

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та  
аспірантської підготовки  
Кафедра загальної та  
теоретичної фізики

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: **«ГІДРОДИНАМІЧНІ МЕТОДИ ОЧИСТКИ  
МІКРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ»**

Виконав студент 6 курсу групи МТЗ-64  
спеціальності 183

«Технології захисту навколишнього  
середовища»

Поляков Олексій Павлович

Керівник к. ф.-м.н. доцент

Андріанова Ірина Сергіївна

Консультант \_\_\_\_\_

Рецензент д. ф.-м. н. проф. Калінчак В.В.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Магістерської та аспірантської підготовки  
Кафедра загальної та теоретичної фізики  
Рівень вищої освіти магістр  
Спеціальність 8.04010605 радіоекологія

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри загальної**  
**та теоретичної фізики Герасимов О.І.**

“ 1 ” 11 2018 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Поляков Олексій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Гідродинамічні методи очистки макромеханічних систем

керівник роботи к.ф. – м.н., доцент Андріанова Ірина Сергіївна  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “14 вересня”2018 року  
№270С

2. Строк подання студентом роботи 01.02.2017р.

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). 1. Здобуття теоретичних знань про гранульовані матеріали (огляд літератури); 2. Реконструкція та удосконалення вібростенду з

під'єднанням контейнеру для розміщення частинок. 3. Калібрування вібростенду. 4. Виготовлення декількох видів частинок з різними параметрами, в тому числі спеціальних частинок зі зміщеним центром мас для подальшого вивчення їх поведінки на вібростенді. 5. Проведення експериментів зі зробленими частинками з метою вивчення їх поведінки при впливі на них вібрації з заданими параметрами. 6. Сегрегування частинок різних видів. 7. Аналіз отриманих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Дата видачі завдання 01.11. 2017

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бально ю шкало ю
1	<i>Огляд новітніх літературних джерел за темою дипломного проекту</i>	з 1 листопада 2017р.		
2	<i>Збір та попередня обробка вихідної інформації, складання бази даних до дослідження</i>	листопад 2017р.		
3	<i>Узагальнення основних теоретичних положень проекту</i>	листопад 2017р.		
4	<i>Атестація</i>	грудень 2017р		
5	<i>Вдосконалення та калібрування вібростенду. Робота з експериментами</i>	грудень 2017р.		
6	<i>Підведення підсумків та підготовка рукопису до друку</i>	грудень 2017р.		
7	<i>Оформлення магістерської роботи</i>	січень 2018р.		
8	<i>Складання висновків</i>	січень 2018р.		
9	<i>Підведення підсумків та підготовка рукопису до друку</i>	20 січень 2018р.		
10	<i>Оформлення дипломного проекту</i>	31 січень 2018р.		

11	<i>Підготовка комп'ютерної презентації</i>	лютий 2018р.		
12	<i>Інтегральна оцінка етапів календарного плану (як середня по етапам)</i>	лютий 2018р.		
	<i>Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)</i>			

**Студент** \_\_\_\_\_

( підпис )

(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_ д.ф.-м.н. проф. Герасимов О.І.

( підпис )

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Науковий керівник:

ОДЕКУ, доцент кафедри загальної та теоретичної фізики

Андріанова І.С.

**Актуальність теми.** Гранульовані матеріали – природні та штучного походження, з поведінкою, нетиповою для звичайних агрегатних станів, дедалі знаходять все більш широке застосування в різноманітних галузях виробництва та технологіях захисту навколишнього середовища. В той же час, специфічні властивості гранульованих матеріалів ускладнюють теоретичний опис цих систем і роблять необхідним глибоке та всебічне експериментальне вивчення їх особливостей.

**Мета** кваліфікаційної магістерської роботи – вивчення поведінки гранульованих матеріалів під впливом вібраційних сил. Зокрема, дослідження умов та особливостей сегрегації неоднорідних за складом гранульованих систем в експерименті.

**Об’єкт дослідження.** Мікромеханічна система у вигляді гранульованого матеріалу, розташованого у контейнері на вібростенді.

**Предмет дослідження.** Поведінка частинок невеликого розміру на вібростенді при різних показниках прискорення частинок.

### **Задачі дослідження:**

- здобуття теоретичних знань про гранульовані матеріали ( огляд літератури);
- реконструкція та удосконалення вібростенду з під’єднанням контейнеру для розміщення частинок;
- калібрування вібростенду;

- виготовлення декількох видів частинок з різними параметрами, в тому числі спеціальних частинок зі зміщеним центром мас для подальшого вивчення їх поведінки на вібростенді.
- проведення експериментів зі зробленими частинками з метою вивчення їх поведінки при впливі на них вібрації з заданими параметрами;
- сегрегування частинок різних видів;
- аналіз отриманих результатів.

Робота містить:

Сторінок 47

Рисунків 13

Літературних посилань 26

Додатків 6

**Ключові слова:** гранульовані матеріали, вібростенд, частота, напруга, гамма, сегрегація.

## SUMMARY

Supervisor:

Odessa State Environmental University,

Docent Andrianova I. S.

**Actuality of theme.** Granular materials - natural and artificial, with behavior, non-typical for ordinary aggregate states, are increasingly becoming widespread in a variety of industries and technologies of environmental protection. At the same time, the specific properties of granular materials complicate the theoretical description of these systems and make it necessary to have a deep and comprehensive experimental study of their features.

**The purpose** of the master's thesis is to study the behavior of granular materials under the influence of vibrational forces. In particular, the study of conditions and features of segregation of non-homogeneous composition of granulated systems in an experiment.

**Object of study.** Micromechanical system in the form of granular material located in a container on a vibration stand.

**Subject of study.** The behavior of small particles on the vibration stand at different rates of particle acceleration.

**Research objectives:**

- obtaining theoretical knowledge about granular materials (review of literature);
- reconstruction and improvement of the vibration space with the connection of the container for the placement of particles;
- calibration of the vibration stand;



- manufacture of several types of particles with different parameters, including special particles with a displaced center of mass for further study of their behavior on the vibrostende.
- conducting experiments with the particles made in order to study their behavior when exposed to vibration with given parameters;
- segregation of particles of different types;
- analysis of the results.

The work contains:

Pages 47

Figures 13

Literature references 26

Apps 6

**Key words:** granular materials, vibrostand, frequency, voltage, gamma, segregation.

## ЗМІСТ

Вступ.....	10
1. Визначення гранульованих матеріалів, їх розмірності та властивості. Поняття сегрегації.....	13
2. Калібрування вібростенду.....	23
3. Експериментальна частина.....	27
Висновки.....	31
Перелік посилань.....	32
Додаток А.....	34
Додаток Б.....	39
Додаток В.....	42
Додаток Г.....	45
Додаток Д.....	48

## ВСТУП

Завдання поставлене перед мною – вивчення властивостей, та поведінку гранульованих матеріалів при впливі на них вібраційних сил, також можна назвати одним з видів сегрегації. Чому саме гранульовані матеріали?

