

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Комп'ютерно-інтегрованих технологій  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розробка автоматизованої системи транспортування  
сферичних об'єктів**

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КТ-41  
спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології  
(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Охнівський Р.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Митник М.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Чихіра І.В.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Микитишин А.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Марущак П.О.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Комп'ютерно-інтегрованих технологій  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розробка автоматизованої системи транспортування  
сферичних об'єктів**

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КТ-41  
спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології  
(шифр і назва спеціальності)

Семенець В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник  
(підпис) Митник М.М.  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль  
(підпис) Чихіра І.В.  
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри  
(підпис) Микитишин А.Г.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент  
(підпис) Марущак П.О.  
(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023









## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки та графічної частини.

Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи становить \_\_ слайдів. Об'єм пояснювальної записки складає \_\_ друкованих сторінок формату А4 (210×297), об'єм додатків – \_\_ друкованих сторінок формату А4.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці автоматизованої системи для переміщення сферичних об'єктів. У сучасних промислових умовах транспортування різного роду технологічних об'єктів по криволінійних траєкторіях різного типу є актуальним завданням, оскільки дозволяє підвищити ефективність виробництва.

У роботі було досліджено різні методи транспортування сферичних об'єктів та їх переваги і недоліки. Також були розглянуті наявні рішення та системи, які вже використовуються для транспортування подібних об'єктів. Головною метою дослідження було створення прототипу автоматизованої системи транспортування, яка здатна ефективно та без помилок переміщати сферичні об'єкти. З використанням високоточних сенсорів, алгоритмів обробки даних та механізмів автоматизації, система забезпечуватиме точність і швидкість транспортування, що покращить продуктивність та знизить витрати в промислових процесах.

Результати дослідження та розробки системи були експериментально перевірені на реальних сферичних об'єктах. Оцінка продуктивності, точності та ефективності системи була здійснена шляхом порівняльного аналізу з наявними методами транспортування.

Отримані результати сприятимуть поліпшенню технологій транспортування сферичних об'єктів і зможуть бути використані в промислових, логістичних та виробничих секторах.

Ключові слова: СФЕРИЧНИЙ ОБ'ЄКТ, ТРАНСПОРТУВАННЯ, СОРТУВАННЯ, КОНТРОЛЛЕР, АЛГОРИТМ.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>10</b>
<b>1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....</b>	<b>12</b>
1.1. <i>Аналіз стану питання за літературними та іншими джерелами .....</i>	<i>12</i>
1.2. <i>Класифікація існуючих систем транспортування сферичних об'єктів.....</i>	<i>14</i>
1.3. <i>Актуальність виконання роботи.....</i>	<i>15</i>
1.4. <i>Аналіз існуючих систем транспортування сферичних об'єктів .....</i>	<i>17</i>
1.4.1. <i>Marblevator, Magnetic Tracks .....</i>	<i>17</i>
1.4.2. <i>The Marble Roller Coaster.....</i>	<i>20</i>
1.4.3. <i>Marblevator, Wave.....</i>	<i>24</i>
1.4.4. <i>The Solar Marble Machine .....</i>	<i>27</i>
1.5. <i>Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу бакалавра.....</i>	<i>29</i>
<b>2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>31</b>
2.1 <i>Вступ.....</i>	<i>31</i>
2.2 <i>Рух сферичних об'єктів по паралельних напрямних .....</i>	<i>32</i>
2.2 <i>Визначення швидкості переміщення сферичних об'єктів по прямолінійних напрямних. ....</i>	<i>34</i>
2.3 <i>Визначення сил при гравітаційному транспортуванні сферичних об'єктів .....</i>	<i>37</i>
2.4 <i>Гравітаційне транспортування сферичних об'єктів по криволінійних трасах. ....</i>	<i>42</i>
2.5. <i>Методика експериментального визначення втрат на тертя при гравітаційному спуску сферичних об'єктів.....</i>	<i>46</i>
2.6 <i>Розробка автоматизованої системи транспортування кулястих об'єктів. ....</i>	<i>49</i>
2.7 <i>Дослідження взаємодії сферичних тіл в потоці.....</i>	<i>53</i>
2.8. <i>Силова взаємодія куль між собою та з робочими поверхнями .....</i>	<i>56</i>
2.9 <i>Рівняння руху куль в процесі силової взаємодії.....</i>	<i>61</i>
<b>3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>65</b>
3.1. <i>Моделювання методом обчислювального експерименту .....</i>	<i>65</i>
3.2. <i>Методика дослідження переміщення частинок на еом.....</i>	<i>67</i>
3.3. <i>Алгоритми взаємодії частинок в потоці.....</i>	<i>70</i>
3.4. <i>Аналіз досліджень на еом контактної взаємодії частинок.....</i>	<i>73</i>
3.5. <i>Моделювання піднімання куль гвинтовим транспортером підйомником. ....</i>	<i>80</i>
<b>4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ.....</b>	<b>82</b>
4.1. <i>Техніка безпеки при роботі з 3d принтером під час вивчення основ проектування і моделювання. ....</i>	<i>82</i>
4.2. <i>Вимоги щодо організації робочого місця користувача ПК.....</i>	<i>88</i>



<i>4.3. Огляд системи моніторингу довкілля .....</i>	<i>89</i>
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>92</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ.....</b>	<b>93</b>

## ВСТУП

У сучасному виробничому середовищі автоматизація стає все більш важливою для підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємств. Одним з ключових аспектів автоматизації є системи транспортування, які дозволяють ефективно переміщувати різні типи об'єктів на виробничій лінії.

У рамках даної роботи розглядається автоматизована система транспортування сферичних об'єктів. Сферичні об'єкти, такі як кульки або сфери, широко застосовуються в різних галузях виробництва, включаючи машинобудування, автомобільну промисловість, харчову промисловість та інші. Ефективне та надійне транспортування цих об'єктів має велике значення для підвищення продуктивності та якості виробництва.

Метою цієї роботи є розробка та реалізація автоматизованої системи транспортування сферичних об'єктів на основі сучасних технологій та методів автоматизації. Проект передбачає вивчення принципів роботи, проектування та реалізацію системи, а також оцінку її ефективності та переваг.

Актуальність даної роботи полягає в тому, що автоматизовані системи транспортування сферичних об'єктів мають значний потенціал для оптимізації виробничих процесів. Вони дозволяють забезпечити швидке та точне переміщення об'єктів, знижуючи втрати та покращуючи якість виробництва. Крім того, автоматизовані системи можуть підвищити безпеку праці, знизити трудоемкість та забезпечити більш ефективне використання ресурсів.

У процесі виконання роботи бакалавра будуть розглянуті основні аспекти проектування та реалізації автоматизованої системи транспортування сферичних об'єктів, включаючи вибір необхідного

обладнання, налаштування системи керування та інтеграцію з існуючими виробничими процесами. Результатом проекту буде функціонуюча автоматизована система, яка забезпечує ефективне транспортування сферичних об'єктів з мінімальними витратами ресурсів та високою якістю.

Автоматизована система транспортування сферичних об'єктів має значний потенціал для підвищення ефективності та якості виробництва. Її використання дозволяє забезпечити швидке та точне переміщення об'єктів, зменшити втрати та знизити трудоемкість виробничих процесів. Основними перевагами автоматизованих систем транспортування є підвищення продуктивності, зниження витрат та оптимізація використання ресурсів.

Ця робота має на меті розробку та реалізацію автоматизованої системи транспортування сферичних об'єктів, яка дозволить покращити процеси виробництва та підвищити конкурентоспроможність підприємства. Проект передбачає вивчення принципів роботи системи, проектування необхідного обладнання, розробку програмного забезпечення для керування та інтеграцію з існуючими виробничими процесами.

Виконання даного проекту сприятиме розширенню наших знань та навичок у галузі автоматизації виробничих процесів і покладає підставу для подальшого розвитку та застосування автоматизованих систем транспортування в індустрії.

# 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1. Аналіз стану питання за літературними та іншими джерелами

Автоматичні системи транспортування сферичних об'єктів є важливою складовою сучасних промислових процесів. Вони базуються на принципах, що забезпечують точне та ефективне переміщення цих об'єктів.

Одним з основних принципів таких систем є точне розташування сферичних об'єктів для забезпечення надійного захоплення та утримання. Це досягається за допомогою спеціалізованих механічних пристроїв, які можуть надійно фіксувати об'єкти без пошкодження їхньої форми.

Створення системи транспортування сферичних об'єктів має включати в себе комплексне вирішення завдання переміщення об'єктів по визначеному шляху і такі параметри, як: відносна швидкість, сила тертя, кінетична енергія, розмір і матеріал об'єктів транспортування.

Ці системи можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як дерево, пластик або метал, і мають різні конфігурації, щоб створювати різноманітні маршрути та ефекти.

Основна ідея автоматичних систем транспортування сферичних об'єктів полягає в тому, що кульки рухаються по замкнутому контурі за допомогою гравітації, кінетичної енергії або інших механічних пристроїв. Вони можуть включати різноманітні елементи, такі як канали, труби, рейки, петлі, коливальні маятники, дзеркала та інші препарати, які надають кулькам можливість рухатися та взаємодіяти з оточуючим середовищем.

Мармурові траси часто застосовуються як навчальна гра для дітей або як художній об'єкт. Вони можуть мати складні маршрути з унікальними ефектами, такими як обертання, спуски, зміна швидкості та напрямку руху кульок. Такі системи можуть бути вкрай цікавими і сприяти розвитку креативного мислення, візуально-просторових навичок та розумінню фізичних принципів. Крім того, такі треки можуть бути використані на

різних виробничих підприємствах, наприклад, для перевезення та сортування овочів. Також ці доріжки використовуються в освітніх цілях для вивчення основ фізики. Рух кульки може ілюструвати принципи гравітації, кінетичної енергії, сили тертя та інших фізичних явищ.

Траси для сферичних об'єктів мають певні особливості, що сприяють ефективному та безпечному переміщенню об'єктів. Вони можуть мати форму, адаптовану до сферичної геометрії об'єктів, наприклад, коловий або пологий профіль. Крім того, на таких трасах можуть бути розташовані системи надійного утримання сферичних об'єктів. Це можуть бути спеціальні ящики, які фіксують об'єкти під час транспортування, або ролики, які забезпечують їх стабільність та уникають непередбачених рухів. Також, спеціальні траси можуть бути обладнані автоматичними системами навігації, які допомагають точно визначати положення сферичних об'єктів на трасі та керувати їхнім рухом. Це можуть бути системи розпізнавання об'єктів або сенсорні системи, що реагують на рух об'єктів і взаємодіють з автоматичною системою керування.

Використання трас для сферичних об'єктів сприяє оптимізації процесу транспортування та забезпечує безпеку об'єктів під час переміщення. Вони дозволяють уникнути пошкоджень об'єктів, забезпечують стабільність та знижують ризик аварійних ситуацій.

Іншим ефективним засобом транспортування сферичних об'єктів є конвеєрні системи. Конвеєрні стрічки дозволяють автоматизувати процес переміщення об'єктів шляхом їх перенесення по заданому маршруту. Для забезпечення стійкості об'єктів на конвеєрі використовуються спеціальні ролики або пристрої фіксації. Важливим аспектом при створенні таких систем є їхня автоматизація та інтеграція з іншими процесами виробництва. Застосування розумних систем керування та програмування дозволяє забезпечити оптимальну продуктивність та ефективність управління транспортуванням сферичних об'єктів.

Загалом, принципи та засоби створення автоматичних систем транспортування сферичних об'єктів ґрунтуються на використанні спеціалізованих механічних пристроїв, датчиках та конвеєрних системах. Ці рішення дозволяють забезпечити точне розташування, безпеку та ефективне переміщення об'єктів у промислових процесах.

## **1.2. Класифікація існуючих систем транспортування сферичних об'єктів**

Залежно від особливостей та вимог конкретного застосування, існують різні класифікації таких систем.

Гравітаційні та механічні ґрунтуються на принципі руху сферичних об'єктів. У цій класифікації виділяються два типи систем:

Гравітаційні системи використовують силу тяжіння для транспортування об'єктів, вони можуть мати нахилений шлях або спеціальні платформи для руху по схилу.

Механічні системи використовують рухомі механізми, такі як ролики, ланцюги або конвеєрні стрічки, для перенесення об'єктів. Прості мармурові доріжки - це базовий тип, де кульки прокотяться по прямим або кривим трасах, створених зі спеціальних деталей, таких як канали, труби або рейки.

Мікросистеми та макросистеми базуються на масштабі транспортування. Мікросистеми використовуються для виробництва та обробки невеликих сферичних об'єктів, таких як кульки для підшипників чи кульки для роликових підставок. Макросистеми призначені для переміщення великих сферичних об'єктів, наприклад, великих куль для газових балонів або куль для водних атракціонів.

Автоматичні та напівавтоматичні системи. Автоматичні системи працюють повністю без участі людей та використовують роботизовані руки, конвеєрні стрічки та сенсорні системи для керування транспортуванням. Напівавтоматичні системи вимагають деякої взаємодії з оператором, але

основна частина процесу виконується автоматично. Електричні мармурові доріжки - це системи, які використовують мотори або інші механізми для руху кульок по доріжці. Вони можуть мати автоматичні підйомники, вагончики з електродвигунами та інші рухомі елементи.

Класифікація існуючих систем транспортування сферичних об'єктів допомагає зрозуміти різноманітність підходів до цього завдання та вибрати найбільш оптимальне рішення для конкретного випадку. Кожен клас систем має свої переваги та обмеження, і вибір залежить від вимог транспортного процесу та властивостей сферичних об'єктів.

### **1.3. Актуальність виконання роботи**

Автоматизована система транспортування сферичних об'єктів є актуальним і важливим рішенням у сучасному промисловому середовищі. Це обумовлено декількома факторами.

По-перше, зростання промислової автоматизації та впровадження розумних технологій спонукає до створення ефективних систем транспортування сферичних об'єктів. Автоматизація дозволяє знизити витрати на робочу силу, покращити точність та продуктивність процесу транспортування та забезпечити безпеку працівників.

По-друге, зростання обсягів виробництва сферичних об'єктів, таких як кульки для підшипників, м'ячі для спортивних ігор чи кульки для роликів підставок, вимагає швидкого та ефективного транспортування. Автоматизовані системи забезпечують швидке переміщення об'єктів, мінімізуючи час, потрібний для перекидання та маніпуляцій.

