	4,05E-09	8,28E-13	1,16E-05	12	2
400	2,15E-12	4,41E-16	-3,39E-07	21	4
500	1,59E-15	3,26E-19	1,01E-08	21	4
600	1,50E-18	3,08E-22	-2,89E-10	21	4
700	1,30E-21	2,67E-25	8,09E-12	21	4
800	1,02E-24	2,08E-28	-2,34E-13	20	4
900	2,27E-27	4,64E-31	1,42E-14	16	2
1000	3,70E-28	7,58E-32	7,11E-15	9	5

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Під час роботи машини, а саме експериментальної установки для дослідження траєкторії руху сипкого матеріалу, необхідно розробити безпечні умови праці для персоналу згідно чинного законодавства України, а саме Закону України “Про охорону праці”. Виконання цього закону вимагає чіткого виконання санітарних норм, дотримання правил, галузевих і державних стандартів при експлуатації експериментальної установки.

Безпечна експлуатація експериментальної установки вимагає знання конструкції і принципів роботи експериментальної установки, правил пожежної безпеки, правил безпеки для підприємств і правил техніки безпеки.

Під час експлуатації експериментальної установки для дослідження траєкторії руху сипкого матеріалу, необхідно враховувати наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

- механічна небезпека;
- пожежна небезпека;
- електрична небезпека;
- промислове освітлення.

7.1 Механічна небезпека

Механічна небезпека полягає в можливих травмах при контакті з незахищеними рухливими елементами. Експериментальна установка містить обертовий барабан, що обертається з швидкістю до 100 об/хв. Щоб запобігти можливим травмам, варто вжити такі заходи безпеки:

- встановити огорожу навколо всієї конструкції експериментальної установки;
- зберігати дистанцію в 1 м з рухомими частинами експериментальної установки.

- встановлювати таблички, що сповіщають про ремонт певного вузла чи деталі при ремонтних роботах.

7.2 Пожежна безпека

Щоб не допустити небезпеки виникнення пожежі, необхідно дотримуватись наступних правил:

- не використовувати легкозаймистих речовин при експерименті;
- не допускати попадання легкозаймистих речовин поблизу експериментальної установки;
- використовувати стабілізатор напруги.

До порушень правил пожежної безпеки, а як наслідок і загорання, відносяться:

- паління на робочому місці;
- недотримання правил експлуатації і технологічних норм;
- недотримання норм і правил пожежогасіння;
- нерегулярна технічна перевірка установки;
- використання відкритого вогню;
- недотримання обслуговуючим персоналом інструкцій та незадовільне пояснення інструкцій обслуговуючому персоналу;
- відсутність наочної агітації з техніки безпеки;
- порушення пожежної безпеки на території, де проходить робота;
- відсутність пожежної сигналізації (датчик КІ-1, приймальна станція РУОП-1).

На відстані 30 м один від одного у приміщенні встановлені пожежні гідранти з рукавами по 10 м.

Застосовують порошкові вогнегасники з речовинами ОПС-10 і ОППС-100 для гасіння ввімкнених електромереж.

Застосовують вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 та пінні ОХП-10 для гасіння невеликих вогнищ запалень при вимкненому електроустаткуванні.

Кількість виходів – 3, відстані до пожежних евакових виходів – 35 м. Ширина прорізу для дверей евакових виходів – 2,5 м згідно із СНиП 2.09.02-85.

7.3 Електрична безпека

З метою недопущення електричної небезпеки та збереження здоров'я і техніки, необхідно дотримуватись наступних правил:

- не користуватись легкозаймистими матеріалами;
- обмежити використання палих речовин у приміщенні;
- користуватись лише справними розетками;
- проводити досліди у приміщенні, що відповідає II категорії вогнестійкості за СНиП 2.01.02-85;
- не перевантажувати кабелі живлення та не перевантажувати електромережу;
- зберігати робоче місце в чистоті.

Для попередження електричної небезпеки, необхідно слідувати наступним правилам:

- не палити на робочому місці;
- дотримуватись засобів і вимог щодо пожежогасіння;
- своєчасно перевіряти електричне та інше устаткування;
- дотримуватись вимог пожежної безпеки на робочому місці;
- слідувати правилам експлуатації і технологічним нормам;
- не користуватись довгий час відкритим вогнем;
- регулярно повторювати та оновлювати інструкції, доводити їх до колег;
- регулярно проводити практичні заняття з техніки безпеки;
- мати пожежну сигналізацію (приймальну станцію РУОП-1, датчик КІ-1).

В разі потреби гасіння ввімкнених електромереж, використовують порошкові вогнегасники з речовинами ОПС-10 і ОППС-100.

У приміщенні на відстані 30 м один від одного встановлені пожежні гідранти з рукавами по 10 м. Відстані до пожежних евакових виходів – 35 м, кількість виходів – 3.

Ширина прорізу для дверей евакових виходів – 2,5 м згідно із СНиП 2.09.02-85.

Дотримання всіх вищезазначених правил зменшить ризик виникнення електронебезпеки.

7.4 Промислове освітлення

Освітлення, що відповідає встановленим стандартам, грає важливу роль для безпечної роботи та експлуатації експериментальної установки. Якщо робоче місце буде погано освітлене, то виникає великий ризик отримати виробничу травму.

В приміщенні фактичне освітлення складає 100 лк. Цього недостатньо для безпечної роботи. Тому згідно СНиП II-4-79 забезпечуємо освітленість не менше 160 лк. Реалізація цього вимагає розрахунку пристрою освітлення, який забезпечить виконання нормативної величини освітлення.

Розрахунок освітлення виконуємо методом коефіцієнта використання світлового потоку.

Вихідні дані:

- кількість світильників у приміщенні $N = 2$;
- кількість ламп у світильнику $n = 1$;
- коефіцієнт запасу $k_z = 1,3$;
- коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,18$.

Коефіцієнт нерівномірності освітлення: $z = 1,1$; світловий потік для ламп типу ДРЛ 125: = 5600 лм.

Фактична перерахована освітленість визначається за формулою:

$$E = \frac{N \cdot \Phi_n \cdot \eta}{S \cdot k_z \cdot z} = \frac{2 \cdot 5600 \cdot 0,18}{6 \cdot 1,3 \cdot 1,1} = 234 \text{ лк,}$$

де S - площа приміщення, м².

Оскільки фактична перерахована освітленість на об'єкті – 234 лк, то робимо висновок про те, що штучне освітлення відповідає СНиП II-4-79.

8 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

8.1 Опис ідеї проекту

Змішування сипких матеріалів в барабанних апаратах є перспективним напрямком розвитку промисловості України. Причиною цьому є використання процесу змішування в металургійній, гірничорудній, харчовій і хімічній галузях.

Перевагами використання для змішування барабанних апаратів є зручність в експлуатації та ремонті, широка поширеність в Україні та країнах, що межують з Україною, можливість швидкої модифікації, що призводить до співпраці з більш широкою аудиторією та виконання більшого спектру задач, що пов'язані із змішуванням сипких матеріалів. Крім того, є можливість використання барабанних установок в якості подрібнення сипких матеріалів, якщо встановити перегородки з отворами певної фракції всередині барабана.

Загальне видобування залізної руди перевищило 3 млрд. т/год, збільшившись з 1999 р. більше ніж втричі [42-45]. Це означає, що ніша є перспективною та прибутковою.

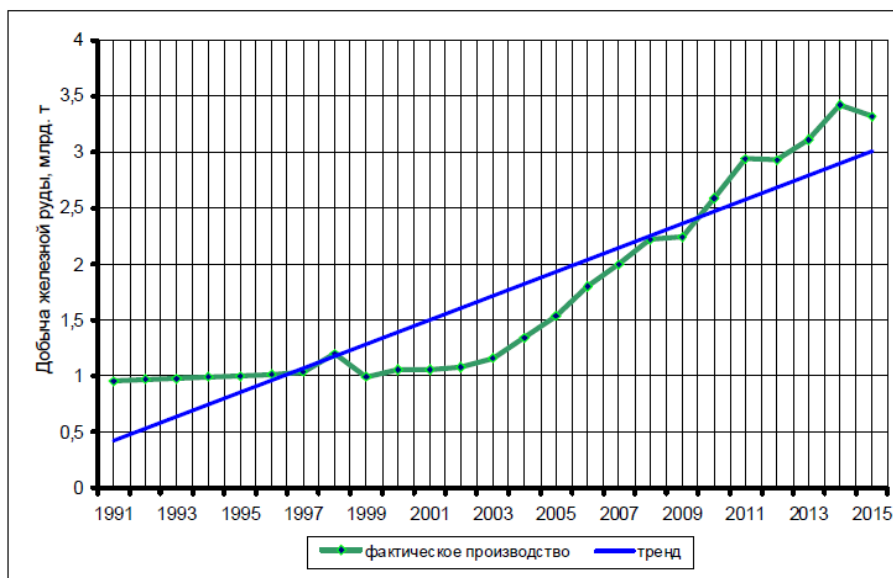


Рисунок 8.1 – Динаміка світового видобування залізної руди

Опис ідеї стартап-проекту наведено в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Нова конструкція та режим роботи барабанних апаратів для змішування сипких матеріалів	Нова конструкція і режим роботи барабанних апаратів	Зменшення енергозатрат при змішуванні сипких матеріалів
		Вища ступінь гомогенності сипких матеріалів
		Вища якість продукції
	Збільшення якості змішування сипких матеріалів	Більш конкурентноспроможний продукт
		Перехід до більших обсягів матеріалу, що підлягає змішуванню

Пропонується нова конструкція барабанних апаратів для змішування сипких матеріалів. Конструкція забезпечує зменшення енергозатрат при змішуванні сипких матеріалів, вищу ступінь гомогенності сипких матеріалів, Більш конкурентноспроможний продукт, перехід до більших обсягів матеріалу, що підлягає змішуванню.

8.2 Загальна інформація про компанію

Історія розвитку підприємства

2018 – 2020 – будівництво підприємства.

2020 – 2021 – налагодження виробництва, пошук клієнтів та партнерів.

2021 – 2023 – інтенсивна реклама.

2018 – 2032 – за цей час підприємство стає прибутковим.

2021 – 2025 – відкриття заводу в Україні та продаж франшизи.

Товарний портфель (асортимент товарів та послуг)

1. Змішування сипких матеріалів, які використовуються в машинобудівній та будівельній промисловостях;
2. продаж лабораторних установок та повноцінних великогабаритних установок для подрібнення, подрібненої руди;
3. експорт продукції в сусідні країни;
4. ремонт аналогічного обладнання інших підприємств;
5. продаж франшизи.

Географічне розташування підприємства: київська область, Гостомель, рівненська область, Сарни.

Корпоративні стандарти. Графік роботи позмінний, 2 зміни на день. Працівники, які спілкуються з клієнтами, можуть працювати вдома, якщо вони будуть залишатись продуктивними. Інтенсивна нав'язлива реклама в м. Київ на його окраїнах та в центрі, яка триває півроку. Потім не нав'язлива 8 місяців, потім аналіз результатів реклами та вибір нової стратегії. Компанія намагається бути дистриб'ютором руди та будівельного обладнання в перші роки інвестування, щоб зменшити борги. Кожен робітник повинен мати завдання на початку робочого дня та звітувати вкінці робочого дня. Розвинута "горизонтальна взаємодія". Ведеться пропаганда в технічних ВНЗ України.

Ресурси і обмеження Ресурсами є руда, яка добувається та закуповується, а також обладнання для подрібнення руди, інше будівельне обладнання. Обмеження: якщо компанія кожного місяця не продає 30% із задуманого, то аналізується чи правильно обраний вектор розвитку компанії та ринок і методи збуту. При нестачі коштів змінювати договори з постачальниками руди, брати її під реалізацію. Кошти, які повинні бути витрачені на рекламу, будуть витрачені на рекламу.

Канали розподілу: збут товарів відбувається в основному через інтернет, а також через невеличкі офіси, які розміщуються у великих містах. В окраїнах реклами менше, ніж в центрі.

Споживча поведінка: споживачі обирають товар переважно за низькою ціною, а тоді вже питають про якість.

Організаційно-правова інформація:

- форма власності – приватна;
- організаційно-правова форма – товариство з обмеженою відповідальністю;
- стиль керівництва – демократичний.

Ресурси:

- фінансові – кошти, яких вистачає на 1 рік безперебійного функціонування підприємства, а також ще 30% цих коштів, які будуть витрачені на рекламу;
- виробничі та складські потужності – 10 барабанних млинів з об'ємами по 1,8 куб. м., за 1 годину продуктивність 10-12,5 тон. На складі 20% продукції зберігається;
- технології: використовуються трубні млини з модифікаціями. Також є регулятор економії зайвих обертань установок, який був запозичений з американського патенту та вдосконалений;
- інформаційні: борди, новинні портали, ЗМІ, рекламні спільноти в інтернеті;
- трудові: є 3 зміни працівників. В сукупності це 90 людей;
- інтелектуальні: значна частка працівників з досвідом роботи в аналогічній компанії протягом декількох років;
- правові: є юридичний відділ, який включає 9 людей.

Таблиця 8.2 – Узагальнений список необхідної інформації

№ п/п	Необхідна інформація
1	Щоб не було збою в роботі машин, необхідна додаткова лінія з таких установок, а також кваліфікований персонал, який буде обслуговувати даний тип установок.
2	Щоб не було нещасних випадків, необхідно встановлювати захист більший, аніж рекомендується. Також необхідно завжди контролювати виконання норм безпеки.
3	Необхідно мати декілька приблизних планів дій при непередбачуваних обставинах, що дасть велику перевагу перед конкурентами.
4	Краще не допустити проблему, ніж вирішувати її.