Гранульовані матеріали дуже специфічні за своїми властивостями, тим, що саме входить у це широке визначення, та тим, що вони можуть використовуватися в багатьох галузях. Багато промислових підприємств використовують гранульовані матеріали, які мають дуже великий діапазон форм, розмірів, механічних та хімічних властивостей. Тому важливо знати, як саме буде вести себе цей матеріал, які існують засоби фільтрації, які не можна використовувати для інших груп матеріалів, але вони можуть бути дуже вигідні з економічної точки зору. Окрім підприємств особливості поведінки гранульованих матеріалів можна використовувати у побуті. Один із прикладів – банальна фільтрація відходів.

Перелік тем, на яких сфокусовані зусилля теоретиків і експериментаторів в цій області вражає як широтою охоплення, так і концептуальною глибиною опрацювання її положень. Якщо до цього додати без перебільшення екстраординарний характер чи не більшості основних властивостей, які проявляють гранульовані матеріали, а також можливість їх дослідження за допомогою спостережень практично неозброєним оком, унікальний характер цієї галузі фізики стає очевидним. Глобальний масштаб, в якому представлені гранульовані матеріали в навколишньому середовищі перетворює задачу розуміння законів їх поведінки в затребувану, вже з точки зору забезпечення самої безпеки життєдіяльності людства. На даний час,

питання, зв'язані з гранульованими матеріалами, є дуже актуальними, бо потребують більш досконалого, ніж попереднє, вивчення.

Як вже говорилося, дослідження структури і фізичних властивостей гранульованих матеріалів (ГМ) становлять досить значну частину зусиль фізиків, як теоретиків, так і експериментаторів [1-4]. Серед причин, що призвели до такої концентрації зусиль зазвичай вказується прояв ГМ незвичайних для типових агрегатних станів речовини властивостей. І дійсно, наприклад, такі явища як, скажімо, флюїдизація сухих гранульованих матеріалів під дією зовнішніх полів (осипання похилих насипів), насичення тиску в вертикальній ємності, що містить гранульований матеріал (ефект "арки"), сегрегація (поділ сухих сумішей, наприклад, ефект "Бразильського горіха") і деякі інші виявляються тільки в ГМ.

Інтерес до вивчення ГМ також обумовлений важливістю розуміння їх фізичних властивостей для раціоналізації промислового виробництва і можливістю створення на їх основі принципово нових наукоємних технологій. ГМ широко представлені в навколишньому середовищі і використовуються у виробництві (пудра, пісок, цемент, графіт, вугілля, зерно, сипучі порошки та суміші в харчовій, будівельній та хімічній промисловості, металургії, ґрунт і навіть Всесвіт - ось далеко неповний список такого роду застосувань). За деякими оцінками, більше 60% всього світового промислового виробництва повністю засноване або частково використовує ГМ різної дисперсності: від мікро-пудр з розмірами гранул порядку декількох мікрон до геологічних структур з розмірами окремих кам'яних монолітів в кілька метрів і більше. Нарешті Всесвіт, з деякими застереженнями, також може бути віднесений до одного з прикладів розріджених гранульованих систем (гранульований газ). Багато унікальних властивостей гранульованої матерії спостерігалось досить давно. У зв'язку з цим, досить згадати

спостереження Фарадеєм нелінійних хвиль на поверхні піщаного шару, розміщеного в полі віброприскорень, здійснене ним близько 160 років тому[5-6].

## 1. ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЇХ РОЗМІРНОСТІ ТА ВЛАСТИВОСТІ. ПОННЯТТЯ СЕГРИГАЦІЇ

Гранули - комбіновані сухі сипучі речовини і суміші або окремі тверді дозовані і недозовані субстрати, спресовані у вигляді крупинок кулястої, неправильно кубічної або циліндричної форми[7]. Ці матеріали вже давно використовуються людиною в побуті, в промисловості, в технології. Прикладом може служити звичайний пісок з його різноманітним застосуванням. І що вражає, незважаючи на величезне прикладне значення властивості гранульованих матеріалів до недавнього часу практично не вивчалися. Років 10-15 тому фізики усвідомили, що звичайний пісок є абсолютно вражаючим матеріалом. При відповідних умовах він може вести себе і як тверде тіло, і як рідина, і як газ. Причому кожна "фаза" має унікальні властивості, що відрізняють гранульовані матеріали від всіх інших речовин.

Фізика гранульованих матеріалів стосується в основному макроскопічних об'єктів. Термін «макроскопічний» означає те, що об'єкти, з яких складається такий матеріал, повинні бути видимі оком. Властивості гранульованих матеріалів в першу чергу залежить від характеру взаємодії між самими частинками, та також між частинками та навколишнім середовищем. Як вже відмічалось, гранульований матеріал складається з дискретних твердих тіл, які в багатьох випадках знаходяться в контакті. Параметр, відомий як вміст твердої речовини в гранульованому середовищі, визначається як відношення об'ємної щільності фактичного гранульованого компонента до істинної внутрішньої щільності твердого компоненту. Порошок представляє собою гранульоване середовище, до якого входять частинки менші за 100 мкм в діаметрі. Гранульовану тверду речовину виготовляють з гранул в діапазоні від 100 до 3000 мкм. А

розбита тверда речовина представляє собою гранульований матеріал, в котрому більша кількість частинок більша за 3мм.

Матеріали, з якими ми стикаємося в нашому повсякденному житті, ми зазвичай класифікуємо з точки зору їх агрегатного стану як газу, рідини або тверді тіла. А до якого з перерахованих станів конденсованої матерії можна віднести гранульовану середу? Адже вона може «текти» з похилій площині як лавина або приймати форму посудини, куди ми її поміщаємо (насіпаємо) подібно рідині. кожна, окремо взята гранула, скажімо пісок, безумовно - тверде тіло, однак конгломерація гранул вже показує властивості абсолютно нетипові для звичайних агрегатних станів (і для твердих тіл зокрема).

Незвичайні властивості сипучих матеріалів як твердих тіл проявляються вже в стані спокою. Якщо на достатньо товстий шар матеріалу (піску на пляжі) покласти груз, то він, звичайно, викликає напругу та додатковий тиск у потік піщинок. Однак, як показали експерименти, величина цих напруг дуже швидко зменшується з глибиною. Крім того, експериментатори чітко бачили, що області найбільших напруг мають гіллясту структуру. Другими словами, вага вантажу утримується не всією площиною, а рідкими вузькими "стовбури" напруг.

Інша подібна поява була відзначена ще 100 років тому Янссеном: тиск стовпа піску в високій вертикальній трубі спочатку починає рости з глибини, а починаючи з деякого значення, перестає від неї залежати - весь зайвий тиск передається на стінки посудини. Насправді, саме завдяки такому явищу швидкість ходу пісочних годинників практично не залежить від того, скільки ще піску залишилося.

Гранульовані речовини ведуть себе при певних умовах і як рідина. Всім відомо, що якщо кут нахилу піщаної насипи стане досить крутим -

утворюється лавина, пісок починає стікати. Те, що швидкість потоку залежить від кута нахилу - не дивно, це справедливо і для рідини. Однак, було великим здивуванням виявити, що тече всього лише тонкий шар піску, товщиною 3-4 діаметра піщинки. На більших глибинах ніякі рухи не відбувається взагалі.