По-третє, сферичні об'єкти, такі як картопля, яблука, апельсини та мандарини, є важливими продуктами в харчовій промисловості. Для ефективного виробництва та транспортування цих продуктів застосовуються спеціальні системи та засоби. В сфері виробництва продукції, таких як картопля, використовуються автоматизовані системи сортування та

упаковки. Ці системи здатні автоматично розподіляти картоплю за розмірами, якістю та вагою, а також упаковувати її у відповідні контейнери чи мішки. Це дозволяє забезпечити швидкий та ефективний процес обробки картоплі для подальшого транспортування. Що стосується яблук, апельсинів та мандаринів, для їх транспортування використовуються спеціальні системи сортування, упаковки та палетування. Ці системи дозволяють автоматично класифікувати фрукти за розмірами, якістю, кольором чи вагою, а також упаковувати їх у відповідні контейнери або ящики. Після упаковки фрукти можуть бути автоматично палетизовані для зручного та безпечного транспортування. Використання автоматичних систем транспортування та обробки сферичних об'єктів в сфері виробництва продукції допомагає забезпечити ефективність, якість та економію ресурсів у виробничому процесі. Вони забезпечують швидке та точне транспортування, допомагають уникнути пошкоджень та зберегти вигляд продукту. Крім того, автоматизовані системи підвищують безпеку працівників та знижують витрати на робочу силу.

По-четверте, автоматизовані системи транспортування сферичних об'єктів можуть бути легко інтегровані з іншими процесами виробництва, такими як обробка, упаковка чи сортування. Це забезпечує плавний та безперебійний потік роботи, підвищує ефективність та продуктивність виробництва.

Загалом, автоматизовані системи транспортування сферичних об'єктів є актуальними і потужними інструментами, що сприяють покращенню процесів виробництва, зниженню витрат та підвищенню якості продукції. Вони відповідають вимогам сучасного промислового середовища і відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та конкурентоспроможності підприємств.



## 1.4. Аналіз існуючих систем транспортування сферичних об'єктів

Для розробки прототипів систем транспортування зручно використовувати їхні модельні копії, які зручно виготовляти за допомогою 3Д друку. В результаті нами було проведено пошук систем транспортування сферичних об'єктів, для яких можливо виготовити макет на 3Д принтері.

### 1.4.1. Marblevator, Magnetic Tracks

Даний тип системи транспортування для піднімання об'єктів на висоту використовує кроковий механізм [1]. При підніманні кулька отримує потенціальну енергію, за рахунок якої і виконується її подальший рух по криволінійній трасі до місця призначення.

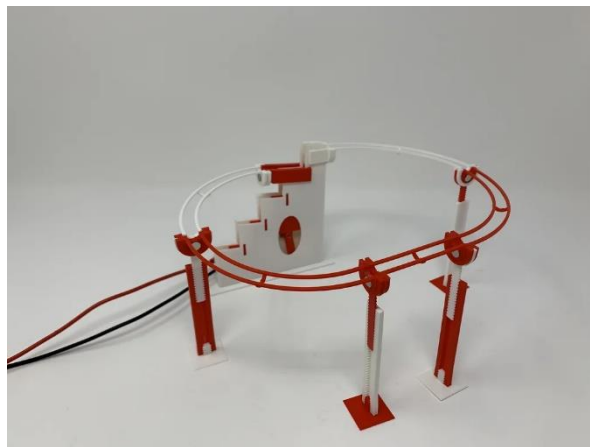


Рисунок 1.1 – Система транспортування на основі магнітів.
















Траса складається з наступних елементів:

- Один мотор-редуктор N20 6VDC 100RPM.
- Сто неодимових магнітів діаметром 6,4 мм і товщиною 1,6 мм (у цій моделі використовується дванадцять).
- Сто скляних кульок 12 мм.

Технологія виготовлення передбачає роздрукування на 3D принтері таких елементів:

Таблиця 1.1

## Компоненти транспортуючої системи Marblevator, Magnetic Tracks

							
Base.stl	Cam.stl	Stairs.stl	Track, End.stl	Track, Right, 78mm.stl	Track, Straight, 58mm.stl	Track, Start.stl	Tressel, Arm, 36 Teeth.stl
							
Tressel, Base.stl	Tressel, Tower, 36 Teeth.stl	Track, Straight, 100mm.st 1	Tressel, Arm, 9 Teeth.stl	Tressel, Arm, 20 Teeth, Offset.stl	Tressel, Tower, 9 Teeth.stl	Tressel, Tower, 18 Teeth.stl	

Порядок збирання сходів (Stairs.stl) передбачає наступні дії:

- 1) Просунути «Staircase.stl» через нижню частину «Base.stl».
- 2) Вставити мотор-редуктор в кріплення двигуна.
- 3) Вставити «Cam.stl» в еліптичний отвір навпроти двигуна в базовому вузлі.

4) На цьому етапі подається 3V постійного струму на двигун і запчастина Cam.stl обертається за годинниковою стрілкою. (За допомогою амперметра визначили, що струм двигуна між 12 мА і 20 мА).

Складання треку передбачає наступні дії:

Установка магніту:

Потрібно вставити один неодимовий магніт в отвір для кріплення магніту в "Track, Start.stl".

Помістити «Track, End.stl» на вузол початку доріжки, розташувати один неодимовий магніт біля отвору для кріплення магніту в кінцевій частині доріжки.

Таким чином з'єднати кожен секцію траси від початку до кінця враховуючи полярність магніту.

Збірка ребра:

Потрібно втиснути один «Tressel, Base.stl» у кінець відкритих зубців одного «Tressel, Tower, 36 Teeth.stl».

Повторити цей крок для решти Tressel.stl.

Втиснути перший «Tressel, Arm, 36 Teeth.stl» у першу монтажну вежу з решіткою, залишивши сім зубів за межами вежі.

Запресувати другий "Tressel, Arm, 36 Teeth.stl" у другу монтажну вежу з решіткою, залишивши шість зубів за межами вежі.

Запресувати третій «Розетка, рука, 36 зубів.stl» у третю складальну вежу з решіткою, залишивши п'ять зубів за межами вежі.

Запресувати останній «Tressel, Arm, 36 Teeth.stl» у вежу остаточного складання решетування, залишивши чотири зуби за межами вежі.

Встановлення початкових і кінцевих вузлів рейки на збірку сходів.

Потрібно розмістити початковий вузол рейки у верхній частині вузла сходів і притиснути його на місце.

Розмістити вузол кінця гусениці на сходинці безпосередньо під вузлом початку гусениці та притиснути його на місце.

Щоб зібрати трек, виконуються наступні дії:

Розмістити базовий блок на рівній поверхні.

Приєднати першу секцію доріжки до початку доріжки на базовому вузлі, а потім підтримати вільний кінець за допомогою коси.

Повторити попередній крок з кожною секцією доріжки та вузлом ребра.

Підключити вільний кінець останньої секції доріжки до кінця доріжки на базовому вузлі.

Підключити двигун до джерела постійного струму.

Додати чотири кульки в кінці доріжки і підключити живлення.

### 1.4.2. The Marble Roller Coaster

Наступна система також транспортує сферичні об'єкти по криволінійній траєкторії, піднімальним механізмом в якій є спіральний гвинт, що обертається [2].



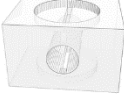







Рисунок 1.2 – Система транспортування на основі датчика руху

The Marble Roller Coaster— це система, яка при спрацьовуванні датчика руху буде кілька разів переміщувати кульки на вершину вежі та відправляти їх по пандусу до підніжжя вежі.

Технологія виготовлення поршневої коробки передбачає роздрукування на 3D принтері необхідних елементів, які наведено в табл. 1.2

Таблиця 1.2

Компоненти транспортуючої системи The Marble Roller Coaster

			
Main Block.stl	Piston.stl	crank shaft.stl	Stepper_part.stl
			
Side Block 1.stl	Side Block 2.stl	Bottom.stl	Top.stl

Поршнева коробка — це механізм, який використовується для отримання кульки, що надходить, і штовхання цієї кульки до вежі. Поршень опускається всередину головного блоку, а колінчастий вал проходить через прорізи головного блоку та поршня.


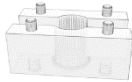
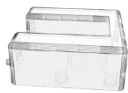
Основний блок є затиснутий між бічним блоком 1 і бічним блоком 2 і всі вони встановлені на нижній частині. Коротший кінець колінчастого вала входить в закритий отвір бічного блоку 1. Довший кінець колінчастого вала входить у відкритий отвір бічного блоку 2. Більші отвори бічних блоків є отворами для гвинтів і вони збігаються з отворами для гвинтів у нижній частині.

Верхня частина встановлена поверх бічних блоків, а отвори для гвинтів вирівнюються з отворами для гвинтів бічних блоків. Stepper\_part щільно з'єднаний з колінчастим валом.

Для збірки вежі необхідно виготовити на 3D принтері наступні запчастини (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Деталі, необхідні для виготовлення вежі



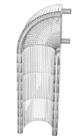



		
Next Top.stl	Mid Lifts.stl	Very Top.stl

Мармурова вежа використовується для перенесення кульок на вершину Мармурової рампи. Чотири частини Mid Lift з'єднані із Next Top. Верхня частина з'єднана з вершиною найвищого Середнього підйому.

Для збірки рампи, передбачається роздрукування на 3D принтері наступних деталей:

Таблиця 1.4

## Компоненти для збірки рампи

					
Ramp 1 Improved pt4.stl	Ramp 2 Improved pt3.stl	Ramp 1 Improved pt2.stl	Ramp 1 Improved pt1.stl	Ramp 2.stl	h1,h2, h3.stl

Мармурова рампа — це шлях, за яким кульки опускатимуться на дно мармурових гірок і повертатимуться до поршневої коробки.

Ramp 1 pt1 з'єднаний із Ramp 1 pt2. Зовнішній кінець Ramp 1 pt2 з'єднаний із зовнішнім кінцем Ramp 1 pt3. Ramp 1 pt3 з'єднаний із зовнішнім кінцем Ramp 1 pt4 .

В даній конструкції використовується апаратне програмне забезпечення, яке передбачає таке обладнання:

Arduino Uno

USB-кабель AB

Кроковий двигун

Stepper\_part (3D-частина, зображена в таблиці нище)

Модуль драйвера двигуна ULN2003

Ультразвуковий модуль вимірювання дальності HC-SR04

Мініатюрна макетна плата

Маленький тумблер

Дроти

Кроковий двигун використовується для обертання колінчатого вала в поршневій коробці . Повертаючи колінчастий вал , він переміщує головний блок збоку на Датчик наближення, який використовується для виявлення об'єкта на заданій відстані та запускає кроковий двигун.

Кроковий двигун з'єднується із модулем драйвера двигуна, який підключений до контактів 8, 9, 10 і 11 плати. Невеликий тумблер послідовно підключений до крокового двигуна. Stepper\_part підключений до крокового двигуна, як показано на рисунках 1.3, 1.4.

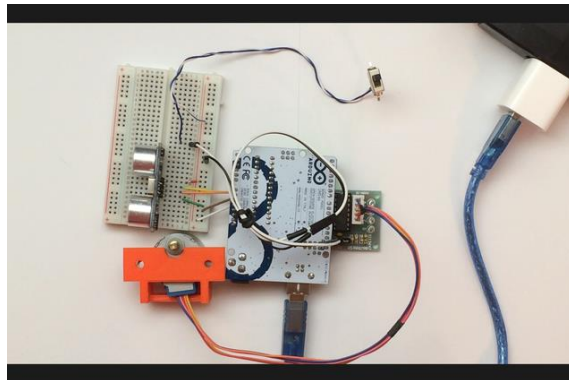


Рисунок 1.3 - Зовнішній вигляд з'єднання

Датчик наближення підключений до контакту 6, а тригерний сигнал - до контакту 7. Апаратне програмне забезпечення працює з кодом, наведеним на рисунку нижче.

Circuit Schematic

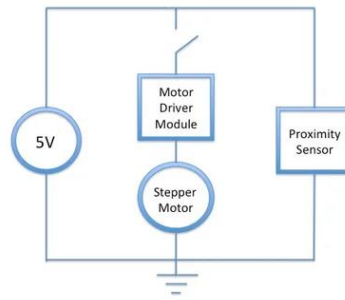


Рисунок 1.4 – Схема підключення

```

1  //*****
2  PURPOSE:      Marble Roller Coaster for MAKE
3  Created by   Ryan Foxworth
4  DATE:       Fall 2014
5  *****/
6
7  #include <StepperAR.h> //includes stepper motor library
8  #include "HCSR04.h"//includes proximity sensor library
9
10 #define echoPin 6 //defines the echo pin to pin #6
11 #define triggerPin 7 //defines the trigger pin to pin #7
12 #define gearratio 64 //1:64 gear ratio for MAKE kit stepper motor
13
14 const int stepsPerRevolution = 2048; // constant variable which is "read only"
15 int i, stepperMotor=LOW; //initializes stepper motor to LOW so that it is not accidentally triggered when the system starts
16
17 Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8,9,10,11); //calls the constructor and defines the number of steps and pin #8 through #11 for stepper motor
18 HCSR04ProxSensor distanceSensor(echoPin,triggerPin); //calls the constructor to instantiate a sensor named "distanceSensor"
19
20 void setup() {
21   myStepper.setSpeed(6); //sets the speed of the stepper motor
22   //(I believe 6 is the fastest without any malfunction in the stepper motor)
23   Serial.begin(9600); //starts serial communication for debugging purposes
24 }
25
26 void loop() {
27   Serial.print("The distance is : ");
28   float distance = distanceSensor.readSensor(); //calls the 'readSensor' method to determine the distance of an object
29   Serial.print(distance); //sends the measurement to the serial monitor
30   Serial.println(" cm");
31
32   if (distance < 80) { //adjust the distance to your desired distance
33     Serial.println("Object is closer than 80 cm; stepper motor is triggered.");
34     stepperMotor=HIGH; // assigns stepper motor to HIGH to turn it on for the next statement
35   }
36
37   if (stepperMotor==HIGH) {
38     Serial.println("counterclockwise");
39     //for (i=0; i<10; i++){ //created a for loop to get at least one full revolution
40       myStepper.step(-stepsPerRevolution); //the negative means the steps will be in the counterclockwise direction
41     }
42
43     stepperMotor=LOW; //assigns stepper motor to LOW to turn it off
44     delay(500); //0.5 sec delay after full revolution
45   }
46 }
47

```

Рисунок 1.5 – Код програмного забезпечення

### 1.4.3. Marblevator, Wave

Наступний пристрій транспортує кулясті об'єкти за рахунок зміни висоти самої траси з використанням двигуна редуктора [3].