Таблиця 8.3 - Аналіз внутрішнього маркетингового середовища підприємства

Внутрішні фактори	Вплив фактору		Симптоми та проблеми можливості
	Можливості	Загрози	
Збій в роботі установки	Досвід, зменшення подібних ситуацій в майбутньому	Невиконання плану	Ситуація є, оскільки її не було передбачено. Потрібно проаналізувати чому вона сталась та як її виправити.
Нещасний випадок на виробництві	Випробування юридичного відділу в дії, встановлення додаткового захисту, показова ситуація для інших працівників	Суд, погана репутація, потрібен новий працівник, ремонт установки	Працівник не дотримувався техніки безпеки, тому що контроль за виконанням був недостатнім. Потрібно це виправити. Тоді подібних випадків не буде в майбутньому.
Різка зміна на ринку	Можливість обігнати конкурентів, заявивши про себе унікальним товаром	Невидима рука ринку може викинути підприємств о з роботи	Не було плану дій при такій ситуації. Проте є можливість покращити свою позицію в ринку та обігнати конкурентів.

8.3 Аналіз факторів макромаркетингового середовища

Таблиця 8.4 - Підсумкова таблиця факторів політико-правового середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Зміна законодавства та зміна оподаткування	Вихід на інші ринки збуту продукції	Загроза втратити свою позицію на ринку	Потрібно дати завдання юридичному відділу знайти спосіб вже зараз зменшити оподаткування. Одночасно із цим потрібно подумати що може приносити більший прибуток, а що є не суттєвим і таким, чим можна пожертвувати.
Погана репутація	Піар, нові клієнти, при умові, якщо компанія буде зберігати хороше обличчя	Погана репутація може бути довгий час, частина клієнтів може піти, прибуток зменшиться, менший потік кваліфікованих кадрів на підприємство	Потрібно мати запас грошей на рекламу, а також потрібно заручитись підтримкою рекламних кампаній та авторитетних людей.
Зміна внутрішньої політики компанії	Можливість створення дружнього колективу та розуміючого та такого, який допомагає, правління	Велика загроза погіршення ситуації, яка зараз є на даний момент	Потрібно перейняти досвід інший компаній та добре все прорахувати перш ніж починати зміни в компанії. Також не потрібно слідувати дуже чітко плану, адже можна зробити краще, вносячи якісь корективи в ході роботи. Також чітко слідувати плану може просто не вийти.
Звинувачення в порушенні чинного законодавства підприємством	Можливість знайти недобросовісний персонал та замінити його, а також схеми, за якими відбувається порушення	Штраф, погана репутація. В найгіршому варіанті підприємство можуть закрити.	Щоб попередити порушення закону з боку персоналу, необхідно “залатати всі дірки в самій схемі роботи підприємства”.

Таблиця 8.5 - Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Економічна криза	Можливість закріпитись на ринку, пристосуватись до нових трендів	Велика ймовірність того, що підприємство понесе великі втрати, або навіть закрийється	Звернення до кризис-менеджера, проведення брейн-штурмів, система премій для персоналу, який переймається управлінськими проблемами виробництва.
Витрати коштів, яких можна уникнути	Експеримент: аналіз результату витрату коштів	Найгірший випадок – банкрутство.	Потрібно власноруч перевіряти хоча б 1 раз в 2 тижні витрати та доходи виробництва на найнижчих рівнях. Також створити ієрархію на підприємстві, де всі один перед одним звітують.
Наявність товарного дефіциту	Можливість виробляти цей товар, або ж перепродавати	Є загроза не знайти необхідний товар та недоотримати прибуток	Використання практики дропшипінгу на перших порах із попереднім укладанням контракту та перевіркою стану та якості товарів та послуг.
Перенасиченість ринку	Чудовий шанс бути новатором у даній галузі та модернізувати надавані продукти та послуги	Можна бути непоміченим та стати банкрутом	Альтернативний спосіб вирішення проблеми – креативна реклама.

Таблиця 8.6 - Підсумкова таблиця факторів науково-технічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Морально застаріла машина	Продати з часом як раритет, використати машину як декорацію, зробити музей, збирати застарілі машини, вдосконалювати їх та продавати	Якщо вчасно не переорієнтувати виробництво то фінансові втрати неминучі	Застарілі машини можна не продавати, а здавати в оренду
Дана галузь різко перестає бути такою, що несе велику потребу	Переобладнання підприємства	Банкрутство	Продати підприємство та зайнятись іншими справами
Для виробництва товарів потрібна згода на використання патенту	Вдосконалення виробництва, встановлення вигідних умов співпраці з авторами патенту	Нераціонально витрачені кошти, погано складений контракт	Створення власного патенту
Неможливість прорахувати всі параметри машини	Можливість знайти дуже кваліфіковані кадри	Загроза зробити поганий продукт	Співпраця з конкурентами та випуск спільного продукту

Таблиця 8.7 - Підсумкова таблиця факторів демографічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Чисельність населення різко зростає	Можливість збільшити обіг коштів	Кінцевий продукт в конкурентів буде значно відрізнятись від нашого	Проведення соці. опитування, кредит в банку на розвиток підприємства
Популяризація певного сімейного стану населення	Створення вигідних умов для працівників, враховуючи побажання	Зменшення продуктивності підприємства	Створення філіалу в іншій країні
Міграція населення	Розвідка про галузь та її стан в інших країнах	Зменшення попиту, зменшення прибутковості та чисельності працівників, можлива нерентабельність виробництва	Креативна реклама, зміна вектору розробки

Таблиця 8.8 - Підсумкова таблиця факторів соціо-культурного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Популяризація певних субкультур	Якщо підприємство буде дотримуватись принципів цих субкультур то воно швидко обжене конкурентів	Люди, які не люблять ці субкультури, можуть перестати бути клієнтами або працівниками на підприємстві	Спонсорство в подіях, які подобаються представникам субкультур
Тенденція до зміни культури	Зміна статусу на підприємстві	Нерозуміння з боку "старожилів"	Необхідно провести соціальне опитування серед клієнтів а працівників
Зміна в соціальних класах	Зміна заробітної плати та типу роботи	Зміни можуть бути занадто серйозними, і потрібен буде час щоб до них звикнути та певним чином переорієнтувати виробництво	Запуск реклами, в якій сказано, що для певних соціальних класів підприємство принесе велику користь

Таблиця 8.8 - Підсумкова таблиця факторів природного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Прикута увага до забруднення навколишнього середовища	Позиціонування підприємства як екологічно безпечного	Витрата значної частини грошей, які будуть не швидко повернуті назад	Певну групу товарів можна перестати випускати на даному виробництві, але почати випускати на виробництві, яке знаходиться в іншому районі чи країні.
Природні катаклізми	Можливість почати все практично спочатку, але тепер із досвідом	Майже всі шанси не відновити виробництво	Можна залучити гроші до реставрації виробництва з держбюджету, запропонувавши хороші умови
Відкриття нових джерел ресурсів	Зміна партнерів	Сировина може бути сумнівної якості	Частково можна перейти на нову сировину, але значна частина виробництва не змінюється
Вартість енергоносіїв значно підвищилась	Пошук альтернативних джерел енергії, перепрофілювання виробництва, перерозподіл коштів виробництва, оформлення дотацій та субсидій	Велика розтрата коштів,	Ринок збуту можна змінити, а також можна зробити диференціацію цін одних і тих самих товарів в залежності від місця продажу

8.4 Аналіз факторів мікроркетингового середовища

Таблиця 8.8 - Підсумкова таблиця впливу споживачів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Споживачі цікавляться послугами, які підприємство не надає	Можливість розширити спектр послуг	Потік клієнтів може не співпадати з розрахунковим	Розширення спектру послуг на декілька одиниць. Закупка невеликої кількості товарів для швидкого збуту, або ж повернення протягом 14 днів.
Споживачі скаржаться на високу ціну	Пошук нових шляхів надавати товари та послуги за нижчою ціною, мінімально змінюючи при цьому прибуток	Можна позбутись великої частки клієнтів, якщо нічого не змінювати	Впровадження системи знижок для постійних клієнтів.
Споживачі скаржаться на погану якість товарів чи послуг	Створення нових товарів або модернізація вже існуючих	Пошук причин поганої якості може зайняти великий проміжок часу	Консультація з досвідченим фахівцем, який працював на багатьох етапах виробництва продукції
Попит на продукцію невисокий	Можливість переорієнтації виробництва та в результаті проведених маніпуляцій збільшити попит та прибуток	Зменшення клієнтури	Вдалий час для запуску рекламної кампанії. Потрібно почати співпрацю з суміжними підприємствами.

Таблиця 8.10 - Підсумкова таблиця впливу конкурентів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Випуск конкурентами унікального товару	Можливість випуску унікального товару, який би конкурував з надприбутковими товарами конкурентів	Перехід клієнтури до конкурентів	Перепродаж товарів конкурентів та створення фірми-дистриб'ютора. Дослідження плюсів та мінусів надприбуткових товарів конкурентів з метою випуску аналогічних товарів під власним брендом.
Випуск конкурентами товарів, які дуже схожі на товари нашої компанії	Можливість зайняти передову позицію на ринку, якщо обґрунтувати переваги власного продукту перед іншими та популяризувати його	Товар конкурентів може виштовхнути з ринку товар нашої компанії	Запропонувати великим торговельним мережам та ЗМІ вигідні умови співпраці.
Зміна конкурентами іміджу нашої компанії	Можливість "зіграти на контрасті" та показати переваги компанії	Пропаганда негативного іміджу стосовно нашої компанії може бути занадто потужною	Визнання частини негативних сторін компанії як дійсних та запуск рекламної кампанії, де говориться про усунення зазначених недоліків та обіцянку випуску хорошого продукту.
Шпіонаж конкурентами в нашій компанії	Можливість пропаганди поганої репутації для конкурентів	Втрата цінного продукту та цінної інформації, які в руках конкурентів значно зменшать прибутки нашої компанії	Проведення власного шпіонажу та тотальний контроль пропускового режиму на компанії, ретельний відбір кваліфікованих кадрів.

Таблиця 8.11 - Підсумкова таблиця впливу постачальників

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Відмова постачальників від співпраці	Пошук нових постачальників та укладання нових контактів з новими умовами	Нові умови співпраці можуть бути значно гіршими	Вихід на інші ринки співпраці та зсув співвідношення заробітку грошей в зовсім іншу галузь
Претензії постачальників до нашого підприємства та бажання змінити умови контракту	Дати згоду на зміну контрактів та укріпити співпрацю. Цим самим співпраця буде у довгостроковій перспективі	Компроміс може бути недосяжний	Згода на зміну контракту та продовження співпраці протягом невеликого часу. Пошук нових постачальників.
Співпраця постачальників, з якими ми працюємо, з нашими конкурентами	Налагодження партнерства з конкурентами, можливо навіть об'єднання	Немає переваг над конкурентами	Проведення домовленості відмови співпраці з конкурентами та надання кращих умов для постачальників. Запуск потужної рекламної кампанії. Випуск нового продукту.
Незадовільна якість продукції постачальників	Можливість зведення постачальника з конкурентами та співпраця власної компанії з іншими постачальниками	Зменшення клієнтури та погіршення репутації компанії	Подальша співпраця з постачальниками з подальшою модернізацією продукції. Закупка товару розібраного та по запчастинам та зменшення цим самим вартості товару.

Таблиця 8.12 - Підсумкова таблиця впливу контактних аудиторій

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Стаття про компанію в журналі з нейтральною оцінкою	Піар, збільшення клієнтури	Загострення конкуренції із схожими підприємствами	Збільшення позитивних статей про компанію, за які компанія буде давати гроші. Це призведе до збільшення клієнтури.
“Роздуття” негативних сторін компанії	Переорієнтація підприємства таким чином, щоб негативні сторони звести до мінімуму	Зменшення клієнтури та зменшення замовлень в компанії	Невдалий продукт можна більше не випускати, але можна випустити продукт, який враховував би недоліки попереднього продукту.
Розкриття в ЗМІ секрету технологічної схеми виробництва	Піар для компанії та переорієнтація виробництва	Банкрутство компанії	Пропаганда інформації, яка б спростовувала розкриття процесу виробництва продукції та паралельно з цим непомітна зміна продукції.
Контактні аудиторії поводять себе таким чином, ніби нашої компанії не існує	Чиста репутація, можливість гучно про себе заявити, нестандартно поводитись на ринку	Загроза бути непоміченим та недоотримувати прибутків	Можливість створення власного рекламного агенства

Таблиця 8.13 – Формулювання управлінської проблеми

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> - Легко залучити ЗМІ, оскільки кінцевий продукт є унікальним з точки зору матеріалу. - Є декілька постачальників сировини, які співпрацюють з нашою компанією. - Конкурентна перевага у технології виробництва продукту. 	<ul style="list-style-type: none"> - Потрібне залучення інвестицій. - У компанії немає авторитету на ринку, а тому і немає довіри. - Проведення науково-дослідницьких робіт не гарантує результату у вигляді нового продукту.
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> - Можливість залучити інвесторів, нарощувати фінансову вагу акцій компанії. - Можливість виконувати замовлення та позиціонувати компанію в якості дистриб'ютора. - Можливість створення філіалу на базі іншого підприємства та навпаки. 	<ul style="list-style-type: none"> - Банкрутство підприємства, або заборгованість впродовж довгого часу. - Інвестори будуть диктувати не вигідні для компанії умови. - Будь-який інцидент у компанії, спричинений через недотримання технік безпеки, одразу відлякає потенційних клієнтів та інвесторів.