Якщо посудини з піском почати не сильно трясти, то тим самим можна заставити піщинки рухатися, стикатися. Рух всього піску починає походити при цьому на рух рідини. Такі експерименти проводили ще Фарадей в 1831 році. Їм були відзначені незвичайні локальні утворення, іноді досить стійкі, які з'являються на поверхні гранульованих матеріалів. Ці утворення були вивчені лише в останні роки.

Виявлені локалізовані коливання - осцилони - одиничні скупчення товщиною в 10-30 діаметрів піщинок. Будучи незвичайно стабільними, вони не тільки не вскользяють, і не руйнуються, а можуть навіть мігрувати вздовж поверхні, взаємодіючи з другом, утворюючи певного роду, пов'язані стани і навіть кристали!

Крім таких поверхневих явищ, багато цікавого спостерігається і в самому об'ємі гранульованого матеріалу, а саме - конвекція. В циліндричному посуді вона відбувається повністю певним чином: в центрі судини йде потік вгору, а по краях, вздовж стінки, в тонкому шарі - вниз. Цікаво, що при такій конвекції вже не важлива маса часток у суміші різноманітних гранульованих матеріалів, важливий тільки розмір часток. Саме завдяки цьому частинки більшого розміру вибухають на поверхню і більше не опускаються: вони просто не можуть рухатися за тонким конвективним потоком вздовж стінки. Цей ефект також відомий як ефект «бразильського горіха» (про це більш детально написано нижче). Потрібно відзначити, що характер конвективного руху сильно залежить від



форм посудини - в кінчному сосуді, наприклад, конвективний рух буде як раз протилежним.

Друге незвичайне явище в суміші різнорідних гранульованих матеріалів - це саморозщеплення фракцій (сегрегація) при наявності температурного градієнта в системі. Виявилось, що більш крупні частинки прагнуть збиратися в самих холодних районах, максимально далеких від джерела тепла. Якщо ж помістити в такі умови суміш однакових за розміром, але різних за масою часток, то залежно від конкретного положення джерела тепла дві фракції або повністю розділяються, або однорідно змішуються. І те, і інше - дуже важливі процеси в промисловості. Безумовно, в найближчий час те, що зараз є переднім краєм науки, буде використовувати в промисловості.

В останній час виявилось багато спільного між поведінкою вібраційної маси гранульованої речовини та суспензій - під впливом дрібних твердих частинок у рідині. Хоча на рівні окремих часток ці дві системи ведуть себе абсолютно по-різному, їх поведінка в цілому виявилася схожою. Зокрема, спостерігались такі ж осцилони з дуже схожою поведінкою. Можливо, це говорить про те, що нелінійна динаміка, тобто характер математичних законів, керуючих рухом обох систем, однаковий.

Природа висипання піску, як і витікання рідини, має багато загального, але є й свої особливості. Швидкість витікання рідини і піску (сипучої речовини) через отвір в дні посудини визначається величиною тиску на дно посудини. Тиск рідини на дно посудини зростає пропорційно висоті її рівня, причому ніякими факторами, крім висоти стовпа рідини, це зростання не обмежене. Така закономірність призводить залежність швидкості витікання з отвору від висоти  $v = \sqrt{2gh}$ , де  $h$  - висота рівня рідини над отвором. Тиск же піску на дно циліндричної посудини зі

збільшенням висоти шару піску спочатку зростає, але потім на висоті радіуса циліндричної труби практично виходить на стаціонарне значення, тобто досягнувши деякого значення, далі залишається незмінним.

Дуже актуальним є питання руху сипучого матеріалу в різних середовищах. У процесі руху частинки сипкого матеріалу можуть знаходитись в різних станах. У зв'язку з цим при аналізі руху сипучого матеріалу виділяють три режими: зв'язний, перехідний і незв'язний .

Зв'язний стан характеризується наявністю стійких зв'язків між частинками сипучого середовища. Для опису зв'язного стану використовують моделі механіки ґрунтів. Багато авторів для опису поведінки сипучих матеріалів використовують гідромеханічну модель, в якій зернисте середовище розглядається з позиції механіки суцільного середовища.

Незв'язний стан характеризується короткочасними контактами частинок, швидким порушенням зв'язку між ними, наявністю інтенсивного переміщення відносно один одного.

Зв'язно-текучий стан є проміжним між пружно-пластичним (зв'язним) і рідино-текучим.

Російські вчені вивчали зв'язний режим стікання сипучих матеріалів з отвору. У цьому випадку існують області, де частки мають гідравлічний характер руху. Ними було теоретично показано і експериментально підтверджено, що на відміну від рідини швидкість витікання сипучих матеріалів не залежить від висоти стовпа, а залишається постійною величиною. Відхилення від такої закономірності починає проявлятися тільки на висоті кількох радіусів отвору. Також вони провели такий самий експеримент, але з додаванням ваги на поверхню розділу двох середовищ ,

і було виявлено, що це також ніяк не вплило на швидкість витікання речовини, вона так і залишилася стаціонарною.

Нарешті, при відсутності сили тяжіння (що можна досягти, наприклад, вивченням двовірних горизонтальних зразків на гладкій поверхні), гранульовані матеріали ведуть себе подібно газу. Однак, на відміну від атомних зіткнень, зіткнення піщинок є непружним, тому без зовнішнього джерела енергії рух такого газу припиняється. Це призводить до ще одного несподіваного явища - так званого "непружного колапсу". У такому "піщаному газі" відбувається приблизно наступне: якщо при кожному зіткненні втрачається мала доля енергії, то весь газ остигає практично рівномірно і залишається майже однорідним. Якщо ж зіткнення становляться сильно непружними - то утворюються "кластери", області абсолютно застиглих частинок, які не рухаються відносно одна одної. Цікаво, що ці кластери виглядають як тонкі довгі нитки, вздовж яких збираються всі піщинки після великої кількості зіткнень. Не виключено, що ця поведінка має зв'язок з великомасштабною структурою нашого Всесвіту (астрономічні дані говорять про те, що основна частка накопичених галактик у спостереженій частині Всесвіту концентрується як би на поверхні величезних "пузирів", а не розсіяна в просторі рівномірно). Нарешті, при великій концентрації піщинок ці кластери можуть утворювати упорядковані структури, подібні до кристала. Так що тут спостерігається щось подібне до самого справжнього фазового переходу.

Розглянемо більш детально поведінку гранульованої матерії під дією вібрації. Є контейнер з піском, який дрібно тремтить, трясеться. Енергія цього руху передається і окремим піщинкам. В результаті при досить сильному тремтінні настає фазовий перехід: вся маса гранульованого матеріалу приходить в рух, починає текти, поводить як якась "гранульована рідина".

Чим же вона відрізняється від звичайної рідини? Відмінність одна, але важлива: взаємодії піщинок дуже несхожі на взаємодію молекул. А саме:

- 1) між піщинками немає сил тяжіння (притягання),
- 2) зіткнення піщинок є непружним,
- 3) між піщинками існує тертя.

Виявляється, це кардинально змінює справу і призводить до виникнення двох пов'язаних один з одним явищ: нестійкості щодо кластеризації і спонтанного народження вихорів.