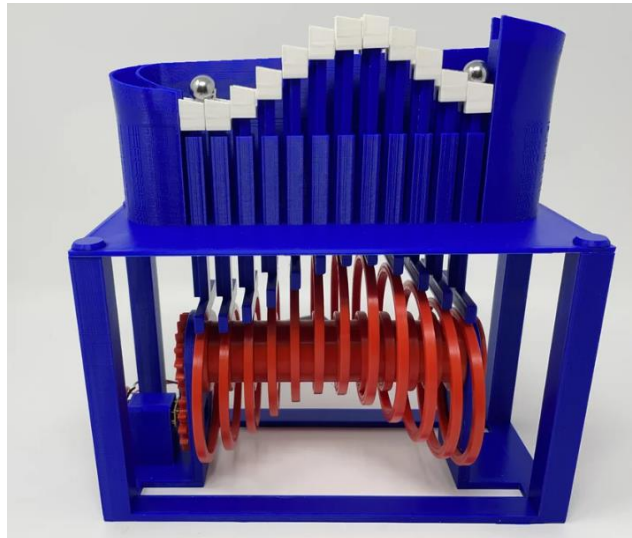


Рисунок 1.6 – Система транспортування на основі роботи двигуна редуктора

Marblevator wave - це система, принцип якої полягає у тому, що сегменти гусениці рухаються у вигляді псевдосинхронної хвилі, переміщаючи кульки від початку доріжки до кінця і навпаки.

Технологія розробки системи передбачає наступні програми:

Autodesk Fusion 360

Ultimaker Cura 14.12.1

Ultimaker S5s

Також для цього проєкту потрібні наступні елементи:

Двигун типу N20 6VDC 120RPM.

Корпус з подвійною батарейкою типу AA з проводами та перемикачем.











Дві батарейки AA.

Три шарикопідшипники 8 мм.

У моделі використовуються надруковані на 3D принтері елементи, показані на таблиці 1.6.

Таблиця 1.5

## Компоненти транспортуючої системи Marblevator, Wave

				
Base.stl	Bolt, Bushing, Camshaft.stl	Bolt, Track, Guide, Lifters.stl	Bushing, Camshaft.stl	Cam.stl
				
Camshaft.stl	Gear, Motor.stl	Lifter.stl	Track, Guide, Lifters.stl	Track, Segment.stl

2. Для збірки основи виконуються наступні дії:

- 1) Припаяти корпус батареї до двигуна.
- 2) Розташувати "Gear, Motor.stl" у "Base.stl".
- 3) Помістити мотор-редуктор у тримач двигуна.
- 4) Розташувати "Camshaft.stl" у базовому вузлі.
- 5) Посунути "Cam.stl" на розподільний вал.
- 6) Посунути решту одинадцять кулачків на розподільний вал.
- 7) Вставити "Bushing, Camshaft.stl" на вузол розподільного вала.
- 8) Закріпити втулку розподільного вала за допомогою "Bolt, Bushing, Camshaft.stl".
- 9) Посунути двигун так, щоб шестерня двигуна від'єдналася від розподільного вала.
- 10) Повернути двигун на місце.

Для збірки верху, виконуються наступні дії:

- 1) Перемістити «Lifter.stl» у «Track, Guide, Lifters.stl».
- 2) На підйомнику натиснути «Track, Segment.stl».
- 3) Повторити попередні два кроки для решти одинадцяти елементів і сегментів доріжки.

Для остаточної збірки, виконуються наступні дії:

- 1) Розмістити верхню частину над базовою.
- 2) Закріпити верхній вузол на базовому вузлі за допомогою чотирьох «Bolt, Track, Guide, Lifters.stl».

#### 1.4.4. The Solar Marble Machine

Система зображена на рисунку 1.7, транспортує сферичні об'єкти за допомогою кола, яке повертає двигун. Особливість системи це робота від сонячного світла. [3]



Рисунок 1.7 – Система транспортування на основі роботи сонячної батареї

Система Solar Marble Machine перетворює світло в імпульси потужності, які переміщують металеві кульки на вершину спіралі, що обертається.

Технологія виготовлення системи передбачає наступні деталі:

- 1 набір вирізаних лазером дерев'яних деталей
- 1 х двигун GM9
- 2 х #4x1/2" гвинти
- 7 х 3/8" сталеві кульки

- 1 x конденсатор 4700 мкФ
- 1 x SCC3733 сонячна батарея
- 1 x транзистор PN2222A
- 1 x тригер 381S
- 1 x двостороння липка стрічка
- 1 x 0,47 мкФ конденсатор
- 2 x 2 -провідник
- 1 x діод 1 x друкована плата сонячного двигуна

Транзистор, тригер, маленький конденсатор 0.47 мкФ, великий конденсатор 4700 мкФ припаяні до плати сонячного двигуна із правильною орієнтацією (рисунок 1.8).

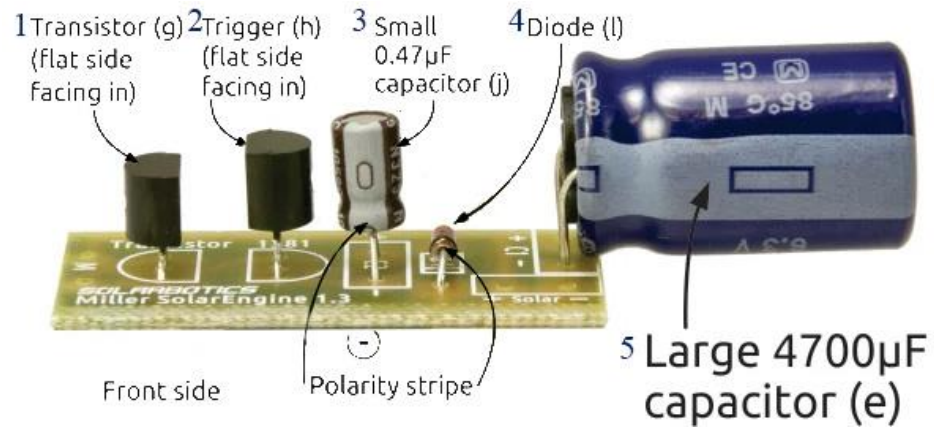


Рисунок 1.8. – Плата сонячного двигуна. 1- транзистор; 2 - тригер; 3 - конденсатор 0.47 мкФ; 4 - діод; 5 - конденсатор 4700 мкФ.

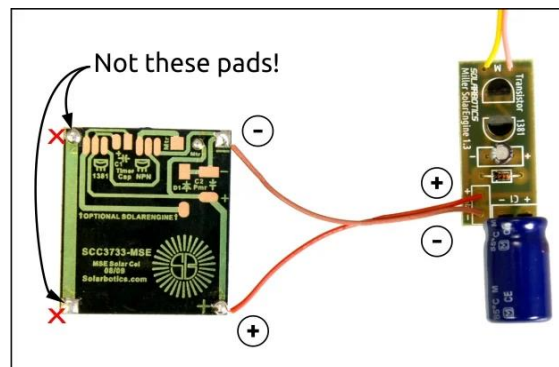


Рисунок 1.9. – З'єднання сонячної панелі з платою сонячного двигуна.

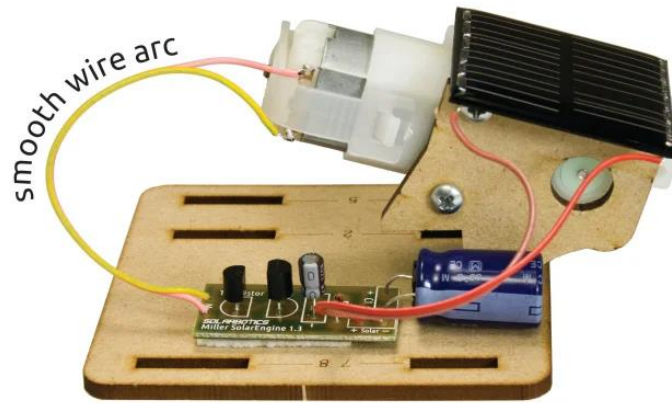


Рисунок 1.10. – Закріплення сонячної панелі та плати на основі.

Для кріплення плати використано двосторонню липучу стрічку яка є діелектриком.

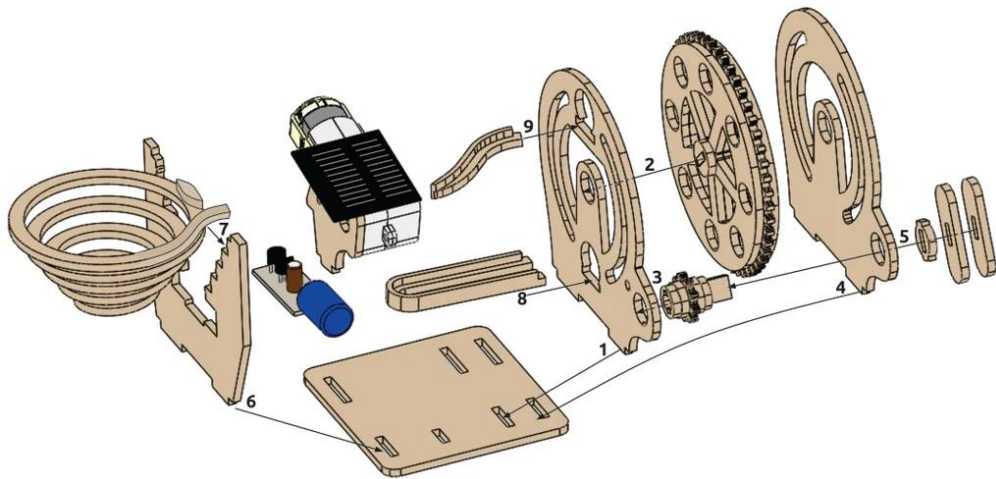


Рисунок 1.11. – Повна збірка частин траси

Конструкція в зборі перетворює світло в енергію для переміщення металевих кульок на вершину спіралі.

## 1.5. Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу бакалавра

Описуючи висновки та постановку задач, пов'язаних з мармуровими трасами, можна враховувати такі аспекти:

1. Фізичні принципи: Мармурові траси дозволяють спостерігати та вивчати різні фізичні принципи, такі як гравітація, кінетична енергія та сила

тертя. Висновки можуть стосуватись поведінки кульок на різних елементах траси, впливу на швидкість та напрямок руху, взаємодії з перешкодами та ін.

2. Розвиток навичок: Мармурові траси сприяють розвитку різних навичок у дітей та навіть у дорослих. Це можуть бути навички конструкції, логічного мислення, творчості, технічного дизайну та вирішення проблем. Висновки можуть стосуватись вдосконалення цих навичок через взаємодію з мармуровими трасами.

3. Ефективність транспортування: Мармурові траси можуть бути використані для вивчення ефективності транспортування різних об'єктів. Наприклад, задача може полягати в тому, щоб знайти найшвидший та найефективніший маршрут для перенесення кульки від пункту А до пункту Б.

4. Інженерні дослідження: Мармурові траси можуть слугувати об'єктом досліджень в області інженерії та технологій. Наприклад, можна вивчати властивості матеріалів, оптимальну конструкцію елементів траси, вплив параметрів на рух кульок тощо.

## 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

### 2.1 Вступ

Розробка автоматизованої системи транспортування сферичних об'єктів передбачає вибір транспортної системи та засобів керування. Із транспортних систем суттєвими перевагами користуються гравітаційні спуски, які є найбільш економічні, оскільки використовують енергію гравітаційного поля Землі. При роботі в автоматизованих системах гравітаційні спуски комплектуються системами завантаження, розвантаження, контролю проходження вантажів по спуску та відповідними супутніми технологічними операціями, наприклад дистанційним контролем розмірів. Програма теоретичних досліджень передбачала:

1. Дослідження кочення сферичних об'єктів по паралельних напрямних.
2. Розподіл реакцій в залежності від зміщення напрямних в просторі, їх поздовжнього та поперечного нахилу.
3. Визначення складових тертя, що спричиняють опір переміщенню, визначення моменту опору від тертя кочення та тертя вертіння.
4. Визначення швидкості та прискорення кулі із врахуванням сил опору.
5. Дослідження переміщення куль по криволінійних, зокрема колових, трасах.
6. Обґрунтування методики експериментального визначення коефіцієнтів тертя при гравітаційному транспортуванні
7. Дослідження руху куль в потоці.
8. Дослідження силової взаємодії куль в потоці та з робочими поверхнями.
9. Дослідити рух куль в процесі силової взаємодії.

## 2.2 Рух сферичних об'єктів по паралельних напрямних

Сферичні об'єкти характеризуються однаковою віддаллю довільної точки поверхні до геометричного центра об'єкту та, при однорідному матеріалі, спів паданням центру ваги із центром сферичного об'єкту (кулі). В цьому випадку моменти інерції відносно довільної осі, яка проведена через центр кулі будуть однаковими, тобто константою. Внаслідок центральної симетрії вони не потребують позиціонування за розміщенням на трасі. Для транспортування сферичного об'єкту по трасі його потрібно направити в жолоб, який має певний ухил, величина якого впливає на швидкість опускання кулі. З метою забезпечення поперечного позиціонування кулі її, достатньо полишити їх двох ступенів свободи, тато накласти в'язі на переміщення в напрямку, перпендикулярному до руху кулі. Коли кулю направити по вгнутому жолобу, то не забезпечується поперечна стійкість кулі при збуреннях, а коли направити по жолобу із горизонтальним дном та двома перпендикулярними стінками, то процес руху буде нестабільний внаслідок попереминого контакту кулі із кожною стінкою. Для сферичних об'єктів найбільш доцільно використовувати гравітаційні спуски, які складаються із паралельних напрямних, віддаль між якими є меншою діаметра сферичного об'єкту. Найбільшу стабільність та найменші втрати забезпечують прямолінійні напрямні. При виробничій необхідності такі напрямні можна проектувати для криволінійних трас, при цьому траєкторії напрямних мають бути взаємними еквідистантами, тобто віддаль між їх осями направляючих прутків має бути постійною. Розрахунок переміщення куль по такій трасі має враховувати такі параметри як кривина та, при потребі, кручення траси.

Розглянемо переміщення сферичних об'єктів радіусом  $R$  по прямолінійних паралельних напрямних виконаних із прутків радіусом  $r_1$  та  $r_2$  відповідно, віддаль між осями яких позначимо  $2c$ . Для гравітаційного



опускання куль напрямні прутки встановлені із ухилом під кутом  $\gamma$  до горизонту. Крім цього, в загальному випадку, напрямні можуть бути розташовані з певним перевищенням одна відносно другою, яке характеризується кутом  $\beta$ , відповідно рисунку 2.1.