Управлінська проблема: відсутність унікальних товарів та репутації компанії, яка б зробила компанію практично монополістом.

Альтернативні шляхи вирішення управлінської проблеми / реалізації управлінської можливості: об'єднання існуючих малих компаній під одним брендом, співпраця з уже відомим брендом для створення кредиту довіри, мінімізація витрат шляхом розвитку та використання інтернет-сайту, залучення до вирішення управлінської проблеми кризис-менеджера, спонсорство у заходах, які цікаві потенційним клієнтам.

Таблиця 8.14 – Слабкі та сильні сторони альтернативних шляхів.

Альтернативи	Слабкі сторони	Сильні сторони
1. Об'єднання існуючих малих компаній під одним брендом.	Складність, ризик відмови компаній до об'єднання.	Потужний конкурент на ринку. Створення впізнаваного бренду без додаткових затрат на рекламу.
2. Співпраця з уже відомим брендом для створення кредиту довіри.	В рекламі зацікавлена тільки наша компанія. Співпраця швидше за все буде не на вигідних для нас умовах.	Якісно нові клієнти, збільшення прибутку при сталому числі філіалів компанії.
3. Мінімізація витрат шляхом розвитку та використання інтернет-сайту.	Хороший інтернет сайт та його оптимізація в пошукових мережах коштує дорого. Підтримка коштуватиме набагато дешевше.	Служба консультації в телефонному режимі, клієнтура з мережі інтернет, створення клієнтської бази, можливість планувати свої витрати та закупки.
4. Залучення до вирішення управлінської проблеми кризис-менеджера.	Є ризик, що проблема вирішена не буде, або після вирішення проблеми виявиться ще одне неявна проблема. Консультація кризис-менеджера фінансово може бути невиправданою, а також кризис-менеджера знайти непросто.	При грамотній співпраці з кризис-менеджером управлінська проблема має високі шанси на вирішення.
5. Спонсорство у заходах, які цікаві потенційним клієнтам.	Розраховано на довгострокову перспективу. Заходи, які цікаві потенційним клієнтам, потрібно дуже ретельно відбирати.	Нове обличчя компанії на ринку, яке приваблює однаково як для існуючих клієнтів, так і для незнайомих.

Найоптимальніший шлях вирішення управлінської проблеми є – співпраця з уже відомим брендом та інтенсивний розвиток інтернет-сайту. Це дозволить створити зручний онлайн-сервіс, якому можна довіряти. До того ж, не потрібно довго чекати результату. Масове надходження нових клієнтів буде вже у першому кварталі після запуску сайту або іншого рекламного ходу, де вказано “гучне ім’я” іншої компанії та співпрацю нашої компанії з нею.

ВИСНОВОК

Одним з важливих факторів, який стримує вирішення задачі підвищення ефективності змішувачів, є сегрегація компонентів сипких матеріалів за їх фізико-механічними властивостями. Це явище призводить до погіршення якості кінцевого продукту в силу коливань його властивостей за об'ємом складу, що може проявитись зниженням ефективності хімічних реакцій, якості отриманих матеріалів в металургії, в хімічній промисловості, будівництві та інших галузях.

Створена лабораторна установка на кафедрі ХПСМ ІХФ. Досліджено траєкторії руху матеріалу при різних швидкостях обертання барабана та при різній завантаженості. Відносна похибка не перевищує 15%. Впроваджені 3 методи обробки результатів досліджень траєкторії руху сипкого матеріалу, написане відповідне програмне забезпечення. Установка може використовуватись в подальшому для проведення лабораторних робіт, а саме для визначення траєкторії руху сипких матеріалів, дослідження режимів руху матеріалу та встановлення залежностей між параметрами установки та матеріалом.

ДОДАТКИ

Додаток А

Визначення Траекторії частинок по 2 фотокарточкам з <>.BMP файлів

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "main.h"

void Shapka(int&, int&, FILE *fp);
void Center(int[], int, int, int, int, int [], int
[]);
void Kod_Shar(int[], int, int, int&, int);
void ColPix(int [], int, int, int [], int [], int
[]);

FILE * f_bmp = NULL;
FILE * f_rez = fopen("VVV_1-2n.lsp",
"w");

void main()
{
    int K_ZAP,KL_SH1,KL_SH2; //
Код записи частица
    int N,M,NM;
    int CenPoi1I[250], CenPoi1J[250];
//Наверное достатрчно частиц
    int CenPoi2I[250],
CenPoi2J[250],KodIsp2[250];

    int RIS=1;
//    while(RIS<=1){
//        !!!!!!! Для 1 рисунка
        while(RIS<=2){
            if(RIS==1){f_bmp =
fopen("VVV_1n.bmp", "rb");
K_ZAP=1000;} // начальный код для
описания частиц
            if(RIS==2){f_bmp =
fopen("VVV_2n.bmp", "rb");
K_ZAP=2000;} // начальный код для
описания частиц

            Shapka(N, M, f_bmp); // Чтение
щапки, опр размеров рисунка N, M
            NM = (N+1)*(M+1);
            int* Clr1 = new int[NM]; int* Clr2
= new int[NM]; int* Clr3 = new int[NM];
            int* Entity = new int[NM]; // Код
тела

            int KOL_SHAR=0; // Количество
обрабатываемых частиц (Определяется)
            ColPix(Entity, N, M, Clr1, Clr2, Clr3); //
Определение цвета пиуселей на рисунке

            Kod_Shar(Entity,N,M,KOL_SHAR,K_ZAP
); // Определение кодов каждого частица
их количества

            if(RIS==1){KL_SH1=KOL_SHAR;Center(
Entity,N,M,KOL_SHAR,K_ZAP,CenPoi1I,
CenPoi1J);} // Определение центров

            if(RIS==2){KL_SH2=KOL_SHAR;Center(
Entity,N,M,KOL_SHAR,K_ZAP,CenPoi2I,
CenPoi2J);} // Определение центров

            RIS++;
            // ЧИСТКА массивов
            delete [] Clr1; Clr1 = 0; delete []
Clr2; Clr2 = 0; delete [] Clr3; Clr3 = 0;
            delete [] Entity; Entity = 0; //
Очистить массивы
            fclose(f_bmp);
        } // while(RIS<=2)

        double x1,x2,y1,y2,dx,dy,dist;
        double dmin,xmin,ymin,Vx,Vy,VV;
        int i,j,jmin;

        for(j=1;j<=KL_SH2;j++)KodIsp2[j]
=1; //Проверка чтобы не определять
повторно

        for(i=1;i<=KL_SH1;i++)
        {
            x1=CenPoi1I[i];
            y1=CenPoi1J[i];
            dmin=1.0e6;
            for(j=1;j<=KL_SH2;j++)
            {
                if(KodIsp2[j]==1){

                    x2=CenPoi2I[j];
                    y2=CenPoi2J[j];

                    dx=x2-x1;
                    dy=y2-y1;    dist=sqrt(dx*dx+dy*dy);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        if(dist<dmin){dmin=dist; xmin=x2;
        ymin=y2; jmin=j; Vx=dx; Vy=dy;
        VV=dist;}
    }
    //fprintf(f_rez,"%7.1f%7.1f %7.1f%7.1f
    Vx=%7.1f Vy=%7.1f
    Dis=%7.2f\n",x1,y1,x2,y2,dx,dy,dist);
    }
    KodIsp2[jmin]=0;
    fprintf(f_rez," ; * x1=%6.1f y1=%6.1f
    xmin=%6.1f ymin=%6.1f Vx=%7.1f
    Vy=%7.1f
    VV=%7.2f\n",x1,y1,xmin,ymin,Vx,Vy,VV);
    //fprintf(f_rez,"n");
    }

    fclose(f_rez);// fclose(f_bmp); //
    fclose(f_txt);
    }
    //-----
    /* // Запись результата с кодами
    for(int j=1; j<=M; j++){
        for(int i=1; i<=N; i++){
            if(Entity[(j-
            1)*N+i]>=1) fprintf(f_rez,"%8d %4d %4d
            \t%d\n",(j-1)*N+i,j,i,Entity[(j-1)*N+i]);
        }
        fprintf(f_rez," Rezul STROKA
        %d\n",j);
    }
    */
    //-----
    void Center (int Entity[], int N, int M, int
    KOL_SHAR, int K_ZAP,int CenPoi[],int
    CenPoiJ[]){
        // Определение координат центров
        // K_ZAP - Код для шара
        int Sum_X,Ix, Sum_Y,Jy, Cen_i,
        Cen_j;
        int KL_1=1;

        while(KOL_SHAR-KL_1>=0){
            Sum_X=0;Ix=0;
            Sum_Y=0;Jy=0;
            K_ZAP=K_ZAP+1; // Текущий
            Код записи частицы
            for(int j=1; j<=M; j++)
                for(int i=1; i<=N; i++)

```

```

                if(Entity[(j-1)*N +
                i]==K_ZAP){Sum_X=Sum_X+i;Ix=Ix+1;
                Sum_Y=Sum_Y+j;Jy=Jy+1;}

                Cen_i=Sum_X/Ix;
                CenPoi[KL_1]=Cen_i;
                Cen_j=Sum_Y/Jy;
                CenPoiJ[KL_1]=Cen_j;
                printf(" **K_ZAP(%d) CenTr
                (%d,%d), S=%4d px^2
                \n",K_ZAP,Cen_i,Cen_j,Ix);
                fprintf(f_rez," ; *K_ZAP(%d) CenTr
                (%d,%d), S=%4d px^2
                \n",K_ZAP,Cen_i,Cen_j,Ix);
                fprintf(f_rez,"(command \"_TEXT\" (polar
                '%d %d) (* pi 0.20) 32) 10 0 (itoa
                %d)\n",Cen_i,Cen_j,K_ZAP);
                KL_1++;
            }
            fprintf(f_rez,"n");
        }
        //-----
        void ColPix(int Entity[], int N, int M, int
        C1r1[], int C1r2[], int C1r3[]){
            char sim;
            int Kod,i,j,k,N_str,NM;

            NM = (N+1)*(M+1); N_str=1; //
            Счетчик      строка j - столбец
            i=0; // Счетчик

            while(!feof(f_bmp)) // Читать до
            конца файла
            {
                sim='\0';
                fscanf(f_bmp,"%c",&sim);
                Kod = (int)sim;
                if(Kod<0) Kod=Kod+256;
                // Корректировка кода
                если буква кириллицей

                i=i+1;
                // if((int)(i/5000)*5000==i)
                printf("%8d '%c' \t%d \t C1olb
                %d\n",i,sim,Kod,N_str); // На экран

                // if(i<=54)fprintf(f_txt,"%c ->
                \t%d\n", sim,Kod); // Запись в файл
                if(i==1) {j=1;k=1;}

                if(j==N*3+1) {k=0;
                /*fprintf(f_txt,"\t%d\n",Kod);*/}

```

```

        if(j==N*3+2) {k=0;
/*fprintf(f_txt, "\t%d\n", Kod);*/ j=0;
N_str=N_str+1;}

        if(k==1) {Clr1[(N_str-
1)*N+(j/3+1)]=Kod; /*fprintf(f_txt, "%5d
%5d \t%d", N_str, j/3+1, Kod);*/} //
Запись в файл
        if(k==2) {Clr2[(N_str-
1)*N+(j/3+1)]=Kod;
/*fprintf(f_txt, "\t%d", Kod);*/} // Запись в
файл
        if(k==3) {Clr3[(N_str-
1)*N+(j/3+1)]=Kod;
/*fprintf(f_txt, "\t%d\n", Kod);*/} // Запись
в файл
        k=k+1; j=j+1;
        if(k==4) k=1;
    }
//    fprintf(f_txt, "\n\n !!!! \n\n");

// Анализ точек
// Обнуление массива кодов точек
(номеров частиц)
for(j=0; j<NM; j++) Entity[j]=0;

// Определение всех цветных
частиц
for(j=1; j<=M; j++)
    for(i=1; i<=N; i++){
        Kod=(j-1)*N+i;
// Для красного цвета

if(Kod==1 || Kod==N*M ||
(Kod/5000)*5000==Kod)
    printf(" i=%4d j=%4d K=%6d %3d
%3d
%3d\n", i, j, Kod, Clr1[Kod], Clr2[Kod], Clr3[K
od]);
//fprintf(f_rez, " !-> i=%4d j=%4d K=%6d
%3d %3d
%3d\n", i, j, Kod, Clr1[Kod], Clr2[Kod], Clr3[K
od]);

        if( (Clr1[Kod]>=0
&& Clr1[Kod]<=10)
            &&
(Clr2[Kod]>=0 && Clr2[Kod]<=10)
            &&
(Clr3[Kod]>=245 && Clr3[Kod]<=255))
Entity[Kod]=1;

```

```

//            if(Entity[Kod]==1)
fprintf(f_txt, "%8d %4d %4d
\t%d\n", Kod, j, i, Entity[Kod]);
        }
}

//-----
-----
void Kod_Shar(int Entity[], int N, int M,
int& KOL_SHAR, int K_ZAP){
    // Определение кодов каждой
частицы отдельно
//    K_ZAP=100; // Код для записи
частицы
//    KOL_SHAR=0; // Количество
обрабатываемых частиц (счетчик)
    int k, i, j, Kod;
    int KL_1=1; // Наличие
неопознанных

    while(KL_1>0){
        K_ZAP=K_ZAP+1; // Текущий
Код записи частица
        k=0;
        for(j=1; j<=M; j++) {
            for(i=1; i<=N; i++) {
                Kod=(j-1)*N + i;

                if(k==0 &&
Entity[Kod]==1) {Entity[Kod]=K_ZAP;
k=1;} // Первый неопределенный для
начала нумерации

                if(Entity[Kod]==1
&& // j, i-1
                    j-1, i-1
                    j-1, i
                    (Entity[(j-
1)*N+(i-1)]==K_ZAP || Entity[(j-2)*N+(i-
1)]==K_ZAP || Entity[(j-2)*N+i]==K_ZAP
|| Entity[(j-2)*N+(i+1)]==K_ZAP))