Перше явище означає, що в системі виникають неоднорідності щільності, які не зникають, а навпаки - посилюються, що призводить до розпаду рідини на окремі кластери. Причина досить проста: якщо в якійсь області збільшилася концентрація частинок, то це призводить до збільшення числа зіткнень, що в силу їх непружності призводить до падіння швидкості частинок щодо оточення. Це означає, що в цьому районі порушиться баланс потоків: частинки, які влітають в цей обсяг, буде більше, ніж тих, які вилітають. А це призводить до подальшого збільшення локальної щільності: неоднорідність зростає. На рисунку 1.1[21] показано кілька послідовних стадій еволюції вільно "остигаючого" гранульованого матеріалу. Ясно видно виникнення кластерів і їх розвиток.

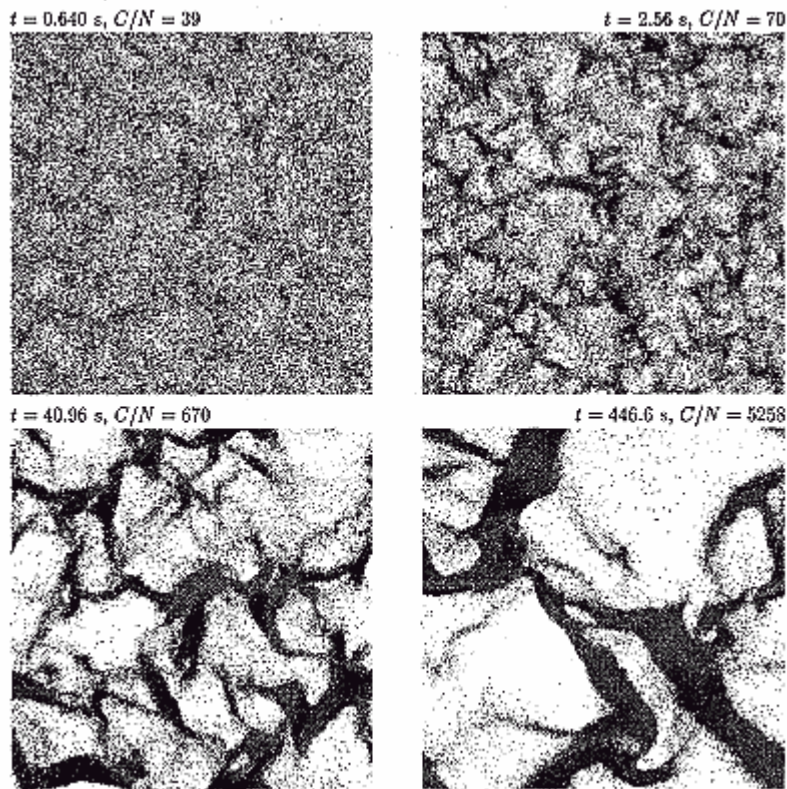


Рисунок 1.1 – Послідовні етапи кластеризації в гранульованих матеріалах

Зокрема, якщо на систему не діє сила тяжіння, то в разі непружних зіткнень виникає так званий "непружний колапс", коли за кінцевий час відбувається нескінченне число зіткнень, і рух частинок абсолютно завмирає.

Якщо ж рідина знаходиться в полі тяжіння, то області з підвищеною щільністю будуть важчі за навколишню рідину. В результаті виникне гідродинамічна нестійкість, почнеться конвекція, спонтанно з'являться вихори. ( Це і є друге вказане явище.) На рисунку 1.2 показані типові конвекційні режими в гранульованих матеріалах.

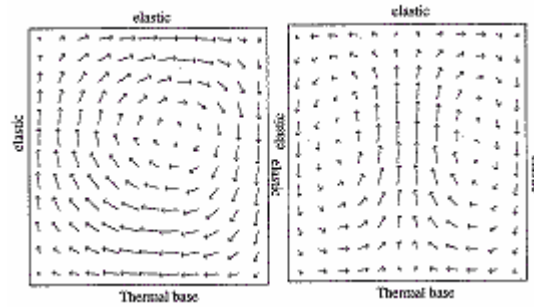


Рисунок 1.2 – Конвекція в гранульованих матеріалах

До одного з видів конвекції відносять ефект «бразильського горіха». Суть його в тому, що при струшуванні контейнера з різнорідними горіхами найбільші завжди виявляються нагорі. Вібрація веде до утворення пустот, куди провалюються більш дрібні горіхи ... Те ж саме відбувається і на поверхні планет і астероїдів. Цікаво те, що більші гранули виявляються вгорі незалежно від їх маси. Наприклад, за тим же принципом формується шар піску на берегах земних водоймищ: зверху виявляються найбільші піщинки, а внизу - ті, що подрібніше. При цьому інтенсивність процесу може бути різною в залежності від ступеня гравітації.

На початку 1990-х років група дослідників з університету Чикаго (Knight, Jaeger, Nagel) провела серію дуже дотепних експериментів, які демонструють, що коли гранульований матеріал піддають вібраціям, то частки в контейнері рухаються не зовсім хаотично, а почасти впорядковано - в породженому вібрацією конвекційному потоці.

Існує кілька варіантів пояснення даного феномена: 1. Центр мас в гранульованому середовищі може знаходитися "високо" через те, що між великими гранулами існує незайнятий простір і під час струшування центр мас просто "опускається нижче" (тому що система прагне до переходу в більш низький енергетичний стан), "піднімаючи" великі гранули вгору. 2. Вплив порожнього простору між гранулами, в зв'язку з чим великі гранули

"спливають", а дрібні - "тонуть", просочуючись у порожні проміжки. 3.Ще, справа може бути в конвекційних потоках (Рисунок 1.2). Під час струшування частки піднімаються вгору по центру, потім розходяться "хвилями" по сторонам і спускаються вниз. Причина, по якій великі гранули не можуть "спуститися" вниз це те, що конвекційні потоки занадто маленькі, щоб захопити їх за собою.

Сегрегація - зміна фізичного стану неоднорідного середовища. Усі гранульовані суміші здатні до розшарування (сегрегації) при затарюванні, транспортуванні і зберіганні в конічних купах. Однорідність їх складу (низький ступінь сегрегації) досягається близькістю розмірів гранул вихідних компонентів.

Недавно вченими був відкритий ефект Лайденфроста. Явище це полягає в тому, що крапля води, потрапивши на розпечену плиту або праску, не лежить безпосередньо на поверхні, а як би парить над нею за рахунок шару гарячого пару. Аналог саме цього явища в поведінці розсипних матеріалів нещодавно було передбачено теоретично, а тепер і перевірено в практиці. Правда, в відмінності від води, у випадку «кристалічного» сипучого матеріалу.

Голландські фізики насипали велику кількість однакових бусинок у контейнері і енергійно його трясли, імітуючи те саме що розпечену поверхню. Поведінка частинок при цьому фіксувалася на швидкісній відеокамері. Перегляд зображення показав, що дійсно в певних умовах велика «кришталева частина» щільно упакованої гранульованої речовини піднімається і утримується на вазі шару швидких і хаотично рухливих частинок («горячого пару»).