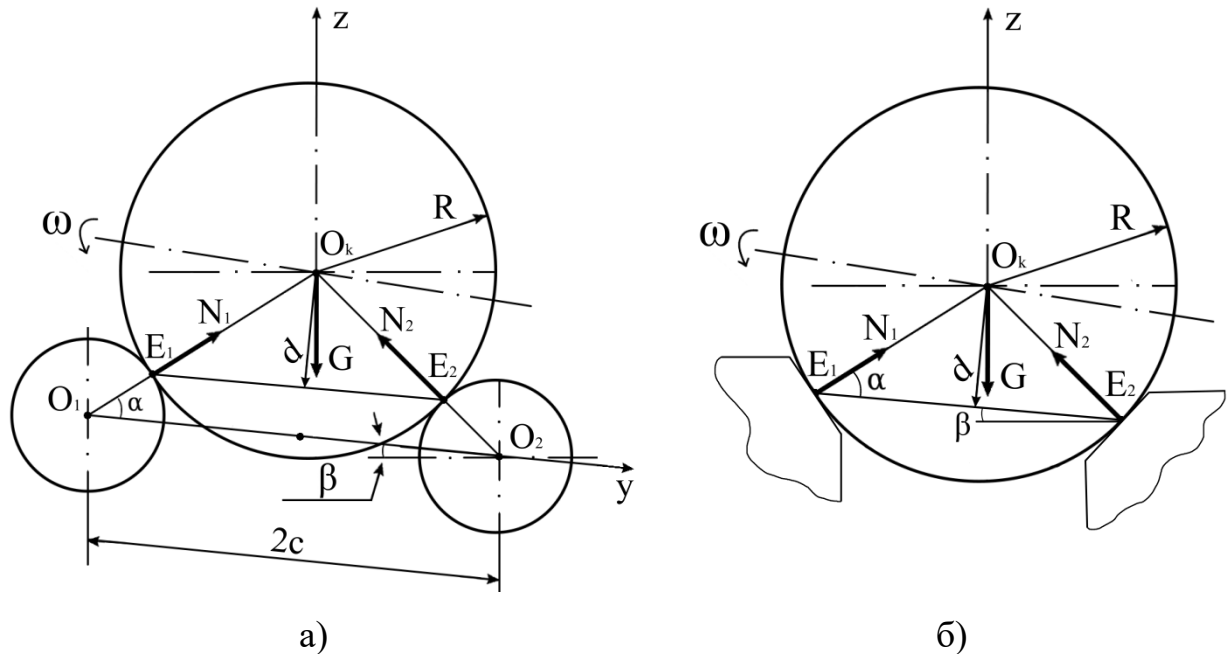


Рисунок 2.1 - Схема до розрахунку сил при переміщенні куль по гравітаційному спуску відповідно для круглих (а) та профільних (б) напрямних.

Згідно рисунку 2.1 при коченні по прямолінійних направляючих, куля під дією поздовжньої складової ваги  $G \cos \gamma$  буде переміщатись вздовж напрямних та обертатись відносно миттєвої осі  $E_1E_2$ , яка проходить через точки контакту  $E_1$  та  $E_2$ . На кулю будуть діяти нормальні сили реакції  $N_1$  та  $N_2$  спрямовані від точок контакту  $E_1$  та  $E_2$  до центру кулі і розміщені під кутом  $\alpha$  до осі обертання  $E_1E_2$ .

В загальному випадку напрямні можуть бути виконані у вигляді брусів, крайка яких має радіус закруглення чи фаску. У випадку коли робоча крайка має радіус закруглення, то розрахункова схема буде відповідати рисунку 2.1ф, де  $r_1$  та  $r_2$  будуть технологічними радіусами крайки. Якщо на

напрямних зроблені фаски, то кут  $\alpha$  визначатиметься технологічним кутом фаски, рисунок 2.1,б. , оскільки реакції будуть завжди спрямовані перпендикулярно площини фаски.

## 2.2 Визначення швидкості переміщення сферичних об'єктів по прямолінійних напрямних.

Розглянемо декартову систему координат  $Oxyz$  в якій площина  $Oxy$  утворюється двома паралельними лініями (осями напрямних жолоба), вісь  $Ox$  спрямована спрямовано в напрямку транспортування, а вісь  $Oz$  проходить через центр сферичного об'єкту та розміщена перпендикулярно площині  $Oxy$ . Для прямолінійних круглих пруткових гравітаційних спусків вісь  $Oxy$  розміщують, як правило, горизонтально. Якщо траса утворена напрямними однакового перерізу,  $r_1 = r_2 = r$ , то траса буде розміщена симетрично відносно площини  $Oxz$ . При транспортування кулі набуває лінійної швидкості  $v$ , вектор якої спрямований паралельно направляючим, кутової швидкості  $\omega$  обертання відносно миттєвої осі  $E_1E_2$ , яка проходить через точки контакту  $E_1$  та  $E_2$  кулі з напрямними.. Вісь обертання  $E_1E_2$  відстоїть від центру кулі на величину  $d$  :

$$d = R \sqrt{1 - \frac{c^2}{(R+r)^2}}. \quad (2.1)$$

Кінетична енергія поступального  $W_v$  та обертового  $W_\omega$  рухів кулі буде, відповідно: руху кулі буде:

$$W_v = \frac{mv^2}{2}; \quad W_\omega = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (2.2)$$

де  $m$  - маса кулі ;  $I$  - осьовий момент інерції суцільної кулі,  $I = 2mR^2 / 5$ . Для пустотілих тонкостінних сферичних об'єктів  $I = 2mR^2 / 3$  .

Якщо куля прокочується без проковзування, то зв'язок її кутової швидкості із поступальною буде  $\omega = v/d$ . Тоді повна кінетична енергія суцільної кулі буде  $W_k = W_v + W_\omega$ :

$$W_k = \frac{mv^2}{2} \left( 1 + \frac{2R^2}{5d^2} \right). \quad (2.3)$$

Швидкість кулі тоді можна визначити із рівності кінетичної  $W_k$  та потенціальної  $W_p$  енергії кулі,  $W_p = mg\Delta h$ , де  $\Delta h$  - зміна висоти розміщення кулі від початкової  $H$  до біжучої  $h_x$ ,  $\Delta h = H - h_x$ . Отже, умова рівності кінетичної та потенціальної енергії при відсутності втрат на тертя має вид:

$$\frac{mv^2}{2} \left( 1 + \frac{2R^2}{5d^2} \right) = mg\Delta h \quad (2.4)$$

Звідки біжуча швидкість  $v$  поступального руху кулі, поданої з висоти  $\Delta h$ , буде

$$v = \sqrt{\frac{10gd^2\Delta h}{5d^2 + 2R^2}}. \quad (2.5)$$

На рисунку 2.2 наведено зміну швидкості  $v$  кулі радіусом  $R = 0,02$  м від висоти  $\Delta h$  гравітаційного спуску для різних значень кута нахилу нормальних реакцій  $\angle O_k O_1 O_2 = \angle O_k O_1 O_2 = \alpha$ , який залежить від віддалі  $a = 2c$  між напрямними, а на рисунку 2.3 - зміну швидкості  $v$  кулі від висоти  $\Delta h$  гравітаційного спуску для різних радіусів  $R$  кулі з кутом нахилу нормальних реакцій  $\alpha = 30^\circ$ .

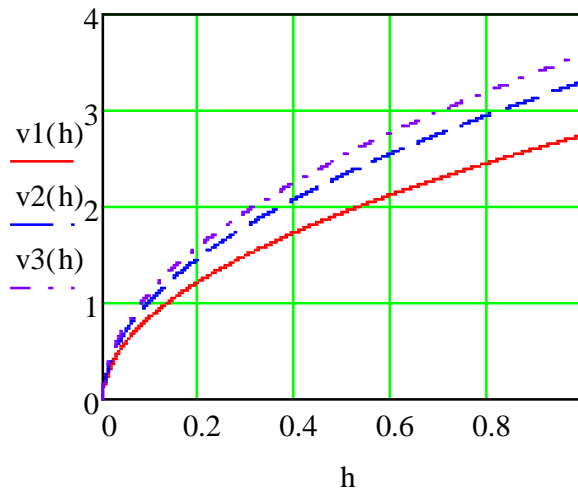


Рисунок 2.2 - Графік зміни швидкості  $v$  кулі від висоти гравітаційного спуску залежно від кута нахилу нормальних реакцій:  $v1 - \alpha = 30^\circ$ ;  $v2 - \alpha = 45^\circ$ ;  $v3 - \alpha = 60^\circ$ .

Для прямолінійних похилих напрямних рівняння траси буде  $\Delta h(X) = H - X \operatorname{tg} \gamma$ , де  $X$  - горизонтальна проекція шляху  $s$ , пройденого кулею при її опусканні на висоту  $\Delta h$ , який буде  $s = \Delta h / \sin \gamma$ . Біжуча кутова швидкість обертання кулі при транспортуванні без проковзування визначається за величиною швидкості згідно (2.5):  $\omega = v/d$ .

В напрямку руху кулі по прямих напрямних на неї буде діяти в напрямку руху поздовжня складова сили ваги  $G_x = mg \sin \gamma = \text{const}$ . Отже куля буде рухатись рівноприскорено. Оскільки куля має лінійний та обертовий рухи, то її прискорення залежатиме від приведеної маси  $m_{np} = m + I/d^2$ . Відповідно прискорення скочування кулі по прямолінійному гравітаційному спуску

$$a_g = \frac{G \sin \gamma}{m_{np}} = \frac{g \sin \gamma}{1 + 2R^2/(5d^2)} \quad (2.6)$$

Якщо жорстка куля переміщається по жолобу із плоскою жорсткою поверхнею, то вона з опорною поверхнею матиме тільки одну точку контакту і втратами від тертя кочення можна нехтувати, оскільки вони будуть

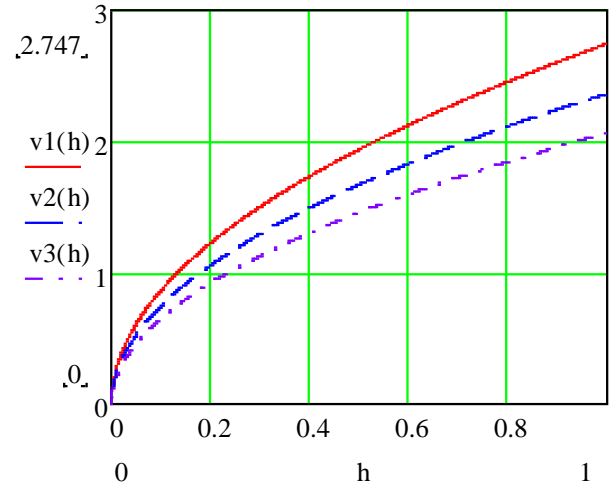


Рисунок 2.3 - Графік зміни швидкості  $v$  кулі від висоти гравітаційного спуску залежно від радіусу кулі:  $v1 - R = 0,02 \text{ м}$ ;  $v2 - R = 0,025 \text{ м}$ ;  $v3 - R = 0,03 \text{ м}$ ;

незначними і швидкість транспортування по трасі визначається за залежністю (3), де  $d = R$ . При гравітаційному транспортуванні кулі по двох паралельних напрямних сили опору від тертя можуть набувати великих значень, оскільки в точках контакту спостерігатиметься як тертя кочення так і тертя вертіння, а сумарна реакція опорної поверхні збільшується. В точках контакту вісь обертання кулі із напрямком реакції розміщується під кутом, а її вектор  $\bar{\omega} = \bar{\omega}_y$  розкладеться на складові - тангенціальну  $\omega_t = \omega d/R$ , яка відповідає за тертя кочення, та нормальну  $\omega_n = \omega \sqrt{1 - d^2/R^2}$ , внаслідок дії якої виникає тертя вертіння.

Безпосереднє визначення спільного впливу тертя кочення та вертіння є ускладнене, а тому його доцільно їх інтегральний вплив за втратою кінетичної енергії від опору переміщенню. Зокрема коефіцієнт тертя можна визначати аналогічно [1].

### 2.3 Визначення сил при гравітаційному транспортуванні сферичних об'єктів

Розглянемо загальний випадок розміщення прямолінійних напрямних гравітаційного спуску, коли вісь миттєвого обертання  $E_1E_2$  кулі розміщені під кутом  $\beta$  до горизонту. Куля утримується від переміщення в нормальній площині реакціями  $N_1$  та  $N_2$  зі сторони напрямних, які визначаються із рівнянь рівноваги сил по осях  $Oy$  та  $Oz$ .

$$\begin{aligned} \sum Y = 0; & \quad N_1 \cos(\alpha - \beta) - N_2 \cos(\alpha + \beta) = 0; \\ \sum Z = 0; & \quad N_1 \sin(\alpha - \beta) + N_2 \sin(\alpha + \beta) - G \cos \gamma = 0, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де  $\alpha$  - кут нахилу вектора нормальної реакції напрямної до миттєвої осі обертання кулі,  $\alpha = \arcsin [c/(R + r)]$ ;  $\gamma$  - кут нахилу траси до горизонту;  $G$  - вага кулі,  $G = mg$ .

Почергово помножуємо перше рівняння на  $\sin(\alpha + \beta)$  а друге на  $\cos(\alpha + \beta)$ , і додаємо, потім перше рівняння на  $-\sin(\alpha - \beta)$  а друге на  $\cos(\alpha - \beta)$  та їх додаємо і отримуємо:

$$\begin{aligned} N_1[\cos(\alpha - \beta) \sin(\alpha + \beta) + \cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta)] - G \cos \gamma \cos(\alpha + \beta) &= 0; \\ N_2[\cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta) \sin(\alpha + \beta)] - G \cos \gamma \cos(\alpha - \beta) &= 0. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Із (2.7) нормальні реакції зі сторони напрямних будуть

$$\begin{aligned} N_1 &= mg \cos \gamma \cos(\alpha + \beta) / \sin(2\alpha); \\ N_2 &= mg \cos \gamma \cos(\alpha - \beta) / \sin(2\alpha). \end{aligned} \quad (2.9)$$

На рис. 2.4 та рис. 2.5 наведено графік нормальних реакцій  $N_1$  та  $N_2$  напрямних радіусом закруглення контактної крайки  $r_1 = r_2 = r = 0,005$  м на кулю радіусом  $R = 0,02$  м для випадку розміщення напрямних з боковим нахилом траси (осі  $O_1O_2$ )  $\beta = 10^\circ$  та тих же реакцій  $N_1 = N_2 = N_0$  для горизонтального розміщення ( $\beta = 0^\circ$ ) осі  $O_1O_2$  траси. Зокрема рис. 2.4 наведено графік зміни реакцій від віддалі  $a = 2c$  між осями напрямних, а на рис. 2.5 - від віддалі  $d$  центра кулі до миттєвої осі обертання  $E_1E_2$ .

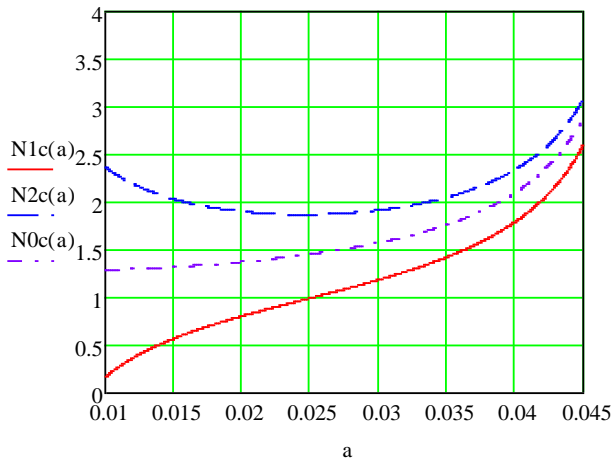


Рисунок 2.4 - Залежність

величин нормальних реакцій напрямних радіусом  $r = 0,005$  м на кулю радіусом  $R = 0,02$  м, відповідно  $N_1$  та  $N_2$  для перевищення  $\beta = 10^0$  і  $N_0$  для перевищення  $\beta = 10^0$  від величини міжосьової віддалі  $a = 2c$ .