Entity[Kod]=K_ZAP;
//
                if(Entity[Kod]>=1) fprintf(f_txt, "%8d
%4d %4d \t%d\n", Kod, j, i, Entity[Kod]);
                }
            }
        }
    }
}

```



```

// Уточнение каждого частица
отдельно (выходящие вверху с лева)
проходы пока будут изменения
while(k>0){
    k=0; // Счетчик
исправлений
    for(j=1; j<=M; j++) {
        for(i=1; i<=N; i++)
        {
            Kod=(j-1)*N +
i;

            if(Entity[Kod]==1 && // j,i-1
                j-1,i-1
                j-1,i
                j-1,i+1

            (Entity[(j-1)*N+(i-1)]==K_ZAP ||
Entity[(j-2)*N+(i-1)]==K_ZAP || Entity[(j-
2)*N+i]==K_ZAP || Entity[(j-
2)*N+(i+1)]==K_ZAP ||

                // j,i+1
                j+1,i-1
                j+1,i
                j+1,i+1

            Entity[(j-1)*N+(i+1)]==K_ZAP ||
Entity[(j)*N+(i-1)]==K_ZAP ||
Entity[(j)*N+i]==K_ZAP ||
Entity[(j)*N+(i+1)]==K_ZAP))

                {Entity[Kod]=K_ZAP; k++;}
//
            if(Entity[Kod]>=1)fprintf(f_txt,"*
%8d %4d %4d
\t%d\n",Kod,j,i,Entity[Kod]);
        }
//
        fprintf(f_txt," Rez
STROKA %d\n",j);
    }
//
    fprintf(f_txt,"** SUM ** k=
%d\n",k);
}
    printf(" STOP R_ZAP
%d\n",K_ZAP);
//
    fprintf(f_txt," STOP R_ZAP
%d\n\n",K_ZAP);

// Опр есть ли еще неопзн частиц
KOL_SHAR=KOL_SHAR+1;
KL_1=0;
for(j=1; j<=M; j++)
    for(i=1; i<=N; i++)

```

```

if(Entity[Kod=(j-1)*N
+ i]==1)KL_1=1;
} // while(KOL_SHAR>0)
printf(" *** KOL_SHAR
%d\n\n",KOL_SHAR);

//
return;
// Просмотр определенных
частичек в ACAD
fprintf(f_rez,"(setvar \"CMDECHO\"
0)\n");
fprintf(f_rez,"(command \"_LAYER\"
\"_M\" \"%d\" \"_C\" %d \"\"
\"\")\n",K_ZAP-
KOL_SHAR,K_ZAP/1000+4);
for(j=1; j<=M; j++)
    for(i=1; i<=N; i++)
        if(Entity[(j-1)*N +
i]>=1)

            fprintf(f_rez,"(command \"_PLINE\"
'(%d %d)'(%d %d)'(%d %d)'(%d %d)
\"_c\"); N=%d\n"
                ,i,j,
i+1,j, i+1,j+1, i,j+1, Entity[(j-1)*N + i]);
}

//-----
void Shapka(int& N, int& M, FILE *pFile)
{
// считываем заголовок файла
BITMAPFILEHEADER header;//
__attribute__((unused));

header.bfType = read_u16(pFile);
header.bfSize = read_u32(pFile);
header.bfReserved1 = read_u16(pFile);
header.bfReserved2 = read_u16(pFile);
header.bfOffBits = read_u32(pFile);

// считываем заголовок изображения
BITMAPINFOHEADER bmiHeader;

bmiHeader.biSize =
read_u32(pFile);
bmiHeader.biWidth =
read_s32(pFile); // длина(столбцов)
bmiHeader.biHeight =
read_s32(pFile); // высота (строк)

```

```

    bmiHeader.biPlanes    =
read_u16(pFile);
    bmiHeader.biBitCount  =
read_u16(pFile);
    bmiHeader.biCompression =
read_u32(pFile);
    bmiHeader.biSizeImage  =
read_u32(pFile);
    bmiHeader.biXPelsPerMeter =
read_s32(pFile);
    bmiHeader.biYPelsPerMeter =
read_s32(pFile);
    bmiHeader.biClrUsed    =
read_u32(pFile);
    bmiHeader.biClrImportant =
read_u32(pFile);

printf(" Width(N)=%4d\n Height(M)=%4d\n
BitCount=%d\n
Compression=%d\n\n",bmiHeader.biWidth,
bmiHeader.biHeight,

bmiHeader.biBitCount,bmiHeader.biCompr
ession);
    N=bmiHeader.biWidth;
    M=bmiHeader.biHeight;
}
//-----
-----
static unsigned short read_u16(FILE *fp)
{
    unsigned char b0, b1;
    b0 = getc(fp);
    b1 = getc(fp);
    return ((b1 << 8) | b0);
}
//-----
static unsigned int read_u32(FILE *fp)
{
    unsigned char b0, b1, b2, b3;
    b0 = getc(fp);
    b1 = getc(fp);
    b2 = getc(fp);
    b3 = getc(fp);
    return ((((((b3 << 8) | b2) << 8) | b1) <<
8) | b0);
}
//-----
static int read_s32(FILE *fp)
{
    unsigned char b0, b1, b2, b3;
    b0 = getc(fp);

```

Визначення Траекторії по набору фотографій

```

;          Двнут  Двнешн
;(command "_DONUT" 0.40 0.5)
;(command "_DONUT" 80 100 '(-600
1160) "")

; ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ
; 1. RL для нанесення координат частинок
; 2. Vv визначення відстані та вектору
для швидкості
; 3. MESH0 - Нанесение сетки
; 4. v1v2 - Определение скоростей V1, V2,
созданий файла V1v2_"project".csv
Створює поля по кресленню
; 5. PV - Определение координат сетки
ФАОРМИРОВАНИЕ <>.vtk ФАЙЛА
; ПОСТРОИТЬ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ
; 1. L-cvt - Чтение файла <>.csv и перевод
его в список для послед использования в
PV Створює поля по файлу <>.csv
; 2. PV - ФАОРМИРОВАНИЕ <>.vtk
ФАЙЛА
; 2. dan - Отрисовка векторов скорости в
узлах сетки Вывод векторов в сетку
; zam - Заморозить все кроме кроме
"MESH" "V1V2"
; razm - Разморозить все

(if (null vlax-get-acad-object) (vl-load-
com)) ; Запуск реактора
(setvar "CMDECHO" 0) (setvar
"OSMODE" 0)

; Вказати шлях, масштаб та час
рисуноків
(setq puti "H://" project "2F5770_39");
Шлях до проекту та імя проекта
;(setq puti "H://" project "2f5771"); Шлях
до проекту та імя проекта
;(setq puti "H://" project "2f5744"); Шлях
до проекту та імя проекта
(setq Foto1 "5770_39_105.jpg" Foto2
"5770_39_157.jpg" f12 2); Назви
фотографій
;(setq Foto1 "5770_18_840.jpg" Foto2
"5770_18_869.jpg" f12 2); Назви
фотографій
;(setq Foto1 "5770_14_296.jpg" Foto2
"5770_14_348.jpg" f12 2); Назви
фотографій

;(setq Foto1 "5771_00_533.jpg" Foto2
"5771_00_549.jpg" f12 2); Назви
фотографій 2f5771
;(setq Foto1 "5770_33_616.jpg" Foto2
"5770_33_666.jpg" f12 2); Назви
фотографій
;(setq Foto1 "5682_02_435.jpg" Foto2
"5682_02_485.jpg" f12 2); Назви
фотографій
;(setq Foto1 "5744_04_888.jpg" Foto2
"5744_04_970.jpg" f12 2); Назви
фотографій горох
(setq MasRis 52.0); MasRis - коэф
масштабування рисунка
;(setq MasRis 520.0); MasRis - коэф
масштабування рисунка
;(setq MasRis 64.0); MasRis - коэф
масштабування рисунка горох

;;; (setvar "SURFTAB1" 17) (setvar
"SURFTAB2" 11)
;;; (setq $ST1 (+ (getvar "SURFTAB1") 1)
$ST2 (+ (getvar "SURFTAB2") 1))

(setq txt_F1 (substr Foto1 (- (strlen Foto1)
9) 6) txt_F2 (substr Foto2 (- (strlen Foto2)
9) 6)); Назви файлів на креслення
(setq tau (- (atof (vl-string-subst "." " "
txt_F2)) (atof (vl-string-subst "." " "
txt_F1))))); Визначення приращення по
часу
; -----
(defun c:RL ()
; Вказати файли з рисунками
(cond ((= f12 2) (ris_load2 f12 Foto1 150
txt_F1) (setq f12 1))
(= f12 1) (ris_load2 f12 Foto2 20
txt_F2) (setq f12 2))
(t nil)
)
; (command "_DONUT" 2.2 2.4); горіх
; (command "_DONUT" 0.20 0.25);
Пшено
(command "_DONUT" 0.40 0.5); горох
(princ)
)
(defun c:vv( / p1 p2 en1 en2 vsum)

```

```

; Визначення швидкості та вектору
швидкості
(while t
  (setq en1 (car (entsel "\n1 poi"))) (redraw
en1 3)
  ; (command "_LAYER" "_F" "FOTO_2"
"_T" "FOTO_1" "") ; (alert "Відкритий
FOTO_1")

  (setq en2 (car (entsel "\n2 poi"))) (redraw
en1 4)
  ; (command "_LAYER" "_F" "FOTO_1"
"_T" "FOTO_2" "") ; (alert "Відкритий
FOTO_2")

  (setq p1 (ot (cdr (assoc 10 (reverse (entget
en1)))(cdr (assoc 10 (entget en1)))0.5))
  (setq p2 (ot (cdr (assoc 10 (reverse (entget
en2)))(cdr (assoc 10 (entget en2)))0.5))
  (setq vsum (/ (distance p1 p2) tau (if (<
MasRis 100.0) 100.0 1000.0))); Перевести
в м/сек для Масш 52(см) 100 для 560(мм)
1000

  (command "_LAYER" "_M" "PLINE"
"_C" 4 "" ""); слой Для векторов
  (command "_PLINE" p1 "_W" 0.05
0.05 p2 "")
  (command "_LAYER" "_M" "TEXT"
"_C" 1 "" ""); слой Для текста
  (command "_TEXT" "_J" "_M" (ot p1
p2 0.5) 0.10 (* (/ (angle p1 p2) pi) 180) (rtos
vsum 2 4))
)
(princ)
)
; -----
(defun ris_load2($F $Ris $color $txt) ;
Загрузка рисунка
(if ris12 (command "_ERASE" ris12 ""))
(if ent_txt (command "_ERASE" ent_txt
""))
(if (= $F 1) (command "_LAYER" "_M"
"FOTO_1" "_C" $color "" ""))
(if (= $F 2) (command "_LAYER" "_M"
"FOTO_2" "_C" $color "" ""))
; (command "_TEXT" (polar '(0 0 0) (/ (*
45 pi) 180) (* 0.50 MasRis)) 1.5 0 $txt)
(setq ent_txt (entlast))
(command "_TEXT" (polar '(0 0 0) (/ (* 33
pi) 180) (* 0.74 MasRis)) 1.5 0 $txt) (setq
ent_txt (entlast))

```

```

; Виклик фото
(vla-AddRaster (vla-get-modelspace (vla-
get-activedocument (vlax-get-acad-object)))
; назв Твстав Масш Угол
(strcat puti project "/" $Ris) (vlax-3D-
point '(0 0 0)) MasRis 0)
(setq ris12 (entlast))
(command "_draworder" ris12 "" "_B");
); defun

```

```

; =====
; Определяется точка отстоящая от $p1 до
$р2 на расстоянии $rs
(defun ot ($p1 $p2 $rs)(polar $p1 (angle $p1
$р2) (* (distance $p1 $р2) $rs)))

```

```

; SURFTAB1 , SURFTAB2 для _edgesurf
сетка (установить SURFTAB2 = 16)

```

```

; MESH0 - Нанесение сетки
; v1v2 - Определение скоростей V1, V2,
созданий файла V1v2_"project".csv

```

```

; PV - Определение координат сетки

```

```

; ПОСТРОИТЬ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ
; 1. L-cvt - Чтение файла <>.csv и перевод
его в список для послед использования в
PV

```

```

; 2. dan - Отрисовка векторов скорости в
узлах сетки Вывод векторов в сетку

```

```

; -----
(defun c:v1v2(); / f n nab_plin p1 p2 poi vx
vy nab_vvv vx vy dist kt)

```

```

; Установка скоростей V1, V2
(setvar "CMDECHO" 0)(setvar
"OSMODE" 0)
(command "_LAYER" "_M" "V1V2" "_C"
"1" "" ""); слой по времени
(setq put_slid (strcat puti project "/"))
(setq nab_vs '())
(setq f (open (strcat put_slid "V1v2_"
project ".csv") "w"))

```

```

;;; (foreach msl '((8 . "PLINE1") (8 .
"PLINE2") (8 . "PLINE3") (8 . "PLINE4")
(8 . "PLINE5") (8 . "PLINE6") (8 .
"PLINE7") (8 . "PLINE8")
(8 . "PLINE9") (8 .
"PLINE10") (8 . "PLINE11") (8 .
"PLINE12") (8 . "PLINE13")) (8 .

```