Китайські вчені Л.Л. Жоу, К. Х. Чу та Я. Ж. Су вивчали вплив скатування та дроблення частит на еволюцію анізотропії гранульованих матеріалів. Для опису анізотропії мікроструктури використовувався

структурний класичний тензор, та два аналогічних тензора орієнтації, які характеризувалися напрямом контактних зусиль, - для визначення анізотропії силового ланцюга. Їх результати чисельного досліджування показали, що еволюція анізотропії має той самий характер, що і залежність деформації від напруги, однак анізотропія силового ланцюга являється більш інтенсивною внаслідок анізотропії мікроструктури. Більш того, скочування частинок по різному впливає на анізотропію до та після досягання максимального значення напруги, тоді як дроблення частинок зменшує анізотропію гранульованих матеріалів.

Теоретичний опис поведінки гранульованих матеріалів, як це не парадоксально, знаходиться поки в зародковому стані – на рівні одно- та двохвимірних моделей. Виявляється, що відмінності гранульованих матеріалів від звичайних речовин не тільки призводять до нових цікавих явищ, а й значно ускладнюють їх опис. Навіть динаміка таких “простих” об’єктів, як гранульовані матеріали, стає дуже складною, коли мова йде про велику кількість частинок. Так що розуміння (і використання) усіх процесів, що відбуваються навіть зі звичайним піском) потребує подальшого глибокого теоретичного вивчення та продовження експериментальних досліджень[7-25].



## 2. КАЛІБРУВАННЯ ВІБРОСТЕНДУ

Для проведення експериментальних досліджень був реконструйований вібростенд, створений на кафедрі загальної і теоретичної фізики в Одеському Державному Екологічному Університеті (рисунок 2.1). Установка складається з динаміка з розташованим на ньому кріпленням з контейнером, в якому можна розмістити гранульований матеріал для майбутніх вимірювань. Для генерації коливань динамік з'єднувався з генератором низькочастотних сигналів, який дозволяє регулювати частоту збуджених коливань ( $f$ ) та їх потужність ( $U$ ). Для калібрування вібростенду за допомогою мікрометра була виміряна амплітуда коливань контейнера на різних частотах та при різних напругах. Вимірювання проводилися на 17 різних частотах та при 11 різних напругах. Результати вимірювань наведені у Додатку А.1.

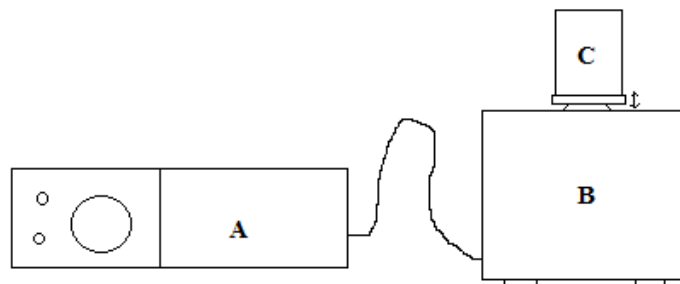


Рисунок 2.1 – Вібростенд, де А – генератор сигналів низькочастотний, В – динамік, С – контейнер з гранульованим матеріалом.

За результатами вимірювань амплітуди був обчислений безрозмірний показник  $\Gamma$  (в подальшому – показник  $\Gamma$ ), який пов'язаний з прискоренням,

що надається гранулам при генерації коливань. Значення показника  $\Gamma$  обчислювалося за формулою

$$\Gamma = \frac{\omega^2 \cdot A}{g}, \quad (1)$$

де  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота коливань ( в подальшому – показник омега);

$A$  – амплітуда коливань контейнера;

$g$  – прискорення вільного падіння, для якого було прийняте значення  $9,81\text{м/с}^2$ , що відповідає широті Одеси.

За результатами вимірювань та розрахунків були побудовані графіки, представлені на рис. 2.3 – 2.4.

На рисунку 2.2 зображено графік, який установлює відповідність між номером вимірювання та отриманим для нього значенням показника  $\Gamma$ . З аналізу цього графіка витікає, що зміна параметрів роботи генератора - частоти коливань  $f$  та напруги  $U$  дозволяє змінювати значення показника  $\Gamma$  в границях від майже 0 до 6,3. Проведений аналіз необхідний для параметризації вібростенду, що дозволяє при наступних дослідках з

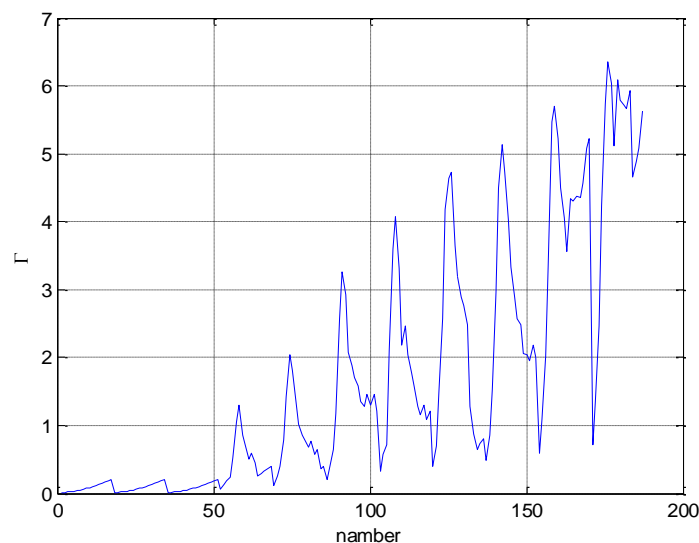


Рисунок 2.2 – Значення показника гамма при проведених вимірах.

гранульованими системами отримати на установці необхідне значення показника  $\Gamma$  шляхом вибору параметрів роботи генератора.

Залежність амплітуди коливань контейнера, розташованого на вібростенді, від частоти і напруги представлена на рис. 2.3). З аналізу цього графіка можна зробити висновок, що найбільша амплітуда коливань спостерігалася на частотах 40- 50 Гц, і збільшення напруги призводить до збільшення амплітуди.