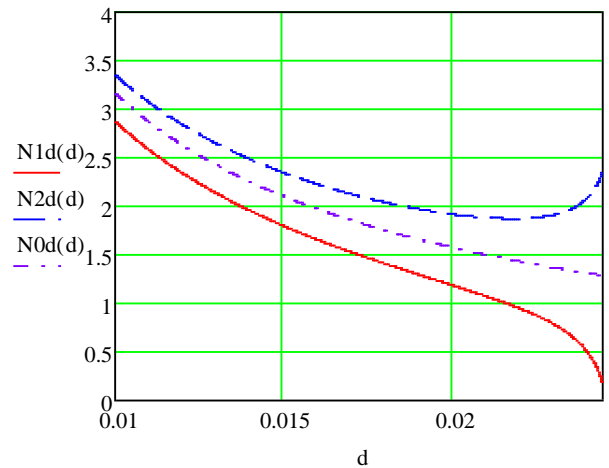


Рисунок 2.5 Залежність величин

нормальних реакцій напрямних радіусом  $r = 0,005$  м на кулю радіусом  $R = 0,02$  м, відповідно  $N_1$  та  $N_2$  для перевищення  $\beta = 10^0$  і  $N_0$  для перевищення  $\beta = 10^0$  від миттєвого радіуса обертання кулі  $d$ .

На рис. 2.6 наведено зміну нормальних реакцій та напрямних радіусом закруглення контактної крайки м на кулю радіусом м від кута поперечного нахилу траси при куті поздовжнього .

Кут нахилу траси до горизонту  $\gamma$  повинен бути достатнім для подолання сил тертя між направляючими та кулею і, відповідно, для забезпечення гравітаційного транспортування. Перекочування кулі відбувається під дією моменту  $M_y = mgR \sin \gamma$  від поздовжньої складової сили ваги  $G_x = G \sin \gamma$ . При контакті кулі з направляючими в точках  $E_1$  та  $E_2$ , утворюється пляма контакту, яка при коченні має тангенціальне зміщення площадки контакту від сили  $\delta_i = Nv / (4aG_{zc})$ , де  $a_i$  - радіус площадки контакту;  $v$  та  $G_{zc}$  - відповідно коефіцієнт Пуассона і модуль зсуву

матеріалів в зоні контакту. Момент пари  $M_y = N \cdot \delta$  чинить опір повороту тіла і називається моментом опору кочення.

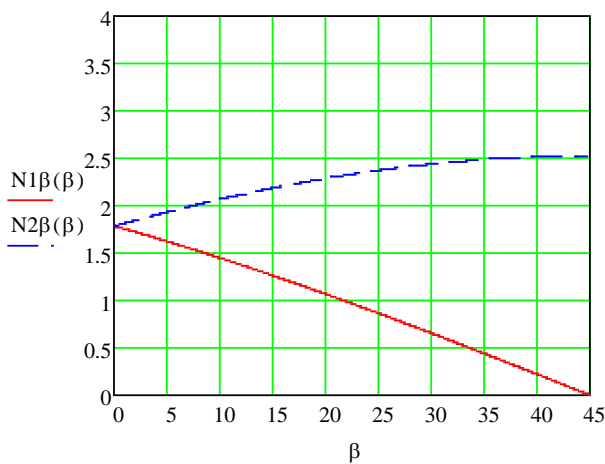


Рисунок 2.6 - Залежність

величин нормальних реакцій  $N_1$  та  $N_2$  напрямних радіусом  $r = 0,005\text{ м}$  на сталеву кулю радіусом  $R = 0,02\text{ м}$ , від кута перевищення  $\beta$  для кута нахилу траси  $\alpha = 45^\circ$ .

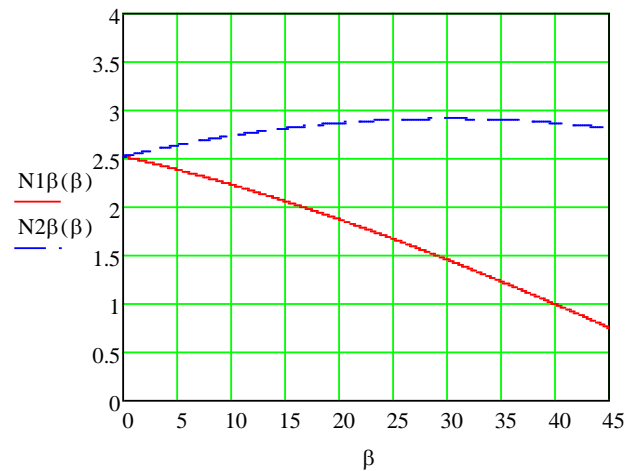


Рисунок 2.7 - Залежність

величин нормальних реакцій  $N_1$  та  $N_2$  напрямних радіусом  $r = 0,005\text{ м}$  на сталеву кулю радіусом  $R = 0,02\text{ м}$ , від кута перевищення  $\beta$  для кута нахилу траси  $\alpha = 30^\circ$ .

Якщо напрямні встановлені з перевищенням, тобто вісь спрямована під кутом до горизонталі, то моменту опору на напрямних будуть різновеликі, тобто  $M_{\tau 1} = N_1 \delta$  та  $M_{\tau 2} = N_2 \delta$ .

Внаслідок тертя кулі при її частковому повороті відносно осі  $O_1 O_k$  на першій направляючій, чи відносно  $O_2 O_k$  на другій в точках контакту  $E_1$  та  $E_2$  виникає опір вертіння  $M_{ni} = N_i \lambda$  - коефіцієнт тертя вертіння, має розмірність довжини (метр, сантиметр), малий за величиною (у 5 – 10 разів менший за коефіцієнт тертя кочення  $\lambda < \delta$ ).

Нехай куля в процесі гравітаційного спуску з висоти  $\Delta h$  пройде шлях  $s = \Delta h \sin \gamma$ . За цей час вона обертатиметься і величина обертання відносно осі визначається кутом  $\theta = s / (2\pi d) = \Delta h / (2\pi d \sin \gamma)$ . Обертання відносно осі



$E_1E_2$  - це складний рух, який в точках контакту  $E_1$  та  $E_2$  має складові вертіння відносно осей  $O_1O_k$  та  $O_2O_k$  на кут  $\theta_n = \omega_n \Delta t = \omega \Delta t \sqrt{1 - d^2/R^2}$  та кочення на кут  $\theta_\tau = \omega_\tau \Delta t = \omega \Delta t d/R$  відносно осі, яка розміщена тангенціально до поверхні напрямної. Враховуючи, що  $\omega \Delta t = \theta = \Delta h / (2\pi d \sin \gamma)$  кути кочення та вертіння будуть:

$$\theta_\tau = \frac{\Delta h}{2\pi R \sin \gamma} \quad \text{та} \quad \theta_n = \frac{\Delta h \sqrt{1 - d^2/R^2}}{2\pi d \sin \gamma} \quad (2.10)$$

Відповідно, при переміщенні на шлях  $s$  потрібно для кожної напрямної затратити енергію на подолання робіт  $A_{i\tau} = M_{\tau i} \theta_\tau$  та  $A_{in} = M_{ni} \theta_n$  виконуються моментами опору від тертя кочення  $M_{\tau i} = N_i \delta$  та вертіння  $M_{ni} = N_i \lambda$ . Сумарна робота моментів опору по двох напрямних буде  $A_\theta = A_{1\tau} + A_{2\tau} + A_{1n} + A_{2n}$ .

$$A_\theta = \frac{\Delta h (N_1 + N_2)}{2\pi R \sin \gamma} \left( \delta + \frac{\lambda \sqrt{R^2 - d^2}}{d} \right) \quad (2.11)$$

Із врахуванням втрат на подолання опору відтертя умова збереження енергії буде  $W_k$

$$mg\Delta h = \frac{mv^2}{2} \left( 1 + \frac{2R^2}{5d^2} \right) + \frac{\Delta h (N_1 + N_2)}{2\pi R \sin \gamma} \left( \delta + \frac{\lambda \sqrt{R^2 - d^2}}{d} \right) \quad (2.12)$$

$$\text{Згідно (2.9) } N_1 + N_2 = \frac{mg \cos \gamma [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]}{\sin(2\alpha)} = \frac{mg \cos \gamma \cos \beta}{\sin \alpha}.$$

Із врахуванням втрат на тертя залежність (3) для визначення швидкості поступального руху кулі, поданої з висоти  $\Delta h$  прийме вид,

$$v = \sqrt{\frac{10gd\Delta h [1 - \cos \gamma \cos \beta (\delta d + \lambda \sqrt{R^2 - d^2}) / (2\pi R \sin \gamma \sin \alpha)]}{5d^2 + 2R^2}} \quad (2.13)$$

У випадку, коли сили тертя суттєві, вони впливають на прискорення та час руху кулі. Із врахуванням опору від тертя  $F_{on} = (N_1 + N_2)(\delta + \lambda\sqrt{(R/d_-)^2 - 1})$ , прискорення

$$a_g = \frac{G \sin \gamma}{m_{np}} = \frac{g[\sin \gamma - \cos \gamma \cos \beta (\delta d + \lambda \sqrt{R^2 - d^2}) / \sin \alpha]}{1 + 2R^2 / (5d^2)} \quad (2.14)$$

#### 2.4 Гравітаційне транспортування сферичних об'єктів по криволінійних трасах.

Розглянемо плоске вертикальне розміщення напрямних, висота траєкторії траси буде змінною шляху  $X$  горизонтального переміщення,  $h(X)$ . Тоді зміна висоти по трасі буде  $\Delta h(X) = H - h(X)$ . В кожній точці траси тангенс кута її нахилу визначається диференціюванням функції закону зміни висоти. Тоді біжучий кут нахилу

$$\gamma(X) = |\arctg h'(X)| \quad (2.15)$$

Розрахункова схема розподілу реакцій в поперечному перерізі траси не буде відрізнятись від рисунка 2.1 чи 2.2. Проте крім сили ваги на кулю діятиме ще відцентрова сила  $P$  від кривини траєкторії переміщення кулі  $K_0$  за залежністю  $P = mv^2 K_0$ . Кривина траси  $K_E$  визначається за формулою

$$K_E = \frac{|h''(X)|}{\sqrt{\{1 + [h'(X)]^2\}^{(3/2)}}} \quad (2.16)$$

Радіус кривини траси буде  $\rho_E = 1/K_E$ . Відповідно радіус кривини траєкторії руху буде  $\rho_0 = \rho_E - d = 1/K_E - d$ . А кривина траєкторії руху

$$K_0 = 1/\rho_0 = \frac{K_E}{1 - K_E d}. \quad (2.17)$$

Сили реакції кожній точці траси будуть змінюватись в часі, оскільки буде змінюватись як кут нахилу, так і кривина траси при їх розрахунку, крім складової сили ваги, потрібно враховувати дію відцентрової сили  $G \cos \gamma$ . Тоді залежності (2.) для випадку гравітаційного спуску по по плоскій вертикальній криволінійній трасі матимуть вид

$$\begin{aligned} N_1 &= m(g \cos \gamma + v^2 K_0) \cos(\alpha + \beta) / \sin(2\alpha); \\ N_2 &= m(g \cos \gamma + v^2 K_0) \gamma \cos(\alpha - \beta) / \sin(2\alpha). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Для вертикальних плоских гравітаційних спусків швидкість руху розраховується, як і для прямолінійного, за залежністю (2.12) із врахуванням відповідного закону зміну висоти по трасі та кута нахилу траси. Прискорення руху кулі по напрямним залежить від змінних сили опору

$$F_{on} = mg \cos \gamma \cos \beta (\delta d + \lambda \sqrt{R^2 - d^2}) / \sin \alpha,$$

$$a_g = \frac{G \sin \gamma}{m_{np}} = \frac{g[\sin \gamma - \cos \gamma \cos \beta (\delta d + \lambda \sqrt{R^2 - d^2})]}{1 + 2R^2 / (5d^2)}, \text{ м/с}^2, \quad (2.20)$$

Тут  $\delta$  та  $\lambda$  - відповідно коефіцієнти тертя кочення та вертіння, м.

Гвинтові спуски із криволінійними траєкторіями використовуються щоб уникнути ударів в зоні вивантаження. Якщо вивантаження проходить на плоску горизонтальну поверхню то похідна від функції траси в зоні вивантаження має бути рівна нулю.

Розглянемо приклад розрахунку вертикального гвинтового спуску, з коловою траєкторією постійним радіусом  $\rho_E = R_E$ . Нехай дано висоту спуску  $H$  та довжину горизонтальної проекції траси  $L$ .

Приймемо базову систему координат  $O'XYZ$ , в якій вісь  $O'Z$  спрямована вертикально і проходить через зону завантаження, а вісь  $O'X$  - горизонтально по напрямку транспортування і проходить через зону вивантаження. Тоді координати точки (зони) завантаження  $A_1(0; H)$  а

точки (зони) вивантаження -  $A_2(L;0)$ . Рівняння колової траси в базовій системі координат гравітаційного спуску має вид

$$h(X) - Z_T = Z - Z_T = \sqrt{\rho_T^2 - (X - X_T)^2}, \quad (2.21)$$

де  $\rho_T$  - радіус кривини траси;  $X_T$  та  $Z_T$  - координати центру колової траси. Оскільки траса проходить через точки  $A_1(0;H)$  та  $A_2(L;0)$ , запишемо систему для визначення координат центру колової траси.

$$\begin{cases} (H - Z_T)^2 = \rho_T^2 - X_T^2 \\ Z_T^2 = \rho_T^2 - (L - X_T)^2 \end{cases} \quad (2.22)$$

Умовою горизонтального вивантаження для колової траси є умова  $X_T = L$ . Тоді, із системи (2.22) отримуємо  $Z_T = \rho_T = (L^2 + H^2)/(2H)$ . Із врахуванням (2.21), рівняння траєкторії траси в цьому випадку буде

$$h(X) = (L^2 + H^2)/(2H) - \sqrt{(L^2 + H^2)^2/(2H)^2 - (L - X)^2} \quad (2.23)$$

Для розглядуваного випадку біжучий кут нахилу траси буде

$$\gamma = \arccos[(L - X)/\rho_T] = \arccos[2H(L - X)/(L^2 + H^2)]$$

Всі подальші розрахунки проводяться згідно залежностей (2.16-2.20)

Частковим випадком криволінійної траси для транспортування куль колова горизонтальна траса, по якій проводиться горизонтальне переміщення під дією інерції.