```

"PLINE14")(8 . "PLINE15")(8 .
"PLINE16")
;;; (8 . "PLINE17")(8 .
"PLINE18") (8 . "PLINE"))

(foreach msl (append nab_LPLINE
'("PLINE")))
; (setq nab_plin (ssget "X" '((0 .
"LWPOLYLINE") (8 . "PLINE"))));
Выбор полилиний
(setq nab_plin (ssget "X" (list '(0 .
"LWPOLYLINE") (cons 8 msl)))) ; Выбор
полилиний

(setq nab_vvv (ssget "X" '((0 . "TEXT")
(8 . "TEXT")))) ; Выбор скорости

; Набор значений точек и скоростей
poi_v
(setq n 0 poi_v nil)
(while (< n (sslength nab_vvv))
(setq pv (ssname nab_vvv n))
(setq poi_v (cons (list (cdr (assoc 11
(entget pv)))) (read (cdr (assoc 1 (entget
pv)))))) poi_v)
(setq n (+ n 1))
)

(setq n 0)
(if nab_plin
(progn
(princ (strcat " Слой " msl ";" msl ";"
msl "\n") f)
(princ (strcat " Point; Vv; V1; V2; Dist;
Tau \n") f)
; (setq nab_vs '())
(while (< n (sslength nab_plin))
(setq plin (ssname nab_plin n))
(setq p1 (cdr (assoc 10 (entget plin)))
p2 (cdr (assoc 10 (reverse
(entget plin)))))
(setq poi (mapcar '* (mapcar '+ p1 p2)
'(0.5 0.5 0.5)))
(setq vx (- (car p2) (car p1)) vy (-
(cadr p2) (cadr p1)))
(if (= vx 0.0) (setq vx 1.0e-6))
(if (= vy 0.0) (setq vy 1.0e-6))
; (command "_LINE" poi (polar poi 0
vx) ""))
; (command "_LINE" poi (polar poi (*
pi 0.5) vy) ""))

; Выбор скорости
(setq m 0 vvv 0.0)

(while (< m (sslength nab_vvv))
; poi определяется как (x y)
(if (equal (list (car poi) (cadr poi))
0.0)
(car (nth m poi_v)) 0.1)
(setq vvv (cadr (nth m poi_v)) m
(sslength nab_vvv))
(setq m (+ m 1)) ;(setq m 9)
)
(if (= vvv 0.0) (progn (alert " Не
определена скорость на отрезке
(vvv=0.0)") (setq vvv 1.0e-6)))
(setq dist (distance p1 p2) kT (/ vvv
dist)
tau (/ dist vvv (if (<
MasRis 100.0) 100.0 1000.0))) ; kT коэф по
времени (setq vsum (/ (distance p1 p2) tau
(if (< MasRis 100.0) 100.0 1000.0));
Перевести в м/сек для Масш 52(см) 100
для 560(мм) 1000

(setq nab_vs (cons (list poi vvv (* vx kt) (*
vy kt)) nab_vs))

; Запись в файл
(setq p_text
(strcat ";"
(rtos vvv) ";" "
;
Vv
(rtos (* vx kt)) ";" "
; V1
(rtos (* vy kt)) ";" "
; V2
(rtos (* dist (if (<
MasRis 100.0) 0.01 0.001))) ";" " ; Dist
(rtos tau) ";" \n"
;
Tau
) )
(repeat 5 (setq p_text (vl-string-subst
"," " " p_text))) ; Замена для обработки
(prin1 poi f) (princ p_text f)
(setq n (+ n 1))
) ;while
); if
); foreach
(close f)
(princ)
)

```

```

; (length nab_vs)
; -----
(defun c:pV()
; ФАОРМИРОВАНИЕ <>.vtk ФАЙЛА
; Определение координат сетки
SURFTAB1, SURFTAB2 для _edgesurf
сетка (установить SURFTAB2 = 16)

(setq put_slid (strcat puti project "/"))
(setq f (open (strcat put_slid "V_" project
".vtk") "w"))
(princ (strcat "# vtk DataFile Version
3.0\ntest\nASCII\nDATASET
STRUCTURED_GRID\n") f)
(princ (strcat "DIMENSIONS "
      (rtos (+ (getvar
" SURFTAB2") 1) 2 0) " "
      (rtos (+ (getvar
" SURFTAB1") 1) 2 0) " 1\n") f)
(princ (strcat "POINTS " (rtos (* (+ (getvar
" SURFTAB1") 1) (+ (getvar
" SURFTAB2") 1)) 2 0) " float\n") f)
(setq nab_poi '() n 0)
(setq en (entnext))
(while en
  (if (and (eq (cdr (assoc 0 (entget en)))
" VERTEX")
      (eq (cdr (assoc 8 (entget en)))
" MESH")) ; (8 . "Mesh") СЛОЙ СЕТКИ
    (progn
      (setq poi (cdr (assoc 10 (entget en)))
n (+ n 1)
nab_poi (cons (list n poi)
nab_poi)
)
)
; (print poi)
))
(setq en (entnext en))
)
(setq nab_poi (reverse nab_poi)) ; Коор
точек сетки

(foreach n nab_poi ; Запись сетки в файл
  (setq xyz (cadr n))
  (princ (strcat (rtos (car xyz)) " " (rtos
(cadr xyz)) " 0.0\n") f)
  (princ "\n" f)

)

(setq nab_vvv (ssget "X" '((0 . "ТЕХТ") (8
. "ТЕХТ")))) ; Выбор скорости

```

```

; Набор значений точек и скоростей
poi_v
  (setq n 0 poi_v nil)
  (while (< n (sslength nab_vvv))
    (setq pv (ssname nab_vvv n))
    (setq poi_v (cons (list (cdr (assoc 11
(entget pv))) (read (cdr (assoc 1 (entget
pv)))))) poi_v))
    (setq n (+ n 1))
  )

  (princ (strcat "POINT_DATA " (rtos (*
(+ (getvar "SURFTAB1") 1) (+ (getvar
" SURFTAB2") 1)) 2 0) "\n") f)
  (princ "VECTORS V1_V2 float\n" f)

  (if (null nab_poi) (alert "Список nab_poi
ПУСТОЙ"))
  (if (null nab_vs) (alert "Список nab_vs
ПУСТОЙ"))
  (setq nab_fv1v2 '()) ; Значения в узлах
; Определение значений в узлах по
стедему для всех
  (foreach n nab_poi ; Коор точек сетки
(length nab_poi)
    (setq dist 0.0 vv1 0.0 vv2 0.0)
    (foreach m nab_vs ; Коор и скорость
(nab_vs из V1V2) (length nab_vs)
      (setq d (distance (cadr n) (car m))) ; (1
(220.059 238.37 0.0)) ((242.634 120.61)
0.2808 -0.194211 0.202807)
; (if(<= d 10.0) ; Расстояние не большк
(if(<= d 50.0) ; Расстояние не большк
      (setq dt (* (/ 1.0 d) (/ 1.0 d))
dist (+ dist dt)
vv1 (+ (* (caddr m) dt) vv1)
vv2 (+ (* (caddr m) dt) vv2)
)
)
)
(setq v1 (/ vv1 dist) v2 (/ vv2 dist))
(princ (strcat (rtos v1) " " (rtos v2) " 0.0
\n") f)
  (setq nab_fv1v2 (cons (list (cadr n) v1 v2
) nab_fv1v2))
)
(setq nab_fv1v2 (reverse nab_fv1v2))
(close f) ; Закреть <>.vtk

; Зацеия по сетке по длине

```

```

    (setq $ST1 (+ (getvar "SURFTAB1") 1)
$ST2 (+ (getvar "SURFTAB2") 1))
    (setq f (open (strcat put_slid "Mesh_"
project ".csv") "w")); Формирование
файла <>.csv
    ;(princ (strcat "Point; VV; V1; V2\n") f)
    (setq i 1 ik (if $ST2 $ST2 12) j 1 jk (if
$ST1 $ST1 20) kod 1)
    (while (<= i ik)
      (princ (strcat "I=" (rtos i 2 0) ";I=" (rtos i
2 0) "\n" "Point; VV; V1; V2\n") f) (setq
kod (+ kod 2))
      (setq j 1)
      (while (<= j jk)
        (setq nom (- (+ (* (- j 1) ik) i) 1))
        (setq n (nth nom nab_fv1v2))
        (prin1 (car n) f)
        (setq tK (itoa kod))
        (princ (strcat
;
          " ;" (vl-string-subst " ,"
"." (rtos (sqrt (+ (* (cadr n)(cadr n)) (* (caddr
n)(caddr n)))) 2 4)); VV
          " ;"
"=КОПЕНЬ(C"tk"*C"tk"+D"tk"*D"tk)";
VV
          " ;" (vl-string-subst " ,"
"." (rtos (cadr n) 2 4)) ;V1
          " ;" (vl-string-subst " ,"
"." (rtos (caddr n))) "\n") f ;V2
        (setq kod (+ kod 1))
        (setq j (+ 1 j))
      )
      (princ (strcat "\n") f) (setq kod (+ kod 1))
      (setq i (+ 1 i))
    )

    (close f);(setq a1 '(135.673 293.843 0.0)
a2 '(146.29 293.843 0.0) )
    (princ)
  )
; -----
  (defun c:L-cvt( / zn zn3)
; Чтение файла <>.csv и перевод его в
список
    (setq nab_vs '())
    (setq put_slid (strcat puti project "/"))
    (setq f (open (strcat put_slid "Mesh_"
project ".csv") "r"))
; (setq f (open (strcat put_slid "V1v2_"
project ".csv") "r"))

```

```

; (setq f (open (strcat put_slid "V1v2_"
project "_3.csv") "r"))
    (while (setq zn (read-line f))
      (repeat 8 (setq zn (vl-string-subst " ." " ,"
zn)))
      (repeat 8 (setq zn (vl-string-subst " " " ";"
zn)))
      (setq zn3 (Str_list zn))
      (if (eq (type (car zn3)) 'LIST) (print zn3))
;
      (if (eq (type (car zn3)) 'LIST)
        (setq nab_vs (cons (list (car zn3)(cadr
zn3)(caddr zn3)(caddr zn3))nab_vs )) ; v
nab_vs
      )
      (close f)
      (princ)
    )
  (defun Str_list($str) (read (strcat "(" $str
")))); (Str_list "1 2 3 4 5")
; -----
  (defun c:dan( / zn koefV) ; Отрисовка
векторов скорости в узлах сетки Вывод
векторов в сетку
    (setvar "cmdecho" 0) (setvar "OSMODE"
0)
    (setq koefV 50) ; Коэффициент
визуализации скорости
    (setq zn (getreal "\n Значение koefV
<50>"))
    (if zn (setq koefV zn))
    (command "_ERASE" (ssget "_X" '((8 .
"V1V2"))) "")) ; Удаление бывших

    (command "_LAYER" "_M" "V1V2" "_C"
"1" "" "")) ; слой для скоростей
    (if (null nab_vs) (alert "Список nab_vs
ПУСТОЙ"))
    (foreach n nab_vs
      (setq p (car n) v1 (cadr n) v2 (caddr n))
      (vec p)
    )
    (princ)
  )
; -----
  (defun vec($p / p1 p2 pp dis h)
    (setq p1 (polar $p 0 (* koefV v1)) p2 (polar
$p (* pi 0.5) (* koefV v2))
      pp (list (car p1) (cadr p2)) dis
      (distance $p pp) h (* 0.1 dis))
    (command "_PLINE" pp "_W" 0 h (otp pp
$p (* dis 0.25)) "_w" 0 0 $p ""))

```

```

)
; -----
(defun c:mesh0( / zn en1 en2 en3 en4 vers)
; Нанесение сетки
; SURFTAB1, SURFTAB2 для _edgesurf
сетка (установить SURFTAB2 = 16)
(if (null(eq (ver) "Visual LISP 2000
(en)")); Определение версии ACAD
(setvar "meshtype" 0) ; Для 10 и
следующих ACADов(возможность
редактирования сетки)
)

(if (null $ST1) (setq $ST1 20 $ST2 12))
(setq Zn (getint (strcat "\n Введите
количество узлов по X<" (rtos $ST1)">:
")))
(if zn (setq $ST1 zn))

(setq Zn (getint (strcat "\n Введите
количество узлов по Y<" (rtos $ST2)">:
")))
(if zn (setq $ST2 zn))

(setvar "SURFTAB1" (- $ST1 1)) (setvar
"SURFTAB2" (- $ST2 1))
(command "_LAYER" "_M" "MESH"
"_C" "1" "" "" ) ; слой сетки
(setq en1 (car (entsel "\n Укажите 1
ребро: "))) (redraw en1 3)
(setq en2 (car (entsel "\n Укажите 2
ребро: "))) (redraw en2 3)
(setq en3 (car (entsel "\n Укажите 3
ребро: "))) (redraw en3 3)
(setq en4 (car (entsel "\n Укажите 4
ребро: "))) (redraw en4 3)
(command "_edgesurf" en1 en2 en3 en4)
(setq zn (getstring "\n Корректировать
сетку Y/N <Y>: "))
(if (or (eq zn "")(eq zn "y")(eq zn "Y")(eq
zn "y")(eq zn "Y")) (c:red_mesh))
(command "_LAYER" "_M" "MESH"
"_LO" "MESH" "" ) ; Закрыть слой
сетки
(command "_LAYER" "_M" "0" "" ) ;
Перейти в слой
(princ)
)
; -----
(defun c:red_mesh( / en poi ds nab_poi poi-
1) ; (red_mesh)
; Редактирование сеточной области

```