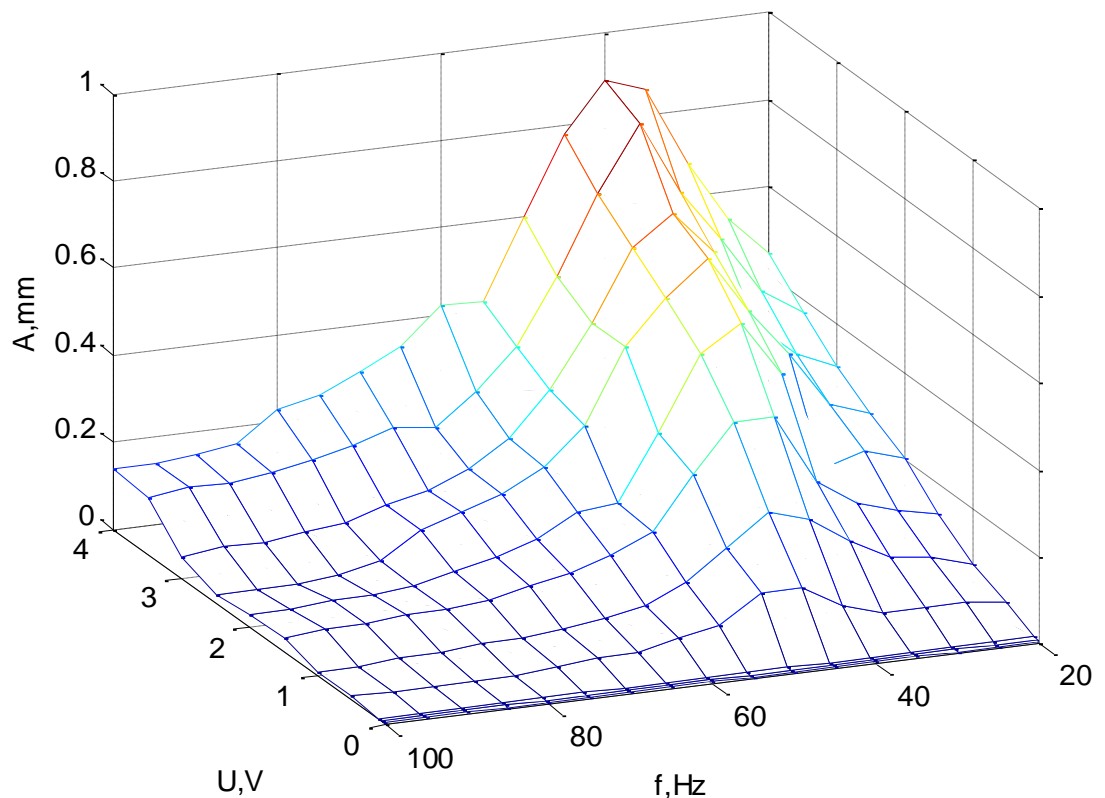
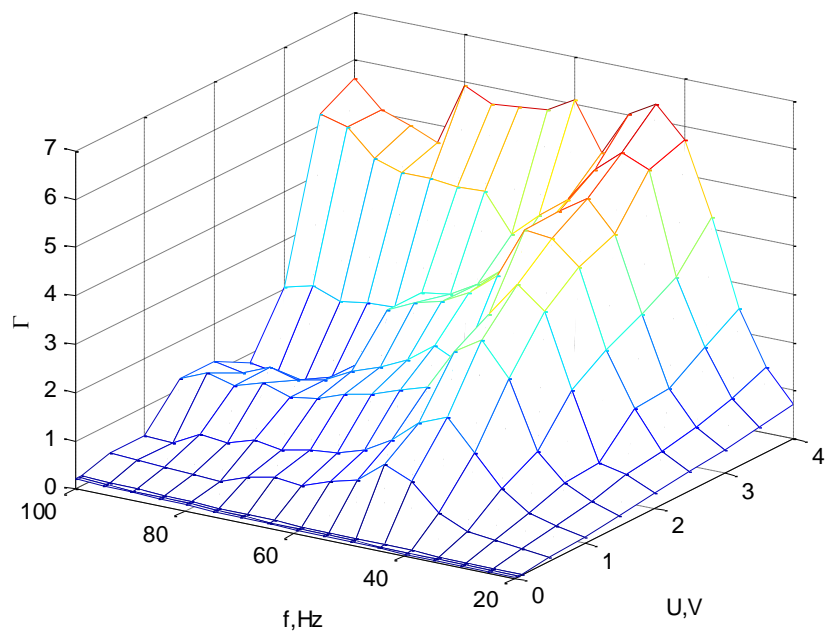


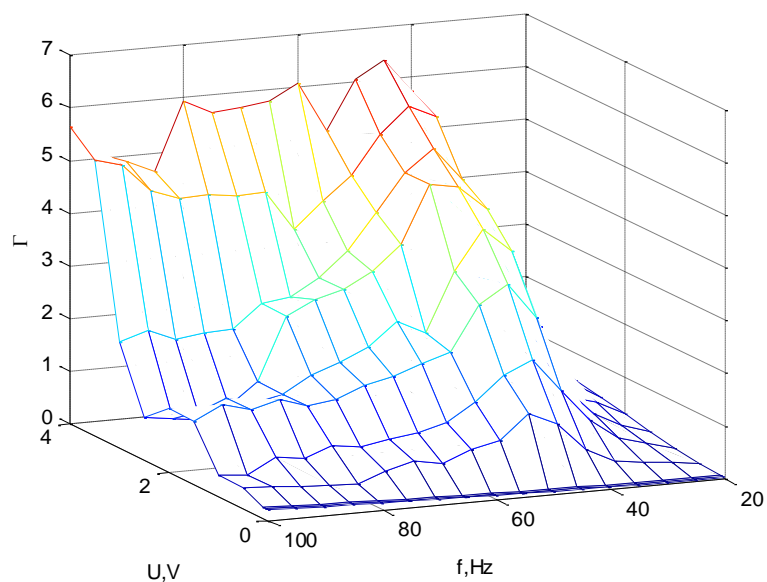
Рисунок 2.3 – Залежність амплітуди від напруги та частоти.

Також був побудований графік залежності гамма від частоти та напруги (рис. 2.4). Цей графік показує, що найвищі показники гамма спостерігаються в тому же діапазоні частот, де і найвища амплітуда. Але при

більшій напрузі появляються відмінності від графіка, отриманого для амплітуди (рис. 2.3): значення гамма при більшій напрузі зростають на великих частотах і майже дорівнюють показникам гамма на частотах 40-50 Гц.



a)



b)

Рисунок 2.4 – Залежність показника гамма від напруги та частоти.

### 3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Мною були виготовлені спеціальні частинки, які мають форму циліндру, вони порожні в середині, довжина їх складає 5мм (рисунок 3.1). Для проведення експерименту, в ці порожні циліндри, я розмістив з одного краю, алюмінієві серцевини довжиною 2мм кожна, виготовлені з алюмінієвого проводу. Алюмінієві частинки дозволяють досягнути ефекту зміщеного центру мас.

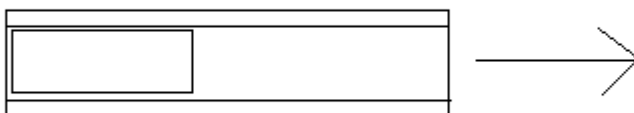


Рисунок 3.1 – Частинка, створена для експерименту

Метою експерименту було дослідити, як частинки поведуть себе під дією вібрації при різних значеннях показника  $\Gamma$ .

245 частинок (необхідна кількість для спостереження ефектів) було поміщено у контейнер на вібростенді.

Дослідження поведінки гранульованої системи було проведено на частоті 45 Гц при напрузі 1,5 В, що відповідає значенню показника  $\Gamma = 2$ . При включенні вібростенду спочатку спостерігалось невелике збудження частинок та їх хаотичний рух. Через декілька секунд, частинки, які знаходилися по краю площини стали розташовуватися більш стисло один до одної, а частинки, котрі були розташовані по центру, почали рух до краю, тим самим звільняючи центр (рис. 3.2). Рухались вони пустим кінцем до

краю. В результаті всі частинки розташувалися дуже щільно біля країв, а в центрі утворилося порожнє місце. І лише декілька частинок, які розташовувалися ближче до центра, іноді по одинці переходили через центр, до іншого краю. Тобто спостерігався ефект сегрегації. Фотографія, зроблена мною під час проведення одного з експериментів при заданих значеннях параметрів, представлена на рис.3.2.