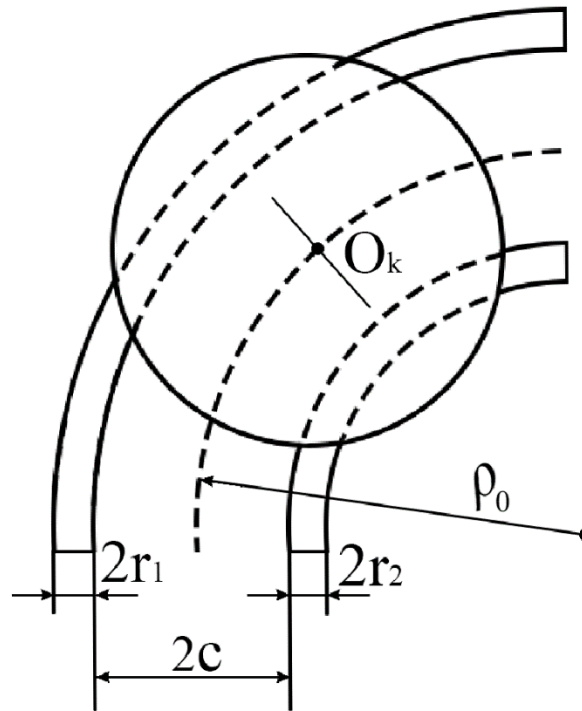


Рисунок 2.8 - Схема до розрахунку сил при переміщенні куль по горизонтальній коловій трасі під дією інерції.

Для розрахунку реакцій використовуємо метод кінетостатики. Згідно рисунку 2.1в нормальній площині діють реакції  $N_1$  та  $N_2$  зі сторони напрямних, які спрямовані до центру кулі. Через центр проходять об'ємні сили. Це сила ваги  $G = mg$  та відцентрова сила  $F_n = mv^2 / \rho_0$ , де  $\rho_0$  - радіус кривини серединної лінії траси. Із врахуванням сили інерції записуємо систему рівнянь рівноваги сил по осях  $Oy$  та  $Oz$  згідно методу кінетостатики:

$$\begin{aligned} \sum Y = 0; & \quad N_1 \cos(\alpha - \beta) - N_2 \cos(\alpha + \beta) - mv^2 / \rho_0 = 0; \\ \sum Z = 0; & \quad N_1 \sin(\alpha - \beta) + N_2 \sin(\alpha + \beta) - G \cos \gamma = 0, \end{aligned} \quad (2.24)$$

Почергово помножимо перше рівняння на  $\sin(\alpha + \beta)$  а друге на  $\cos(\alpha + \beta)$ , і додаємо, потім перше рівняння на  $-\sin(\alpha - \beta)$  а друге на  $\cos(\alpha - \beta)$  та їх додаємо і отримуємо:

$$\begin{aligned} N_1[\cos(\alpha - \beta) \sin(\alpha + \beta) + \cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta)] - G \cos \gamma \cos(\alpha + \beta) - mv^2 \sin(\alpha + \beta) / \rho_0 &= 0; \\ N_2[\cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta) \sin(\alpha + \beta)] - G \cos \gamma \cos(\alpha - \beta) + mv^2 \sin(\alpha - \beta) / \rho_0 &= 0. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Із (2.7) нормальні реакції зі сторони напрямних будуть

$$\begin{aligned} N_1 &= m[g \cos \gamma \cos(\alpha + \beta) - v^2 \sin(\alpha + \beta) / \rho_0] / \sin(2\alpha); \\ N_2 &= m[g \cos \gamma \cos(\alpha - \beta) + v^2 \sin(\alpha - \beta) / \rho_0] / \sin(2\alpha). \end{aligned} \quad (2.26)$$

Проте розподіл сил тертя буде зовсім інший. Для прямолінійної чи вертикальної трас в процесі переміщення вектор осі обертання  $E_1E_2$  не змінює свого напрямку. У випадку горизонтальної колової чи довільної просторової траси, вектор в просторі змінний. Так для горизонтальної колової траси довжина зовнішньої напрямної більша, що призводить до додаткового повороту кулі відносно вертикальної осі і до проковзування кулі, яка намагається зберегти попередній напрям обертального руху. В цьому випадку, крім тертя кочення та вертіння, які є незначними, появляється тертя ковзання, яке на порядок більше. Це призводить до швидшого спрацьовування робочих поверхонь та можливої втрати стійкості, оскільки сприяє виходу кулі із русла. А тому таке розміщення траси не знайшло широкого поширення.

## 2.5. Методика експериментального визначення втрат на тертя при гравітаційному спуску сферичних об'єктів

Як вказано в розділі 2.2 при гравітаційному транспортуванні сферичних об'єктів без проковзування, коефіцієнт тертя куль для прямих трас має складові тертя кочення та вертіння. Для просторових трас вісь обертання куль змінюватиметься що спричинятиме зміщення поверхонь сферичних об'єктів і напрямних в точці контакту і появу складових сил тертя ковзання. Зокрема, при переміщенні куль по жолобу, утвореному двома

прутковими направляючими траєкторія яких має кривину, в точках контакту проходить взаємне зміщення поверхонь, яке характерне для ковзання, що робить складним чи неможливим аналітичне визначення коефіцієнту динамічного тертя сферичних об'єктів до напрямних траси.

В розділі 2.2 показано, що розміщення напрямних жолоба та втрати на тертя призводять до суттєвих змін кінематики транспортування і їх оцінка впливає на роботу автоматизованих транспортних систем та важлива для прийняття правильних конструктивних рішень. Для підтверження отриманих теоретичних результатів чи безпосередньої оцінки сил тертя для складних трас використовують непрямі методи експериментального визначення коефіцієнту тертя. Одним із таких методів є порівняння часу проходження певної траси за наявності тертя та при його відсутності.

Зокрема при відсутності тертя із умови збереження кінетичної та потенціальної енергії кінцева швидкість не круглих тіл, які не мають обертового руху, при переміщенні по трасі з перепадом висот  $\Delta h$  буде  $v = \sqrt{2g\Delta h}$ , звідки теоретичне значення часу  $t_T$  переміщення кулі на цій ділянці без тертя буде

$$t_T = \int_0^S \frac{ds}{\sqrt{2g\Delta h(s)}} \quad , \quad (2.27)$$

де  $s$  - біжуча довжина траси від 0 до  $S$ ; Тут  $\Delta h = H - h$ , де  $H$  і  $h$  - початкова та кінцева висоти розміщення траси

При транспортуванні куль вони проходять трасу як з лінійними так і з обертовими переміщеннями, а тому набувають кінетичної енергії поступального та обертового рухів (2.3). Відповідно, залежність (2.13) набуде вигляду

$$t_T = \int_0^S \sqrt{\frac{5d^2 + 2R^2}{10gd^2\Delta h(s)}} ds \quad (2.28)$$

При подоланні опору від втрат на тертя час проходження траси кулею збільшується і його можна визначити експериментально.

Для прямолінійних трас з кутом нахилу  $\gamma$  комплексний коефіцієнт тертя  $\mu_{\partial}$  при динамічному переміщенні можна встановити аналогічно [1]:

$$\mu_{\partial} = \left[ 1 - \left( \frac{t_0}{t_E} \right) \right] \operatorname{tg} \gamma , \quad (2.29)$$

де  $t_0$  - час руху без урахування сили тертя згідно (2.14);  $t_E$  - час руху з урахування сили тертя по похилій площині за експериментальними результатами.

Час проходження сферичних об'єктів по трасі визначається з допомогою безконтактних датчиків, що зменшує похибку вимірювань через відсутність суб'єктивних факторів. Провертання куль при транспортуванні, можливість проковзування при коченні та інші кінематичні параметри можна оцінити швидкісною зйомкою. Для експериментального встановлення кінематики транспортування куль, зокрема визначення коефіцієнтів тертя, розроблена установка елементи якої виготовлялись методом 3-D друку, рисунок 2.8. Установка також дозволяє експериментально досліджувати інші транспортні операції, зокрема подавання куль на позицію гравітаційного транспортування гвинтовим підйомником із мінною швидкістю обертання гвинта. Керування кінематикою установки здійснюється частотним перетворювачем.



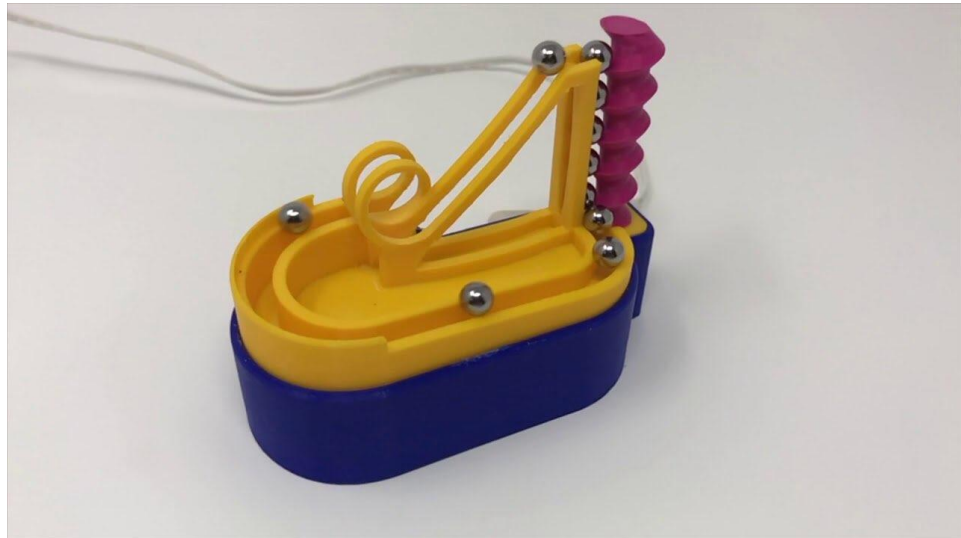


Рисунок 2.8. Установка для експериментального визначення динамічних коефіцієнтів тертя кульових об'єктів.

## **2.6 Розробка автоматизованої системи транспортування кулястих об'єктів.**

Для проведення дослідження транспортної системи пропонується реалізувати систему керування на базі програмованого контролера ESP 32, який володіє вбудованим WiFi модулем і має хорошу надійність, ціну та компактність. До того ж, використовуючи відкрите і безкоштовне програмне забезпечення App Inventor ми можемо розробити мобільний додаток для проведення керування системою та вибору основних налаштувань.

Структурна схема системи приведена на рис. 2.9.

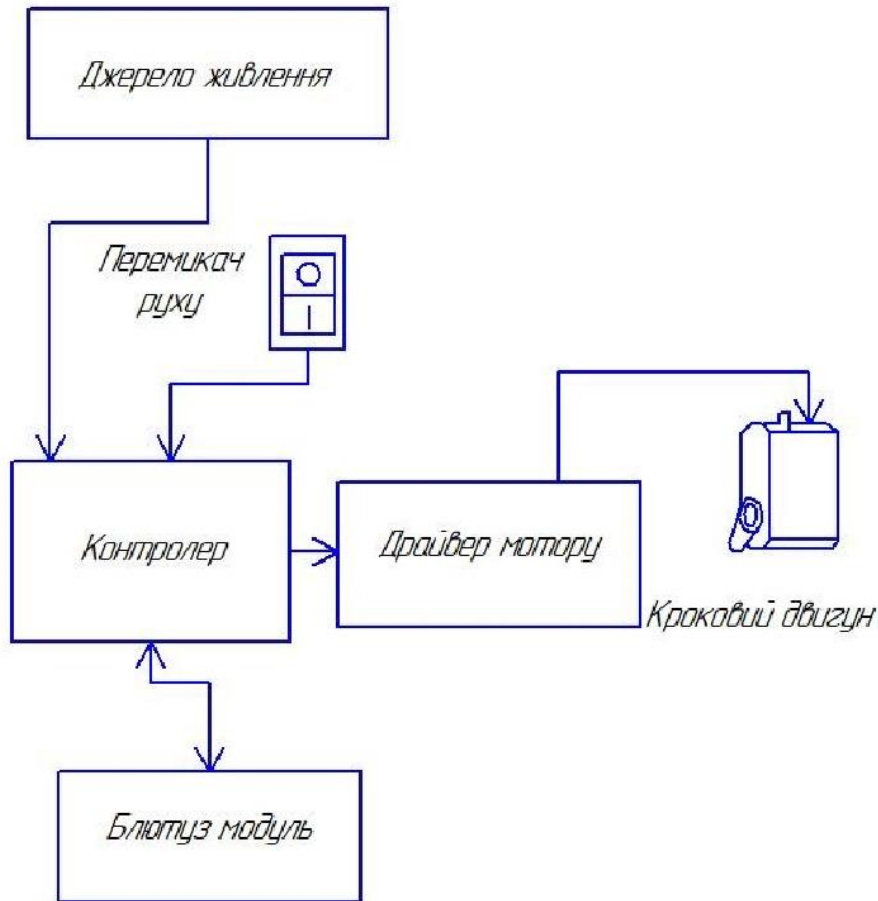


Рисунок 2.9 - Структурна схема

Структурна схема включає в себе: джерело живлення, контролер, перемикач руху, драйвер мотору, кроковий двигун і блютуз модуль.

Контролер виконує основну програму та виступає у ролі мозку системи, живить його джерело живлення. Він з'єднаний з блютуз модулем, перемикачем руху, та драйвером мотору. Перемикач руху це фактично дозвіл на запуск програми, без його увімкнення програма не буде виконуватись. З'єднання з смартфоном та обмін даними відбувається за допомогою блютуз модуля. Драйвер мотору отримує команди від контролера і в залежності від них керує кроковим двигуном.