```

(setq $ST1 (+ (getvar "SURFTAB1") 1)
$ST2 (+ (getvar "SURFTAB2") 1))

(if (or(null $ST1)(null $ST2)) ; Если не
указано
(setq $ST1 (getint (strcat "\n Введите
количество узлов по X:")))
$ST2 (getint (strcat "\n Введите
количество узлов по Y:"))))

; Определение положения узлов сетки
по линиям 0Y, длина линии,
приращение по длине
(setq en (entnext) n 0 ds 0 poi-1 nil
nab_poi nil i 1) ; i - счетчик строк по X
(while en
(if (and (eq(cdr(assoc 0 (entget en)))
"VERTEX") (eq(cdr(assoc 8 (entget en)))
"MESH"))) ; (8 . "Mesh") СЛОЙ СЕТКИ
(progn
(setq poi (cdr (assoc 10 (entget en)))
n (+ n 1))
(if poi-1 (setq ds (+ ds (distance
poi poi-1))))
(setq poi-1 poi)
(setq nab_poi (cons poi nab_poi))
);(print poi)(print i) (print ds)|;

(if (and (= n $ST2) (/= i 1) (/= i
$ST1)) (koreg_poi (/ ds (- $ST2 1))
nab_poi)) ; Программа корректировки
(if (= n $ST2) (progn (setq n 0 ds 0
poi-1 nil nab_poi nil i (+ 1 i)) )) ;
Новый ряд
))
(setq en (entnext en))
)
)
; (command "_PLINE")(foreach pp nab_poi
(command pp))(command "")
; (command "_PLINE")(foreach pp nab_pw
(command pp))(command "")

; ----- (koreg_poi
9.85761 nab_poi) (setq $dL 5.89612 $n_poi
nab_poi)
(defun koreg_poi ($dL $n_poi / dds m ddis
p-1 p+1 p)

```



```

(setq m 1 p-1 (car $n_poi) mn 1 ; Номер
текущего узла от которого идет отсчет
(чтобы не возвр к использованным)
nab_pw (cons p-1 '()))
;(print $dL)
;(getint (strcat "\n I=" (itoa I)))
(print (strcat "Корректировка выполнена
для I=" (itoa I)))
; Определение нового положения узлов в
nab_pw
(while (< m (- $ST2 1))
(setq p (nth mn $n_poi))
(setq ddis (distance p-1 p))
(if (< ddis $dL) (setq mn (+ mn 1) p (nth
mn $n_poi) ddis (distance p-1 p)))) ;
Следующий узел если не достаточно
(if (< ddis $dL) (setq mn (+ mn 1) p (nth
mn $n_poi) ddis (distance p-1 p))) ; Еще
один узел если не достаточно

(if (< ddis $dL) (setq mn (+ mn 1) p (nth
mn $n_poi) ddis (distance p-1 p))) ; Еще
один узел если не достаточно

(if (>= ddis $dL) (setq pw (otp p-1 p $dL)
nab_pw (cons pw nab_pw)))

(setq p-1 pw)
(setq m (+ 1 m))
)
(setq nab_pw (reverse (cons (car (reverse
$n_poi)) nab_pw))); Последний и реверс

; Перемещение узлов сетки
(setq m 1)
(while (< m (- $ST2 1))
(mov_poi (nth m $n_poi)(nth m nab_pw))
(setq m (+ 1 m))
)
(redraw)
)
; -----
(defun mov_poi($pi $pk / enpoi poi eg) ;
(mov_poi pisk pkon)
; Перемещение узлов сетки
(setq enpoi (entnext))
(while enpoi
(if (and (eq(cdr(assoc 0 (entget enpoi)))
"VERTEX") (eq(cdr(assoc 8 (entget enpoi)))
"MESH")))
(progn

```

```

(setq poi (assoc 10 (entget enpoi)))
(if (equal poi (cons 10 $pi))
(progn
(setq eg (subst (cons 10 $pk) poi
(entget enpoi)))
(entmod eg) (entupd enpoi)
))
)
)
(setq enpoi (entnext enpoi))
)
)
; -----
(defun c:zam () (zacr_LY "MESH"
"V1V2"); Заморозить все слои кроме
"MESH" "V1V2"
(defun zacr_LY ($Lay1 $Lay2 / sloi
nam_sl)
; Заморозить все слои кроме "MESH"
"V1V2"
(command "_LAYER" "_T" $Lay1 ""))

(setq sloi (tblnext "LAYER" t))
(command "_LAYER" "_F" (cdr (assoc 2
sloi)))
(while (setq sloi (tblnext "LAYER"))
(setq nam_sl (cdr(assoc 2 sloi)))
(if (= (substr nam_sl 1 5) $Lay1) nil
(command "_F" (cdr(assoc 2 sloi))))
)
(command "")
(command "_LAYER" "_T" $Lay2 "")
(princ)
)
)
; -----
(defun c:razm (/ sloi) ;
; Разморозить все слои
(command "_LAYER" "_T" "0" ""))