Рисунок 3.2 – 245 частинок на частоті 45 Гц, та напрузі 1,5 В.

Далі поведінка тієї самої системи частинок досліджувалась при підвищенні показника  $\Gamma$ . Експерименти показали, що збільшення  $\Gamma$  призводить до зниження вираженої на границях системи агрегації частинок.

При підвищенні напруги до 3,6В ( $f=45$  Гц,  $U=3,6$  В), що відповідає значенню показника  $\Gamma = 4$ , частинки починали з краю, де вони були щільно розташовані, рухатися ближче до центру. Потім всі частинки рівномірно розповзалися по всій площині, та починали хаотично переміщуватися по ній, але щільність їх практично не змінювалась (рис. 3.3). Для виявлення існування якоїсь закономірності руху частинок в систему було поміщено трейсер, помічений у синій колір. Спостереження показали, що трейсер рухається повністю хаотично, тобто ніяких закономірностей в руху окремих частинок системи не біло знайдено. Результати цього експерименту показані на рисунку 3,3 , в якому чітко видно, що частинки розташовані рівномірно по всій площині.



Рисунок 3.3 – 245 частинок на частоті 45 Гц, та напрузі 3,6 В.

Для графічного зображення отриманих в серії експериментів даних було побудовано графіки. Для цього коло, що є площиною, на якій проводився експеримент було розбито на 6 концентричних кілець, розрахована площа кожного з них, та порахована загальна кількість частинок на кожній з площин. Радіус зовнішнього кола, яке є границею системи частинок дорівнює 42,5 мм. Площу було розраховано для кожного кільця за формулою

$$S_i = \pi(R_i - R_{i-1})^2, \quad (3)$$

де  $R_i$  та  $R_{i-1}$  – відповідно радіуси зовнішнього та внутрішнього кола, які обмежують кільце з номером  $i$ .

Ці кола представлені на рисунку 3.4. На рисунку 3.4.А показаний розподіл частинок при значенні  $\Gamma = 2,005$ , яке відповідає параметрам роботи установки  $f=45$  Гц,  $U=1,5$ В. На рисунку 3.4.Б – розподіл частинок по кільцям при  $\Gamma = 4$  ( $f=45$  Гц,  $U=3.6$  В).



А)





Б)

Рисунок 3.3 – Загальна площинна розбита на 6 площин: А) при гамма 2,005; Б) при гамма 4.

З представлених фотографій безпосередньо видно, що при  $\Gamma = 2$ , центр менш щільно заповнений частинками, а при  $\Gamma = 4$ , вони рівномірно розташовані по всій площинні. Кількісні розрахунки представлено у виді графіка (рис. 3.5).

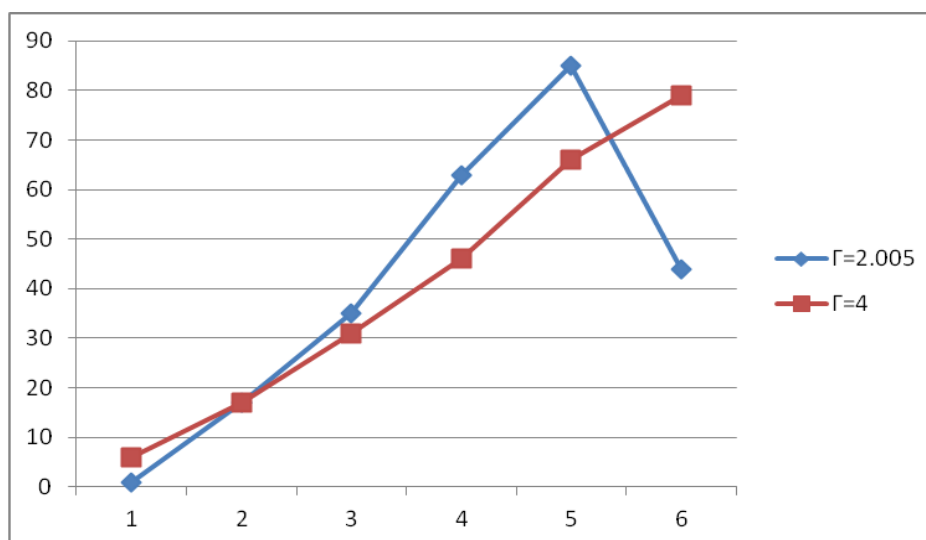


Рисунок 3.5 – Кількісний розрахунок частинок на кожній із площин.

На цьому графіку видно, що при значенні параметру  $\Gamma = 2,005$ , на площинах перших кілець кількість частинок менша, ніж при  $\Gamma = 4$ , а потім

починає зростати з номером кільця і перевищує значення, отримані для  $\Gamma=4$ . За проведеними розрахунками був побудований графік щільності числа частинок на одиницю площини, представлений на рисунку 3.6.

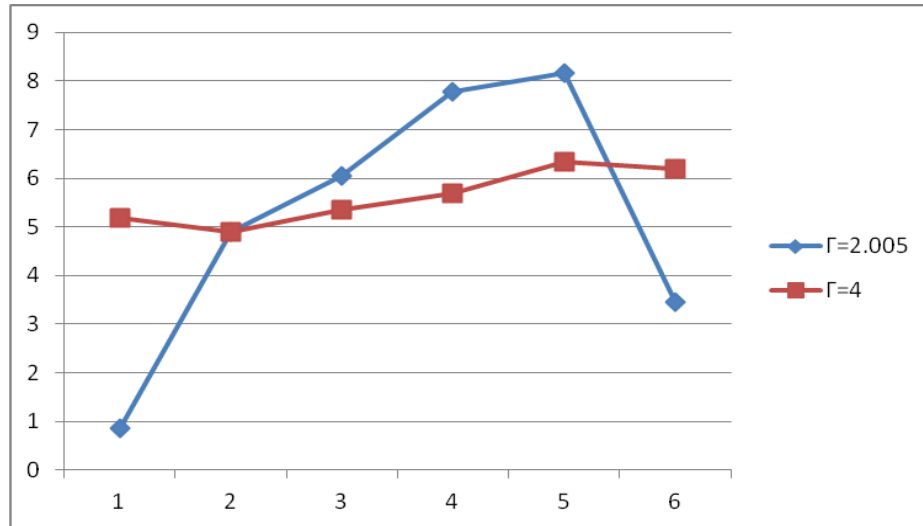


Рисунок 3.6 – Графік щільності числа частинок на одиницю площини.

Саме цей графік є одним з ключових, тому що на ньому видно, що при  $\Gamma = 2,005$  спостерігається поступове зростання щільності при віддаленні від центру, а при  $\Gamma = 4$  щільність залишається майже однаковою на всіх ділянках.