На основі структурної схеми розроблено алгоритм програми зображений на рисунку 2.10

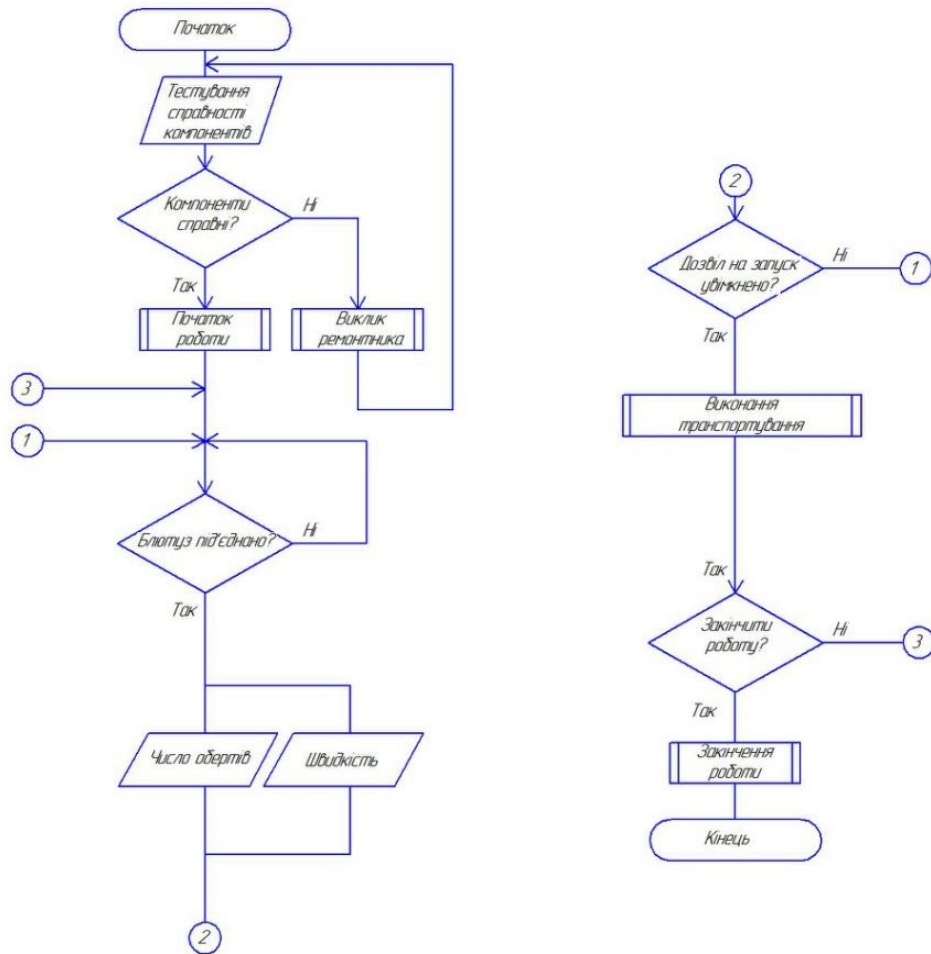


Рисунок 2.10 – Алгоритм роботи програми

Алгоритм програми на першому етапі аналізує чи готові усі компоненти до роботи проводячи тестування усіх елементів по чергово. Якщо усі елементи справні та готові до роботи програма продовжує слїдувати алгоритму, у рази виявлення несправностей програма сповістить користувача про проблему, якщо це велике виробництво то є можливість налаштувати щоб програма одразу викликала ремонтну службу.

Наступний крок алгоритму це перевірка наявного підключеного блютуз пристрою. За наявності підключеного пристрою, ми отримуємо вхідні дані з програми а саме: швидкість та число обертів.

Перед основним запуском установки проводиться перевірка наявності дозволу на запуск. Якщо дозвіл отримано відбувається виконання основної

програми – транспортування. Після виконання основної програми проводиться запит на закінчення роботи, або продовження.

На основі створеного алгоритму програми за допомогою безкоштовного програмного забезпечення AppInventor було створено мобільний додаток зображений на рисунку 2.11.

Інтерфейс програми складається з двох блоків, обираючи число повторів та обираючи швидкості. Число повторів можна обрати натиснувши на кнопку з потрібною кількістю повторів. Швидкість можна ввести в ручну або обрати за допомогою повзунка. Рекомендовано використовувати швидкість від 69 об\хв до 225 об\хв. Усі дані затверджуються після натискання кнопок.



Рисунок 2.11 – Інтерфейс програми

Розроблена програма з'єднується по блютузу (рис 2.12) до установки та передає дані у режимі реального часу. Повний код зображено на рисунку 2.13.

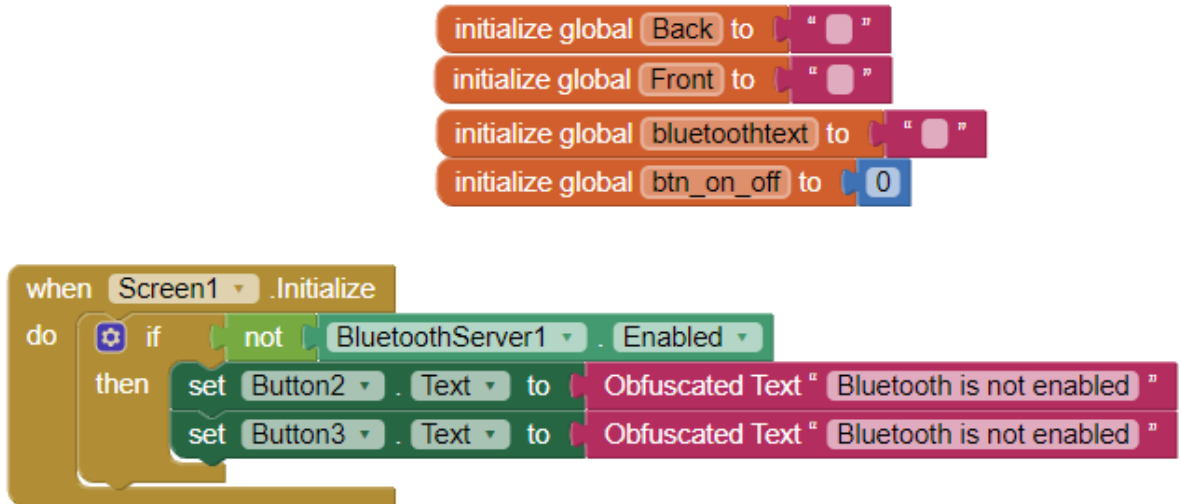


Рисунок 2.12 – Код програми під'єднання до блютузу

## 2.7 Дослідження взаємодії сферичних тіл в потоці

Подача сферичних об'єктів, як правило проводиться із накопичувальних систем, наприклад бункерів, де вони взаємодіють між собою, зокрема в потоці при вивантаженні та завантаженні. Дослідження руху і взаємодії об'єктів (частинок) сферичної форми у потоці можна реалізувати, використовуючи метод обчислювального експерименту, який передбачає побудову повної моделі аналога об'єктів та процесу взаємодії, коли переміщення кожної окремої частинки, її форма всі взаємодії встановлюються за допомогою електронно-обчислювальної машини (ЕОМ) відповідно до фактичного процесу. Об'єкти взаємодії представляються у вигляді алгебро-логічних функцій (R-функцій), які утворюють скалярне поле одиничного градієнту в навколишній області об'єкту.

```

when Button4 .Click
do set global btn_on_off to 1

when Button5 .Click
do set global btn_on_off to 0

when Clock1 .Timer
do
  if BluetoothServer1 .IsConnected
  then
    if call BluetoothServer1 .BytesAvailableToReceive > 0
    then
      set global bluetoothtext to call BluetoothServer1 .ReceiveText
      numberOfBytes call BluetoothServer1 .BytesAvailableToReceive
      set global Front to segment text get global bluetoothtext
      start 1
      length starts at text get global bluetoothtext
      piece " "
      set global Back to segment text get global bluetoothtext
      start 4
      length 3
      set Button2 .Text to get global Front
      set Button3 .Text to get global Back

    if get global Front = 250
    then
      set Button2 .BackgroundColor to green
      set Button2 .Text to get global Front

    if get global Front = 130
    then
      set Button2 .BackgroundColor to cyan
      set Button2 .Text to get global Front

    if get global Front = 0
    then
      set Button2 .BackgroundColor to red
      set Button2 .Text to get global Front

    if get global Back = 250
    then
      set Button3 .BackgroundColor to green
      set Button3 .Text to get global Front

    if get global Back = 130
    then
      set Button3 .BackgroundColor to cyan
      set Button3 .Text to get global Front

    if get global btn_on_off = 1
    then
      call BluetoothServer1 .SendText
      text "1"

```

Рисунок 2.13 – Код програми мобільного додатку

Це дозволяє встановлювати взаємне розташування об'єктів залежно від рівнів їх полів. Для кожної елементарної поверхні, що обмежує об'єкт, функції мають такий вигляд:  $f_i(x, y, z, t) = 0$  [1,2].

Для кульового об'єкта взаємодії, який моделюється сферичною поверхнею, алгебраїчна функція, що його описує, у власній системі координат, має вигляд функції центрального (сферичного) поля:

$$f_i(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - r_i, \quad (2.30)$$

де  $r_i$  - радіус  $i$ -ої сфери (кулі).

Якщо  $f_i(x, y, z) = 0$ , то рівняння (1) описує множину точок  $E_i(x, y, z)$ , що лежать на сфері (поверхні кулі), якщо  $f_i(x, y, z) < 0$ , то множину точок  $B_i(x, y, z)$ , що лежать в тілі кулі, причому значення функції  $f_i$  буде відповідати віддалі внутрішньої точки  $B_i(x, y, z)$  до поверхні кулі. Точки  $A_i(x, y, z)$ , для яких  $f_i(x, y, z) > 0$ , лежатимуть поза сферою, а значення  $f_i$  відповідатиме віддалі до її поверхні.

Для таких функцій вектор нормалі  $\bar{n}$  до поверхні об'єкту рівний вектору градієнту функції, тобто  $|\text{grad } f| = 1$ :

$$\bar{n} = \text{grad } f_i(x, y, z) = \frac{x \cdot \bar{i}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{y \cdot \bar{j}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{z \cdot \bar{k}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (2.31)$$

Для сфери (поверхні кулі), центр ваги  $O_i(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})$  якої переміщається із швидкістю  $\bar{v}_i = v_{ix}\bar{i} + v_{iy}\bar{j} + v_{iz}\bar{k}$ , залежність (1) прийме вигляд

$$f_i(x, y, z, t) = \sqrt{(x - x_{i0} + v_{ix}t)^2 + (y - y_{i0} + v_{iy}t)^2 + (z - z_{i0} + v_{iz}t)^2} - r_i = 0. \quad (2.32)$$

Опис цих об'єктів залежностями (1), (2) упрощує висування постановок задач щодо дослідження взаємодії об'єктів з поверхнями. Функції, що характеризують робочі поверхні, виконують роль обмежень, які впливають на переміщення та взаємодію сферичних об'єктів між собою або з робочими поверхнями. Робочі поверхні жолобів, робочих органів, які

утворені тілами обертання або плоскими поверхнями, також можна представити у вигляді функцій градієнту одиничного значення. Наприклад, для плоскої поверхні, що здійснює паралельне переміщення з певною швидкістю у заданому напрямку, можна визначити таку залежність:

$$f_j(x, y, z, t) = \alpha_{nx}(x - x_{j0} + v_{jx}t) + \alpha_{ny}(y - y_{j0} + v_{jy}t) + \alpha_{nz}(z - z_{j0} + v_{jz}t) = 0, (2.33)$$

де  $\alpha_{nx}$ ,  $\alpha_{ny}$  та  $\alpha_{nz}$  – це значення косинусів кутів між нормаллю до поверхні кулі та віссю координат плоскої поверхні.  $x_{j0}$ ,  $y_{j0}$ ,  $z_{j0}$  - значення координат початкової точки поверхні в певний момент часу  $t=0$ ;  $v_{jx}$ ,  $v_{jy}$ ,  $v_{jz}$  - компоненти цієї швидкості руху робочої поверхні.

Ця змінна відстань між робочою поверхнею (4) і кулею (3) буде.

$$l_{ji} = \alpha_{nx}[x_{i0} - x_{j0} + (v_{jx} - v_{ix})t] + \alpha_{ny}[y_{i0} - y_{j0} + (v_{jy} - v_{iy})t] + \alpha_{nz}[z_{i0} - z_{j0} + (v_{jz} - v_{iz})t] - r_i \quad (2.34)$$

Біжуча віддаль між двома кулями  $O_i$  та  $O_k$ .

$$l_{ik} = \sqrt{[x_{k0} - x_{i0} + (v_{ix} - v_{kx})t]^2 + [y_{k0} - y_{i0} + (v_{iy}t - v_{ky})]^2 + [z_{k0} - z_{i0} + (v_{iz} - v_{kz})t]^2} - r_i - r_k \quad (2.35)$$

Залежності (5) та (6) використовують для оцінки зближення двох об'єктів, їх контакту ( $l_{ji} = 0$ ,  $l_{ik} = 0$ ).

## 2.8. Силова взаємодія куль між собою та з робочими поверхнями

Розглянемо взаємодію двох об'єктів. В теорії удару приймаються допущення миттєвості удару об'єктів, де основні параметри взаємодії відповідають закону збереження кількості руху. Таке припущення приводить до значного спрощення розрахункової моделі взаємодії, але вона недопустима для взаємодії одночасно декількох об'єктів, руху їх в потоці і т.д., де допущення миттєвості контакту втрачає сенс.



Одним із найбільш прийнятних шляхів розв'язку задач взаємодії декількох об'єктів є побудова моделі на основі пружної взаємодії об'єктів, яка при малих кінетичних енергіях об'єктів має реальний фізичний зміст.

Розглянемо взаємодію двох кулі радіусами відповідно  $R_1$  та  $R_2$ . В результаті їх пружної взаємодії в зоні контакту виникає кругова площа контакту радіусом  $a$ , а тіла зближаться між собою на віддаль, меншу суми радіусів на величину  $\Delta$ , яку називають мірою жорсткого зближення центрів тіл в процесі пружної деформації в околі точки контакту:  $\Delta = R_1 + R_2 - S$ , де  $S$  - міжцентрова віддаль між об'єктами в період жорсткого стиску.

Згідно розв'язку задачі Герца, сила ударної взаємодії двох тіл при пружному контакті:

$$P_{ij} = k_{ij} a_{ij} \Delta h_{ij} = [k_{ij} / (K_i + K_j)^{1/2}] (\Delta h_{ij})^{3/2}, \quad (2.36)$$

де  $k_{ij} = 4/(3\pi q_{ij})$ - коефіцієнт, що враховує пружні властивості тіла контакту;

$a_{ij}$  - розрахунковий радіус площадки контакту,  $K_i, K_j$ - кривизни поверхонь частинок в точці контакту.

Для реальних випадків взаємодії частинок доцільно прийняти за універсальну апроксимаційну степеневу залежність, що з достатньою для практичних цілей точністю, моделює силову взаємодію тіл, [16]:

$$P_{ij} = k_{ij} a_{ij} \gamma \Delta h_{ij}^\delta \quad (2.37)$$

Адекватність таких моделей із реальним процесом взаємодії досягається підбором коефіцієнтів приведення  $k_{ij}, \gamma, \delta$ , які визначають при експериментальних дослідженнях і статистичних випробуваннях.

Якщо розглянути взаємодію двох тіл в просторі, то алгоритми визначення цих величин навіть для простих тіл мають індивідуальний характер і потребують складання індивідуальних програм для кожного типового випадку зіткнення.