(setq sloi (tblnext "LAYER" t))
(command "_LAYER" "_T" (cdr (assoc 2
sloi)))
(while (setq sloi (tblnext "LAYER"))
(command "_T" (cdr(assoc 2 sloi))))
(command "")
(princ)
)
)
; -----
; Определяется точка отстоящая от $p1 до
$p2 на расстоянии $rs
(defun otp ($p1 $p2 $rs)(polar $p1 (angle
$p1 $p2)$rs))

```

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інженерно-хімічний факультет
Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України
Академія наук вищої освіти України
Академія будівництва України

**ЗБІРНИК ДОПОВІДЕЙ
V Всеукраїнської
науково-практичної конференції**

**ЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ І
ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ
ВИРОБНИЦТВ ТА ПАКУВАЛЬНОЇ
ТЕХНІКИ**

Київ, 8–9 червня 2017 року

ЗМІСТ

Стор.

СЕКЦІЯ «ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ»

Щербина В. Ю., Чемерис А. О., Точинський В. О., Гопка О. Ю. Дослідження руху сипучих матеріалів в барабанних апаратах	5
Точинський В. О., Гопка О. Ю., Щербина В. Ю., Чемерис А. О. Дослідження руху сипкого матеріалу в барабанних апаратах. Плоска форма частинки	7
Гопка О.Ю., Точинський В.О., Щербина В.Ю., Чемерис А.О. Дослідження руху сипкого матеріалу в барабанних апаратах. Циліндрична форма частинки	11
Лобко С.С., Щербина В.Ю., Васильченко Г.М. Розробка пакету програм для конструювання енергоефективних теплообмінників	13
Гопка О.Ю., Щербина В.Ю. Розрахунок модернізованого ротора молоткової дробарки.	15
Панов Є.М., Шилович І.Л., Шилович Я.І., Зеленський О.І. Методика експериментального визначення кута змочування глазурованої керамічної поверхні	17
Панов Є.М., Шилович Т.Б., Шилович Я.І. Експериментальне дослідження складу газів, що утворюються при випалі вуглецевих заготовок в кільцевих печах	18
Колосова О.П. Аналіз деяких геометричних моделей капілярно-пористих тіл	21
Шаповал А.А., Стрельцова Ю.В., Руденок М.В., Мандрійчук О.М. Конвектори-підігрівачі газових середовищ з тепловими трубами-насадками	25
Демов В.Б., Сідоров Д.Е. Визначення зовнішнього діаметра шнека живильника.....	27
Меріков М.О., Сідоров Д.Е. Розрахунок граничної частоти обертання бігунів.....	28
Кошиль Є.В., Сідоров Д.Е. Розрахунок підсмоктування повітря для охолодження рукавного фільтра	29
Марчук К.В., Сідоров Д.Е. Розрахунок маси твердої фази, що відкладається на фільтрі з 1 м ³ фільтрату.....	30
Сідоров Д.В., Фурдига Є.В. Модернізація запобіжної муфти.....	31
Сімончук Є.П., Сідоров Д.Е. Визначення критичної швидкості обертання ротора молоткової дробарки	32
Сімончук Є.П., Казак І.О. Удосконалення конструкції колосникової ґратки в дробарці молоткової з метою підвищення її довговічності.....	33
Зарудна Т.С., Казак І.О. Удосконалення розвантажувальної решітки з метою підвищення надійності та ефективності роботи кульового млина	35
Смірнов Д.Є., Казак І.О. Підвищення частоти обертання ротора центрифуги з пульсуючим вивантаженням осаду шляхом удосконалення конструкції.....	37
Чайка А.Р., Казак І.О. Удосконалення системи розвантаження грохоту вібраційного ...	38
Рагімов М. В., Куземко В.Г., Швачко Д.Г. Модернізація підшипникового вузла привідного валу ящикового живильника.....	40

СЕКЦІЯ «ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС»

Колосов О.Є., Пащенко Є.О., Назаренко І.І. Основні методи модифікації рідких епоксидних композицій	41
Сівецький В.І., Колосов О.Є., Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Куриленко В.М. Удосконалена конструкція прес-форми, призначеної для виготовлення пластмасових виробів із закладними деталями.....	44
Сівецький В.І., Колосов О.Є., Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Куриленко В.М. Експериментальні дослідження процесу екструзійного виробництва інтелектуальних полімерних композитів.....	46
Сівецький В.І., Колосов О.Є., Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Куриленко В.М. Удосконалений спосіб виготовлення полімерних виробів з інтелектуальними	

СЕКЦІЯ
«ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ»

УДК 621.6.04

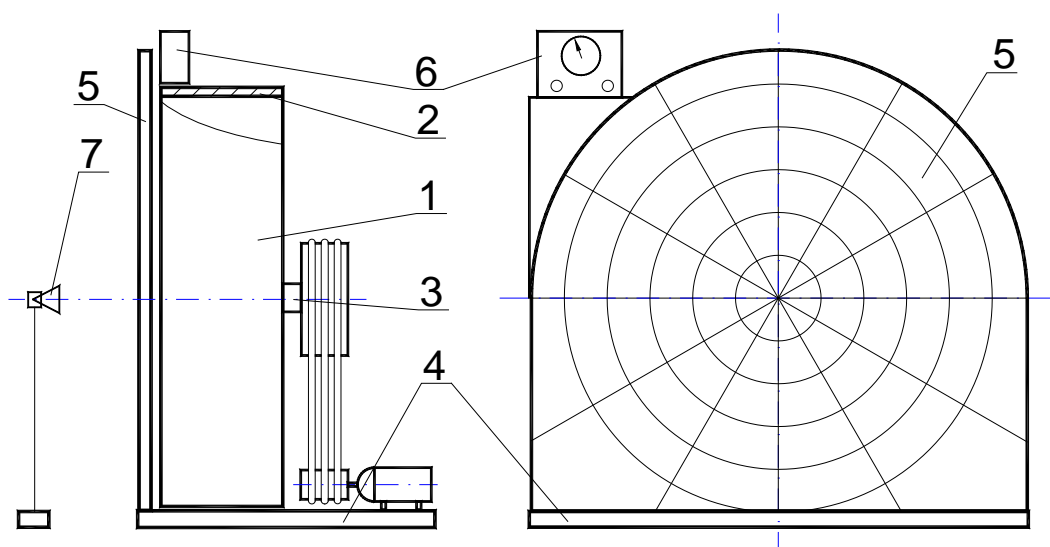
ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ В БАРАБАННИХ АПАРАТАХ

Щербина В. Ю., к.т.н., доц.; Чемерис А. О. ст. вик.; студ. Точинський В. О.; студ. Гопка О. Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м.Київ

Розроблені лабораторна установка та методика визначення швидкостей і траєкторій руху сипучих матеріалів в барабанних апаратах. Для обробки результатів досліджень використовуються розроблені програми, що дають можливість ефективного та оперативного опрацювання отриманого матеріалу. Використання лабораторної установки, методології дослідження і супутніх програм відкриває великі можливості для подальших досліджень руху сипучих матеріалів в барабанних апаратах.

В хімічній технології знайшли широке використання машини барабанного типу для переробки сипучих матеріалів. До них відносяться реактори, печі, сушарки, холодильники, змішувачі, гранулятори, грохоти та інші. Однак, незважаючи на різницю в технологічних процесах та конструкції, всі ці машини відносяться до одного класу. Загальними ознаками яких є однотипність об'єктів переробки — дрібнодисперсний сипучий матеріал із загальними закономірностями руху.

Незважаючи на широку різноманітність машин та апаратів, де він застосовується, фізико-механічні властивості сипучого матеріалу, що визначають його динамічну поведінку і структуроутворення, вивчені поки недостатньо, і немає єдиної думки, які з властивостей потрібно регламентувати і враховувати для опису його руху в барабанних апаратах [1, 2]. Відомі дослідження, спрямовані на вивчення характеру руху сипучого матеріалу [3 - 5], не дозволяють отримати точні дані про траєкторію руху та швидкість частинок. Тому вкрай актуальними є роботи з визначенням характеристик руху та дослідженням взаємозв'язку між параметрами сипучих матеріалів і їх поведінкою.



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

Рис. 1 – Схема експериментальної установки

На кафедрі ХПСМ НТУУ «КПІ» впроваджена лабораторна установка та розроблена методика визначення швидкостей і траєкторій руху сипучих матеріалів в барабанних апаратах. 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 $\phi 485 \times 175$ мм. В середині барабану обичайка має змінне внутрішнє покриття 2, заміна якого дозволяє моделювати різне зовнішнє тертя і пересипні полиці, між сипучим 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 за допомогою приводу забезпечує рух барабану із швидкістю від 0 до 100 обертів за хвилину на холостому ході, при завантаженні 5 кг до 50 об/хв. Сипучий 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 1920x1080 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)%.

Послідовність обробки та аналізу отриманих даних наступні:

1. Обробка фільму.

За допомогою мультимедійного програвача PotPlayer виконується кадрівання відзнятого фільму на окремі рисунки для визначення траєкторій руху та швидкостей частинок матеріалу. При цьому виконуються окремі рисунки з інтервалом часу 0.020 сек.

2. Визначення траєкторії та швидкості руху частинок.

За допомогою програм, написаних на функціональній мові AutoLISP в середовищі AutoCAD визначаються траєкторії та швидкості руху частинок. Траєкторія руху відслідковується за маркерами, тобто частинками, зафарбованими у інший колір. В середовищі AutoCAD створюються спеціальні шари, що відповідають часу кадру та відстані, яку проходить частинка за визначений проміжок часу. За напрямком руху та часом проходження визначається загальна швидкість V і складові V_x , V_y , які визначені в точках, де в даний момент знаходяться частинки.

Отримані дані у вигляді таблиці з координатами точки, складовими швидкості, відстанню та часом записуються в файл для подальшої обробки за допомогою редактора електронних таблиць MS Excel.

3. Побудова сіткової моделі.

Для обробки отриманих даних у програмі візуалізації ParaView та подальшого чисельного моделювання процесів руху та теплообміну, на ділянку, яку займає матеріал, наноситься сіткова модель. Побудова виконується за допомогою програм AutoLISP. Сіткова модель, із значеннями функцій у вузлових точках, використовується редактором ParaView для подальшої обробки. Крім того, за отриманим контуром ділянки матеріалу визначаються площа, периметр, центр мас, момент інерції, та інші дані, які необхідні для параметричних та кінематичних розрахунків.

4. Інтерполяція швидкостей до вузлів сіткової моделі.

Інтерполяція даних на вузли сіткової моделі виконується із застосуванням методики зважування із зворотною відстанню (The inverse-distance weighted procedure – IDW). Цей спосіб, заснований на використанні величин зворотних відстаней між вузлами інтерполяції, зведених в

деяку ступінь, є досить універсальним, легко реалізується на комп'ютері, а також має достатньо високу ступінь точності. Програмне забезпечення C++.

У рамках IDW методу, шукане значення функції для довільної точки визначається наступним чином:

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

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 $n = 2$).

5. Обробка отриманих значень у програмі ParaView.

За допомогою програми ParaView виконується подальший аналіз отриманих результатів. Для створення файлів у форматі ParaView використовується програмне забезпечення, яке виконане на мові C++. Вказаний програмний комплекс дає можливість: візуалізації розрахункових сіток, полів швидкостей, векторних полів, ліній току, побудови ізометричних поверхонь, векторних полів та алгебраїчних перетворень над заданими полями. Рішення рівнянь для визначення ліній току здійснюється методом Рунге – Кутта четвертого порядку точності.

Використання лабораторної установки, методології дослідження і супутніх програм обробки результатів дослідів відкриває великі можливості для подальших досліджень руху сипучих матеріалів в барабанних апаратах.

Література

1. Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
2. Селиванов Ю.Т. Исследование влияния осевого движения на процесс непрерывного смешивания сыпучего материала во вращающемся барабане /Ю.Т.Селиванов, В.Ф. Першин// Известия вузов. Химия и химическая технология. -2003. -Т. 46, вып. 7.- С. 42-45.
3. Yong Xu, Chunhui Xu, Zhe Zhou. 2D DEM simulation of particle mixing in rotating drum: A parametric study // Particuology. 2010. V.8. P. 141–149.
4. Xiao Yan Liua, Spechta E., Mellmann J. Experimental study of the lower and upper angles of repose of granular materials in rotating drums // Powder Technology. 2005. V. 154. P. 125–131.
5. Jian-Ping Pan, Ting-Jie Wang, Jun-Jie Yao, Yong Jin. Granule transport and mean residence time in horizontal drum with inclined flights // Powder Technology. 2006. V. 162. P. 50 — 58.

УДК 621.6.04

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В БАРАБАННИХ АПАРАТАХ. ПЛАСКА ФОРМА ЧАСТИНКИ