Наші експерименти аналогічні експериментам, проведеним групою дослідників, яка складалася з бельгійців і французів. Вони перші написали про ефект, в якому частинки звільняють центр та розходяться по краям контейнера. Саме з цих досліджень була взята ідея щодо проведення експерименту та вивчення поведінки гранульованих матеріалів під впливом керуємої вібрації з метою перевірки та спостереження цього ефекту. По їх ствердженню всі частинки с відношенням довжини до висоти 2:1 та більше, будуть себе вести таким же чином [26]. Для перевірки цього факту мною були проведені додаткові експерименти, де я використовував такі ж самі циліндри, але з незміщеним центром мас, порожні циліндри, бісер. Мною були отримані схожі графіки, де при  $\Gamma = 2.005$  спостерігалися мінімальні

показники щільності числа частинок у центрі зі зростанням її значення при наближенні до границь контейнера. Результати експериментів, проведених з вище зазначеними гранульованими матеріалами, представлені у додатках Б, В та Г відповідно. Зауважимо, що дві фотографії розподілу бісеру, представлені в додатку Г, отримані при тому самому значенні параметра  $\Gamma$ , рівному 2.005, і відрізняються тільки кількістю частинок, задіяних в експерименті. Як можна побачити з відповідних графіків, вони абсолютно симетричні, що указує на повторюваність результатів.

З метою вивчення можливого впливу форми контейнеру на характер розподілу частинок були проведені додаткові експерименти з різними границями контейнера, в яких спостерігався такий самий ефект (фотографії представлено у додатку Д). Тобто можна зробити висновок про незалежність характеру розподілу гранульованих частинок від форми границь контейнера.

Одною з задач проведених мною експериментів було спостереження сегрегації частинок різних форм на вібростенді. Для цього були взяті частинки двох видів – циліндри зі зміщеним центром маси, та порожні короткі циліндри. Теоретично при параметрах, які відповідають значенню  $\Gamma=2$ , циліндри першого виду повинні були розійтись по краям, щільно розташуватися там, таким чином не пускаючи до границь маленькі циліндри. Тобто великі частинки розташувались би по краям, а маленькі залишились усередині. Але при проведенні цього експерименту всі частинки рухалися до краю, їх так і не вдалося розділити.

На цей результат могло вплинути відразу декілька факторів, пов'язаних з умовами проведення експерименту. По-перше, те, що частинки були вироблені мною власноруч, і складність їх створення, могла привести до суттєвої погрішності у розмірах циліндрів. По-друге, недосконалість площини, на якій проводився експеримент. Невеличка впадина по краю

контейнера привела до того, що в останньому з виділених у вигляді кілець площин на графіках та фотографіях спостерігається менша кількість частинок, ніж в попередніх. Третє, що, певно, більш за все вплинуло на відсутність сегрегації, те, що наш контейнер був з'єднаний з динаміком не по краю, а по невеликому колу, яке розташовується ближче до центру контейнера. При вібрації це практично не впливало на великі циліндри, а на маленькі, з невеликою вагою, вплинуло більш критично, і привело до їх руху в область з меншою амплітудою коливань, тобто к границям контейнеру.

## ВИСНОВКИ

Гранульовані матеріали – природні та штучного походження, знаходять все більш широке застосування в різноманітних галузях виробництва та технологіях захисту навколишнього середовища. Специфічні властивості гранульованих матеріалів ускладнюють теоретичний опис цих систем і роблять необхідним експериментальне вивчення особливостей їх поведінки за різними умовами.

В роботі проведено експериментальне дослідження впливу вібрації на систему гранульованих частинок різної форми та розміру. Для проведення експерименту було здійснено калібрування вібростенду та виготовлені частинки з різним положенням центру мас.

Підтверджено ефект, в якому при впливі вібрації на частинки, вони переміщуються до границь контейнера.

Показано, що прискорення, яке надається частинкам, в процесі вібрації (показник  $\Gamma$ ) та форма частинок впливає на їх розташування на площині контейнера.

Експерименти, проведені з метою спостереження сегрегації частинок різного розміру та маси не дали позитивного результату. Проаналізовані можливі причини негативного результату, пов'язані з недоліками установки. Тим самим звернено увагу на удосконалення, які необхідно внести в конструкцію вібростенду, при проведенні подальших експериментів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. The physics of granular materials. //Rev.Mod.Phys.- 1996.- Vol.68.- P.1259-1272.
2. Duran J. Sands, powders and grains.-New York: Springer-Verlag, 2000.-200p.
3. Kadanoff L. Built upon sand: theoretical ideas inspired by granular flows. // Rev.Mod.Phys.- 1999.- Vol.71.-P.435-447.
4. de Gennes P.G. Granular matter: a tentative view. // Rev.Mod.Phys.-1999.- Vol.71,S.- P.374-385.
5. Герасимов О.І. Структура та динаміка гранульованих матеріалів. //Доповіди НАН України.- 2010.-№11.-С.59-65.
6. Gerasymov O.I. Structure and dynamics of granular materials perturbed by external fields. //Ukr.Journ.Phys.-2010.-Vol.55, №5.-P.560-567.
- 7.<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%83%D0%BB%D1%8B>
8. Герасимов О.І. Гранульовані матеріали у довкіллі. //Причорноморський екологічний бюлетень. Одеса. -2007.-.№2(24) С.157-166.
9. Герасимов О.І. Гранульована матерія: складне в простому. //Вісник ОДЕКУ.-2005.-№1.- С.206-212.
10. Герасимов О.І., Співак А.Я. Моделювання руху механічних збуджень у одновимірних неоднорідних гранульованих ланцюжках: вплив граничних умов. //Вісник ОДЕКУ.-2012.- №14.-С.217-223.
11. Hansen J.-P., Mcdonald J. Theory of simple liquids. London: Academic Press, 1986. – 600 p.

12. <http://www.scientific.ru/journal/physnews100301.html>
13. <https://studfiles.net/preview/4677216/>
14. <http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/1556/31.pdf?sequence=1>
15. [https://pikabu.ru/story/konvektsiya\\_v\\_granulirovannoy\\_srede\\_ili\\_quotyeffekt\\_brazilskogo\\_orekhaquot\\_4661826](https://pikabu.ru/story/konvektsiya_v_granulirovannoy_srede_ili_quotyeffekt_brazilskogo_orekhaquot_4661826)
16. <https://kniganews.org/map/e/01-00/hex4b/>
17. H.Jaeger, S.Nagel, R.Behringer, Rev.Mod.Phys.68, 1259 (1996)
18. L.Bocquet et al, "Granular Shear Flow Dynamics and Forces: Experiment and Continuum Theory", cond-mat/0012356.
19. S.F.Shandarin and Ya.B.Zeldovich, Rev.Mod.Phys.61, 185 (1989)
20. E.Ben-Naim et al, Phys.Rev.Lett. 83, 4069 (1999).
21. S.Luding, H.Herrmann, Chaos 9, 673 (1999), cond-mat/9910098.
22. J. Toner, Y. Tu, and S. Ramaswamy, Ann. Phys. (N.Y.) 318, 170 (2005).
- 23 T. Vicsek et al., Phys. Rev. Lett. 75, 1226 (1995).
24. G. Gre'goire and H. Chate', Phys. Rev. Lett. 92, 025702 (2004); H. Chate', F. Ginelli, and R. Montagne, Phys. Rev. Lett. 96, 180602 (2006).
25. G. Gre'goire, H. Chate', and Y. Tu, Physica (Amsterdam) 181D, 157 (2003).
26. <http://physics.clarku.edu/~akudrolli/preprints/PolarPRL.pdf>