Точинський В. О., студ.; Гопка О. Ю., студ.; Щербина В. Ю., к.т.н., доц.; Чемерис А. О. ст. вик.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м.Київ

Виконано аналіз умов руху сипкого матеріалу в поперечному перерізі обертових барабанних апаратів. Досліджувався матеріал з плоскою формою частинок. Отримані траєкторія руху та швидкості переміщення.

В даній роботі досліджено рух дрібнодисперсного сипучого матеріалу з частинками пласкої форми в обертовому барабанному апараті. Вказана система широко використовується в різних галузях промисловості та є загальною для значного класу машин, що використовуються в технологічних і промислових процесах.

Однією з основних задач при проектуванні машин і апаратів безперервної дії є розрахунок розподілу сипучого матеріалу за об'ємом барабана і часом його перебування. Для її вирішення необхідно визначити траєкторію руху матеріалу та швидкість окремих частинок, що оброблюються в апараті. Відомі дослідження, спрямовані на вивчення характеру руху сипкого матеріалу [1, 2], не дозволяють отримати точні дані про траєкторію руху та швидкість частинок.

Сипучий матеріал, що розглядається в роботі, складається з дискретних частинок макроскопічного розміру, між якими діють неконсервативні контактні сили. Для дослідження руху плаского матеріалу використовувались половинки горохових зерен. Дослідження проводилось на лабораторній установці, яка показана на рис. 1, відповідно методики розглянутої в попередній роботі. Маса завантажувального матеріалу становить 4 кг, та займає площу 17.8% перетину барабану. Розміри частинок 4-6 мм. Кількість обертів барабану складає 12.6 об/хв. Об'ємна вага – 785 кг/м^3 . Коефіцієнт внутрішнього тертя 0,44 – 0,53. Коефіцієнт тертя по внутрішньому покритті барабану 0,26 – 0,35 [3].

Траєкторія руху частинок визначалась за маркерами, і представлена на рис. 2 у вигляді відповідних ліній току.



Рис. 1 – Лабораторна установка

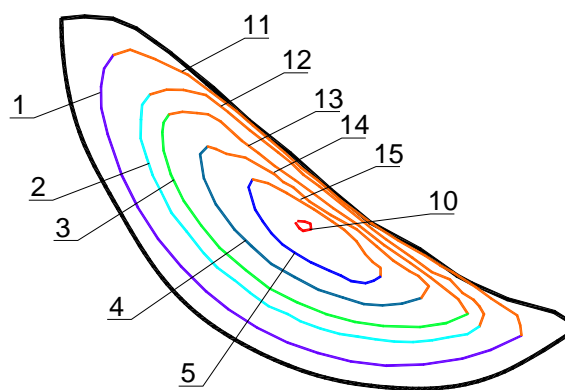


Рис. 2 – Траєкторія руху частинок

Як видно із рисунку, режим руху матеріалу в барабані каскадний, тобто відбувається циркуляційний рух, при якому матеріал утворює замкнутий циркуляційний контур (рис. 2), при цьому частина матеріалу рухається по відкритій поверхні викривленого сегмента, або ж перебуває в контакт з стінкою барабану.

При циркуляційному русі в поперечному перерізі барабана (рис. 2) весь матеріал можна розділити на дві зони – та, що рухається в напрямку обертання, а також та, що рухається у зворотному напрямку. В залежності від швидкості обертання та кількості матеріалу, існує точка або відрізок, де знаходиться циркуляційне ядро, навколо якого сипучий матеріал рухається по замкнутому контуру. В шарі, що рухається в напрямку обертання, частинки рухаються по концентричним траєкторіям, тому для наочності розглядаються швидкості руху окремо для вказаних шарів.

За визначеними напрямками та довжиною переміщення частинок, з урахуванням часу визначена швидкість руху частинок. На рис. 3 приведена швидкість частинок для шарів що рухаються в напрямку обертання барабану, на рис. 4 — в зворотному напрямку, або для шарів, що скочуються по відкритій поверхні, відповідно лініям току показаних на рис.2.

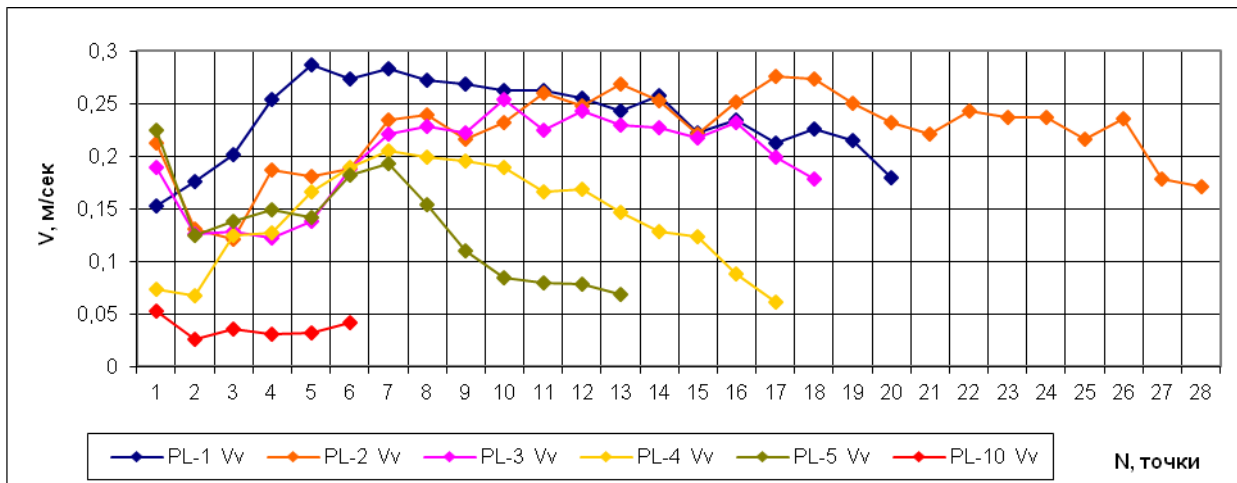


Рис.3 – Швидкість частинок в напрямку обертання барабану

З рисунків видно зміну швидкості в різних шарах матеріалу. Максимальна швидкість становить $V=0.28$ м/сек і знаходиться в зоні контакту з боковою стінкою. По мірі приближення до циркуляційного ядра середня швидкість зменшується, і становить $V=0.041$ м/сек.

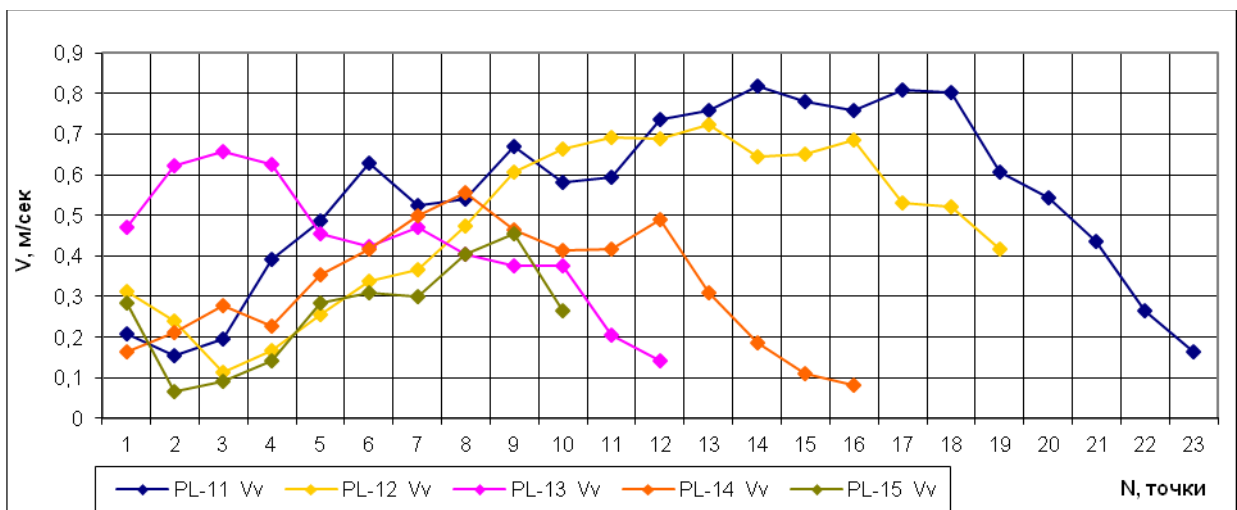


Рис.4 – Швидкість частинок в напрямку протилежному обертанню барабану

Швидкість матеріалу, що знаходиться вище циркуляційного ядра, збільшується по мірі віддалення, і максимальна швидкість на відкритій поверхні становить $V=0.82$ м/сек.

Зазвичай рух сипкого матеріалу є основою цілого ряду технологічних процесів. Наприклад, теплообмін в обертових теплообмінних апаратах, таких як печі, сушила, теплообмінники та інші, де необхідно враховувати рух твердої фази. Для подальших досліджень і можливості використання чисельного моделювання, необхідно на розрахункову область нанести сіткову модель, що являє собою сукупність вузлів і елементів. У даному випадку використана сіткова область розмірністю 27×15 скінчених елементів. Після інтерполяції складових швидкості до відповідних вузлів сітки отримуємо результати, які приведені на рис.5 – рис.8. Візуалізація виконана за допомогою програми ParaView.

Як видно з приведених рисунків, на сітковій моделі адекватно відображається рух матеріалу.

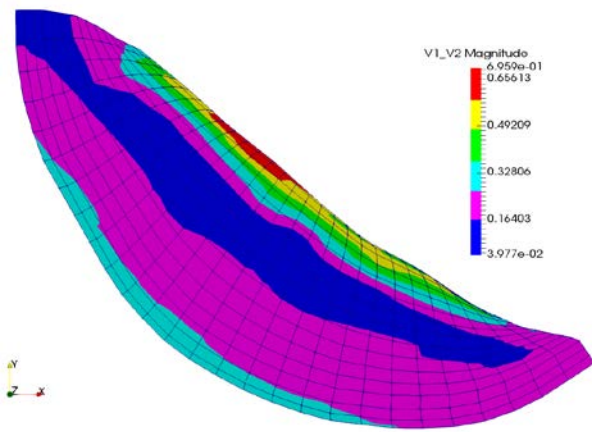


Рис. 5 – Загальна швидкість

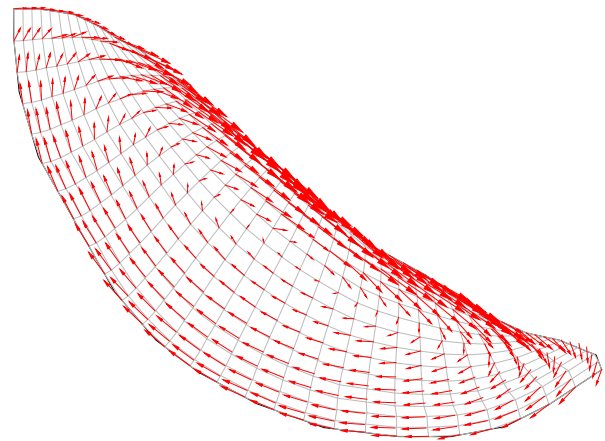


Рис. 6 – Вектора швидкості

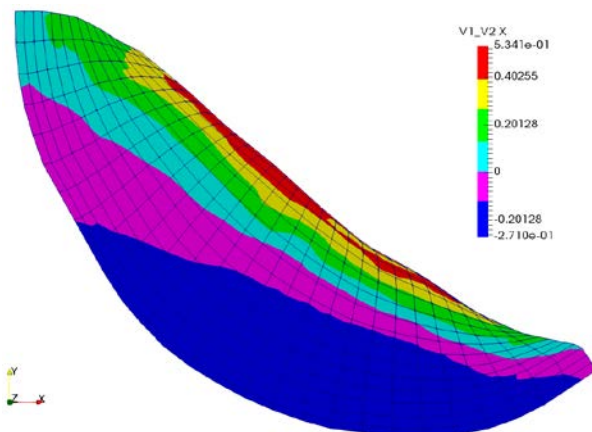


Рис. 7 – Складова швидкості V_X

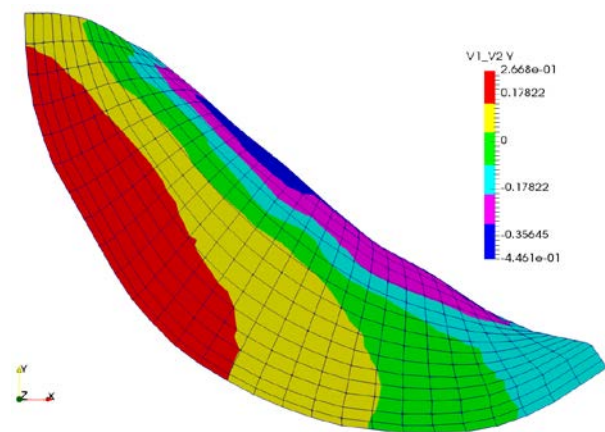


Рис. 8 – Складова швидкості V_Y

Аналіз процесу руху сипучого матеріалу в поперечному перерізі гладкого обертового барабана дозволяє зробити наступні висновки:

- в матеріалі утворюється циркуляційне ядро, навколо якого сипучий матеріал рухається по замкнутому контуру;
- при числі обертів 12.6 об/хв та заповненні 17.8% перетину барабану, максимальна швидкість частинок на відкритій поверхні викривленого сегмента становить $V=0.82$ м/сек;
- в шарі, що рухається в напрямку обертання барабану, частинки рухаються по концентричних траєкторіях з швидкостями, які залежні від кутової швидкості обертання барабана та внутрішнього тертя між частинками.

В подальшому планується дослідити рух сипкого матеріалу при зміні заповнення та швидкості обертання барабану, що дозволить визначити закономірності руху в залежності від вказаних факторів.

Література

1. Селиванов Ю.Т. Исследование влияния осевого движения на процесс непрерывного смешивания сыпучего материала во вращающемся барабане /Ю.Т.Селиванов, В.Ф. Першин// Известия вузов. Химия и химическая технология. -2003. -Т. 46, вып. 7.- С. 42-45.
2. Jian-Ping Pan, Ting-Jie Wang, Jun-Jie Yao, Yong Jin. Granule transport and mean residence time in horizontal drum with inclined flights // Powder Technology. 2006. V. 162. P. 50 — 58.
3. Подъемно-транспортные машины./М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, А. В. Карп и др.; под ред. М. Н. Ерохинаи С. П. Казанцева. – М.: КолосС, 2010. – 335 с.:

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В БАРАБАННИХ АПАРАТАХ. ЦИЛІНДРИЧНА ФОРМА ЧАСТИНКИ

Гопка О.Ю., студент, Точинський В.О., студент, Щербина В.Ю. к.т.н., доц. Чемерис А.О.
ст..викл. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», м. Черкаси, м. Київ.

Виконано аналіз умов руху сипкого матеріалу з циліндричною формою частинок в поперечному перерізі обертових барабанних апаратів. Отримані дані для дослідження водоспадного режиму руху. Проаналізовані траєкторія руху та швидкості переміщення.

Машини барабанного типу широко застосовуються в промисловості для переробки дрібнодисперсних сипких матеріалів з специфічними властивостями, які часто ускладнюють протікання хімічних реакцій і процесів масо- і теплообміну. До них відносяться реактори, печі, сушили, холодильники, змішувачі, грохоти, гранулятори та інші. В даній роботі досліджено рух сипучого матеріалу з частинками циліндричної форми в обертовому барабанному апараті. Вказана система є загальною для значного класу машин і широко використовується в різних галузях промисловості.

Розрахунок розподілу сипучого матеріалу по об'єму барабана є основною задачею при проектуванні машин і апаратів безперервної дії. Для вирішення даного питання необхідно визначити швидкість руху матеріалу в різних частинах барабану і їх траєкторію руху в барабанному апараті.

Сипкий матеріал який використовується в досліді складається з однорідних частинок циліндричної форми. Для дослідження траєкторії руху і визначення швидкостей руху частинок використовували гранули полімеру. Дослідження проводились на лабораторній установці, яка зображена на рис.1. Маса завантаженого матеріалу становить 2,3 кг. Розмір частинок матеріалу 3-4 мм. Частота обертання барабану становить 85 об/хв.

Траєкторія руху частинок в барабані визначалась за допомогою маркерів і показана на рис.2 у вигляді ліній току.



Рис.1. Лабораторна установка

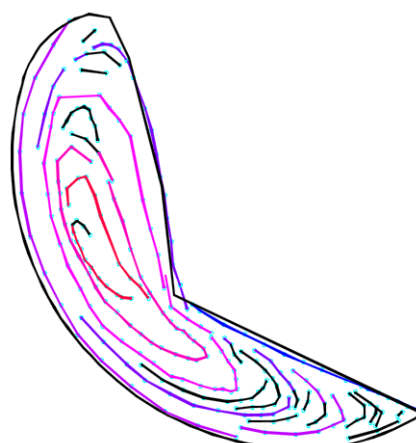


Рис.2. Траєкторія руху частинок

З зображення видно що режим руху матеріалу водоспадний, тобто переважна кількість матеріалу відривається від стінок барабану а не перекочується як при каскадному русі.

Щоб забезпечити можливість використовувати метод чисельного моделювання, і виконання подальших досліджень необхідно нанести сіткову модель на розрахункову область, яка являє собою сукупність вузлів і елементів. Сіткова область яка використана в даному випадку має розмірність 20x8 скінченних елементів. Після інтерполяції складових швидкості до відповідних вузлів сітки отримаємо результати приведені на рис.3–рис.6. За допомогою програми ParaView була виконана візуалізація.

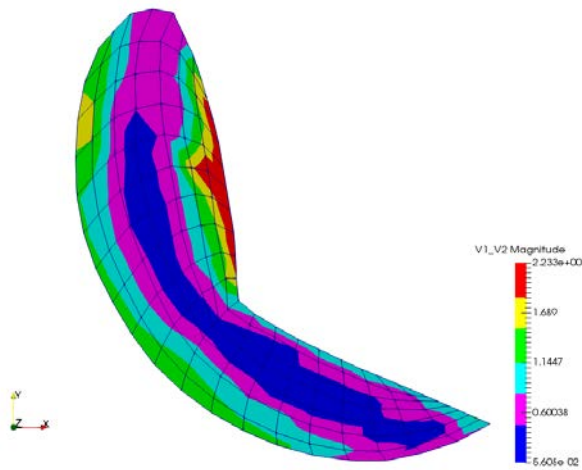


Рис.3. Загальна швидкість

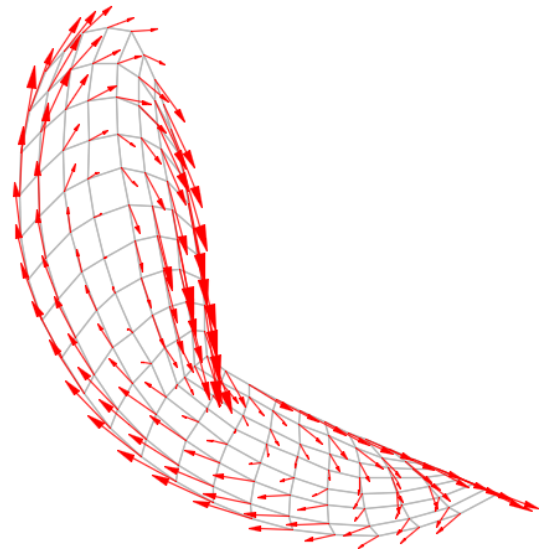


Рис.4. Вектора швидкості

З рисунків видно, що в процесі руху виникає 2 циркуляційних контури, один з яких знаходиться в шарі каскадного режиму руху, інший у шарі водоспадного режиму (рис. 4). Максимальна загальна швидкість становить $V=2.2$ м/сек і знаходиться в зоні водоспадного режиму руху матеріалу (рис. 3, рис.4).

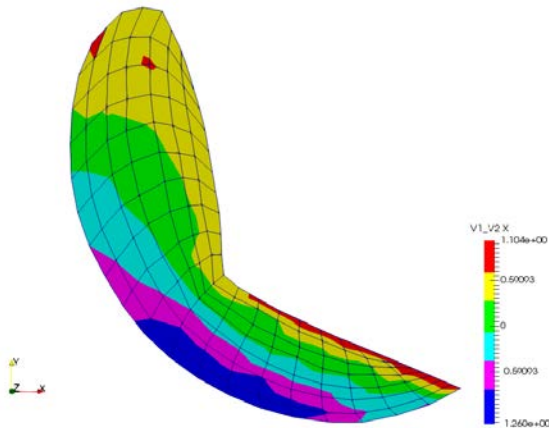


Рис.5. Складова швидкості V_x

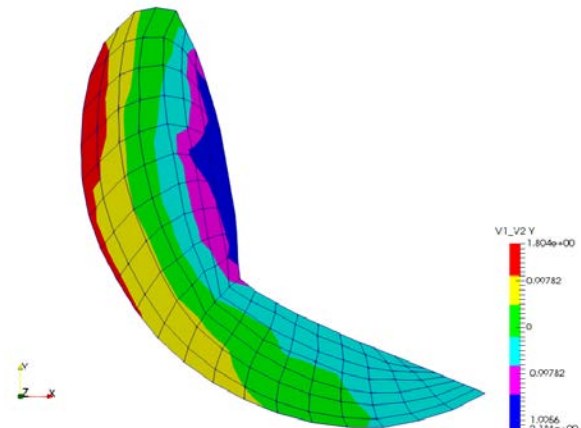


Рис.6. Складова швидкості V_y

З отриманих даних видно, що максимальна складова швидкості по осі 0–X становить $V_x=1.1$ м/сек і знаходиться на відкритій поверхні сегменту матеріалу в каскадному режимі (рис. 5). Максимальна складова по 0–Y становить $V_y =1.8$ м/сек та знаходиться в зоні контакту матеріалу з поверхнею барабану (рис. 6).

В результаті досліджень руху сипкого матеріалу в барабанних апаратах можна зробити наступні висновки:

- при частоті обертання 85 об/хв в барабані установлюється водоспадний режим;
- максимальна загальна швидкість становить $V=2.2$ м/сек;
- в шарі матеріалу що рухається в напрямку обертання барабану частинки рухаються по концентричних траєкторіях, їх швидкість залежить від частоти обертання барабану та внутрішнього тертя між частинками.

Метою подальших досліджень є визначення залежності руху сипкого матеріалу від частоти обертання та наповненості барабану.

Література

1. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.:
2. Селиванов Ю.Т. Исследование влияния осевого движения на процесс непрерывного смешивания сыпучего материала во вращающемся барабане /Ю.Т.Селиванов, В.Ф. Першин// Известия вузов. Химия и химическая технология. -2003. -Т. 46, вып. 7.- С. 42-45.