Уніфікація моделей процесів зіткнення можлива шляхом опису навколо тіл геометричних скалярних полів, рівні яких в заданій точці відповідають

тим чи іншим геометричним, кінематичним чи силовим параметрам. Для розгляду динамічної взаємодії об'єктів доцільно описувати поверхні алгебрологічними функціями, градієнт яких пропорційний приведеному радіусу кривизни, чи обернено пропорційний середній кривизні тіла в точці контакту. Назвемо такі функції — функціями опису об'єктів другого порядку ( $U_2$ ).

Для кулеподібного тіла це:

$$g^* = U = -(x - x_c)^2 - (y - y_c)^2 - (z - z_c)^2 + r^2 < 0 \quad (2.38)$$

Для точки, що лежить на поверхні об'єкту  $g^* = 0$ , для точки в середині об'єкту  $g^* > 0$  і збільшується в глибину тіла, для точки зовні контуру-  $g^* < 0$ . Якщо точка розміщена в тілі на віддалі  $\Delta h \ll r$  від поверхні, то рівень функції для такої точки рівний

$$g_i^* = g_i^*(x, y, z) = 2 r_i \Delta h_i = a_i^2 \quad (2.39)$$

Якщо виділити множину точок перерізу двох об'єктів як контактну область (рис.2.3) :

$$M_{ij} = f_i \cap f_j \quad (2.40)$$

то зручно за центр такої множини приймати точку  $E_{ij}$  в якій  $g_{ij}^* = g_i^* = g_j^*$ , тобто центр перетину контактної області максимальної площі (із максимальним радіусом  $a$  перетину).

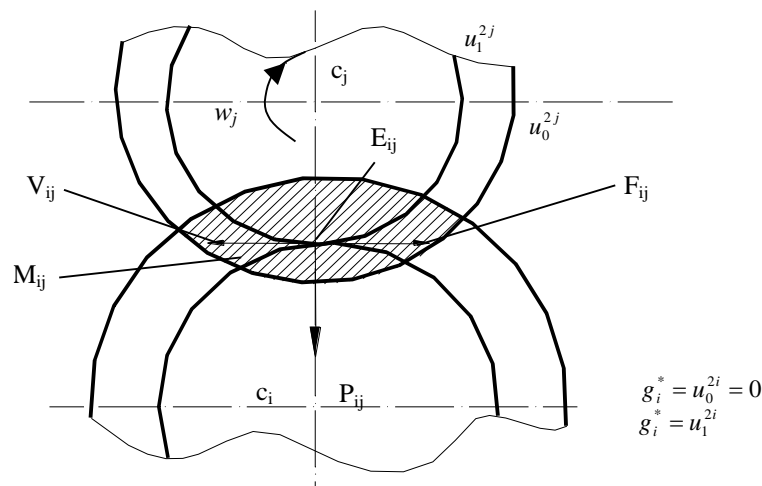


Рис. 2.14. Модель силової контактної взаємодії об'єктів

Оскільки  $\Delta h = \Delta h_i + \Delta h_j = -(f_i + f_j)$ , то із (2.36) випливає, що сила взаємодії між тілами:

$$P_{ij} = -k_{ij}(f_i + f_j)\sqrt{g_{ij}^*} \quad (2.41)$$

Оскільки при розв'язку задачі Герца тангенціальне напруження не враховувалось, то сила  $P_{ij}$  відповідає нормальній реакції  $N_{ij}$  взаємодії тіл, тобто  $P_{ij} = -N_{ij}$ . Відповідно:

$$N_{ij} = N_{ijn} = N_{ij} \text{grad } f_i \quad (2.42)$$

Враховуючи те, що моделюються тіла, які не з'язуються при контакті, то при  $g_{ij}^* < 0$ , сила  $P_{ij} = 0$ . Тоді залежність, що моделює зовнішню силу на  $i$ -те тіло при взаємодії з  $j$ -тим тілом має вигляд:

$$P_{ij} = (0,5)1/2k_{ij}(g^*_{ij}+|g^*_{ij}|)^{1/2} (f_i + f_j) \text{grad } f_i, \quad (2.43)$$

де  $f_i$ ,  $f_j$  - рівні полів алгебро-логічної функції опису об'єктів (одиночного градієнту) в зоні контакту (т. $E_{ij}$ );  $g^*_{ij}$  — рівні полів алгебро-логічної функції поля другого порядку в т.  $E_{ij}$  ( $g^*_{ij} = g^*_i = g^*_j$ );  $k_{ij}$  - коефіцієнт моделі, що залежить тільки від пружних властивостей тіл.

Така форма опису є загальною для взаємодії тіл довільної форми, при умові, що вони описані відповідними алгебро-логічними функціями, що утворюють навколо тіл відповідні поля  $f_i$  та  $g^*_i$ , а визначення необхідних параметрів силової взаємодії проводиться шляхом зондування рівнів полів в контактній зоні.

Сили тертя в  $m_{ij}$ - контактній зоні визначаються із закону Кулона-Амонтона і їх напрямок протилежний напрямку відносних швидкостей точок  $E_i$  і  $E_j$ , які належать кожному із об'єктів взаємодії і мають координати, що відповідають координатам центру контактної зони:

$$x_{ei} = x_{ej} = x_{ij}; y_{ei} = y_{ej} = y_{ij}; z_{ei} = z_{ej} = z_{ij};$$

Швидкість точки контакту  $i$ -го тіла:

$$\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i + [\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{r}_{ij}].$$

Швидкість точки контакту  $j$ -го тіла:

$$\mathbf{v}_{ji} = \mathbf{v}_j + [\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{r}_{ji}].$$

$$\Delta \mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_{ij} - \mathbf{v}_{ji} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j + [\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{r}_{ij}] - [\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{r}_{ji}]$$

де  $\mathbf{v}_i$  - вектор лінійної швидкості центру ваги  $i$  - го тіла;  $\boldsymbol{\omega}_i$  - вектор кутової швидкості  $i$  - го тіла;  $\mathbf{v}_j$  - вектор лінійної швидкості центру ваги  $j$ - го тіла;  $\boldsymbol{\omega}_j$  - вектор кутової швидкості  $j$  - го тіла;  $\mathbf{r}_i$  - радіус-вектор  $i$ -ої точки контакту  $j$  - го тіла відносно центру його ваги.

Відповідно напрям сил тертя в  $m_{ij}$  - контактній зоні, [2]:

$$\bar{F}_{ij} = -N_{ij}\mu_{ij} \frac{\Delta\bar{v}_{eij}}{|\Delta\bar{v}_{eij}|} = 0,5k_{ij}[(1+\text{sgn}(g^*_{ij})](g^*_{ij})^{1/2}(f_i + f_j) \mu_{ij} \frac{\Delta\bar{v}_{eij}}{|\Delta\bar{v}_{eij}|}, \quad (2.44)$$

де  $\mu_{ij}$  - коефіцієнт миттєвого тертя між тілами  $i$  та  $j$ .

Оскільки при ударній взаємодії момент кількості руху після удару реальних об'єктів менший, ніж до удару, то в загальному випадку коефіцієнт  $k_{ij+}$  при пружному зближенні дещо більший  $k_{ij-}$  при пружному розходженні тіл на величину, яка при інтегруванні по шляху взаємодії складає коефіцієнт відновлення при ударі  $\varepsilon$ , який в моделі приймається згідно експериментальних даних.

Залежності (2.42), (2.44) показують зміну сил контактної взаємодії при пружному зближенні та розходженні в залежності від зміни параметрів  $l$  та  $\Delta$  і, відповідно,  $g^{ij*}$  та  $f^{ij*}$ , які, в свою чергу залежать від часу. Отже, замінюючи реакції, що накладені на тіло, силами динамічної взаємодії можна моделювати рух об'єктів в інерційній системі координат в результаті взаємодії з робочими поверхнями та між собою.

Для визначення параметрів нормальної контактної взаємодії на основі імітаційної моделі та реалізованого обчислюваного експерименту, встановлені всі параметри контактної взаємодії об'єктів, та побудована апроксимаційна залежність зміни сили контактної взаємодії  $P_{ij}(t)$  в часі.

$$P_{ij}(t) = P_{ij \max} \left( \frac{t}{\tau \cdot t_k} \right)^\varepsilon \left[ \frac{t_k - t}{t_k(1 - \tau)} \right]^{\varepsilon(1-\tau)/\tau} \quad (2.45)$$

де  $P_{ij \max}$  - максимальна сила контактної взаємодії;  $\varepsilon$  - коефіцієнт форми кривої, для пружного удару  $\varepsilon = 2$ ;  $t_k$  - час контактної взаємодії;  $\tau$  - параметр асиметрії,  $\tau = t_{P \max} / t_k$ , для симетричної кривої  $\tau = 0,5$ .

За результатами обчислюваного експерименту встановлено, що час контакту  $t_k$  практично не залежить від швидкості удару і для кульок постійного радіусу його можна прийняти постійною величиною. З врахуванням (6), закон збереження імпульсу для випадку зіткнення двох однакових кульок матиме вид

$$m_i(1+e) \frac{dl_{ik}}{dt} = \int_0^{t_k} P_{ij} dt = k_P P_{ij \max} t_k, \quad (2.46)$$

де  $e$  - коефіцієнт відновлення при ударі;  $k_P$  - параметр, що враховує форму кривої (7).

## 2.9 Рівняння руху куль в процесі силової взаємодії.

На обрану рухому сутність взагалі можуть впливати наступні силові впливи: зовнішні потенціальні сили (земного тяжіння  $\mathbf{G}_i$ ); Також зовнішні через взаємодії з  $j$ -им об'єктом, які моделюються наступними силами, а саме:  $\mathbf{P}_{ij}$  та  $\mathbf{F}_{ij}$  в кожній  $m_{ij}$  - контактній зоні; сили інерції -  $m_i \mathbf{a}_i$  спрямовані протилежно до напрямку вектору прискорення, а також моменти, які відповідають силам  $\mathbf{M}_P$  та  $\mathbf{M}_F$  і моменти інерцій. У векторному поданні, рівняння руху або рівняння Лагранжа першого роду мають наступний формат:

$$\sum_{j=1}^k (\bar{P}_{ij} + \bar{F}_{ij}) - m_i \bar{a}_i + \bar{G}_i = 0 \quad ; \quad (2.47)$$

$$\sum_{j=1}^k [(\hat{r}_{ij} + \hat{\delta}_{ij}) \times (\bar{P}_{ij} + \bar{F}_{ij})] - \bar{L}_{oi}^{(e)} = 0 \quad ,$$

де  $\bar{P}_{ij}$  та  $\hat{P}_{ij}$  - це векторні величини, що представляють нормальні сили пружної взаємодії згідно з моделлю Герца. Вони визначаються як вектори нормальних сил у загальній системі координат та власній системі координат.  $\bar{F}_{ij}$  та  $\hat{F}_{ij}$  - відповідні вектори тангенціальних зусиль;  $\bar{r}_{ij}$  та  $\hat{r}_{ij}$  - відповідні радіуси-вектори  $ij$ -ої зони;  $m_i$ ,  $\bar{a}_i$  та  $\bar{G}_i$  - відповідно маса, прискорення та сила тяжіння  $i$ -го об'єкту;  $\hat{\delta}_{ij} = \bar{F}_{ij} v_i / (4a_{ij} G_i)$  - тангенціальне зміщення площадки контакту від сили  $\hat{F}_{ij}$ , [7];  $\bar{L}_{oi}^{(e)}$  - векторна сума моментів сил.

Тут перше рівняння системи (2.45) записано в інерційній системі координат, а друге - у власній системі координат об'єкту. В розгорнутій формі ці рівняння приймають вигляд:

$$\sum_{i=1}^k k_{ij} \sqrt{g_{ij}^*} (f_i + f_j) \left[ \text{grad}(f_i) - \frac{\mu \Delta \bar{v}_{eij}}{|\Delta \bar{v}_{eij}|} \right] - m_i \bar{a}_i + \bar{G}_i = 0 \quad (2.48)$$

$$\sum_{i=1}^m k_{ij} \sqrt{g_{ij}^*} (f_i + f_j) \left\{ (\hat{r}_{ij} + \hat{\delta}_{ij}) \times \left[ \text{grad}(f_i) - \frac{\mu \Delta \bar{v}_{eij}^\wedge}{|\Delta \bar{v}_{eij}^\wedge|} \right] \right\} - \bar{L}_{oi}^{(e)} = 0$$

У рухомій системі координат:

$$\bar{L}_{oi}^{(e)} = \frac{d\bar{K}_{oi}^\wedge}{dt} + \left( \bar{\omega}_0^\wedge \times \bar{K}_{oi}^\wedge \right), \quad (2.49)$$

де  $\bar{K}_{oi}^\wedge$  - кінетичний момент тіла.

Якщо рухома система координат зв'язана з частинкою і її осі направлені вздовж головних осей інерції, то проекції векторної суми моментів визначаються згідно динамічних рівнянь Ейлера, [10]:

$$\begin{aligned} I_x^\wedge \frac{d\omega_x^\wedge}{dt} + (I_z^\wedge - I_y^\wedge) \omega_y^\wedge \omega_z^\wedge &= L_{0x}^{(e)} \\ I_y^\wedge \frac{d\omega_y^\wedge}{dt} + (I_x^\wedge - I_z^\wedge) \omega_z^\wedge \omega_x^\wedge &= L_{0y}^{(e)} \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$I_z^{\wedge} \frac{d\omega_z^{\wedge}}{dt} + (I_y^{\wedge} - I_x^{\wedge})\omega_x^{\wedge}\omega_y^{\wedge} = L_{0z}^{(e)},$$

де  $I_x^{\wedge}$ ,  $I_y^{\wedge}$  та  $I_z^{\wedge}$  - моменти інерції відносно головних осей.

Враховуючи те, що тіло в інерційній системі описується в довільний момент часу  $t$  шістьма параметрами:

$$M = M \{x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}, \dot{x}_{ci}, \dot{y}_{ci}, \dot{z}_{ci}, \varphi_x^{\wedge}, \varphi_y^{\wedge}, \varphi_z^{\wedge}, \omega_x^{\wedge}, \omega_y^{\wedge}, \omega_z^{\wedge}\},$$

то розв'язок диференціальних рівнянь руху проводиться роздільно.

Перше - відносно  $\bar{v}$ , друге - відносно  $\bar{\omega}^{\wedge}$ . Приймаємо величину інтервалу для проведення процедури числового диференціювання  $\Delta t$ . Тоді для першого рівняння:

$$\bar{a}_i = \frac{\bar{v}_{ci}(t + \Delta t) - \bar{v}_{ci}t}{\Delta t}$$

Якщо відоме значення  $v_{ci}(t)$  в момент часу  $t$ , то в наступний момент часу

$$t = t + \Delta t:$$

$$\dot{x}_{ci}(t + \Delta t) = \dot{x}_{ci}(t) + a_x \Delta t$$

$$\dot{y}_{ci}(t + \Delta t) = \dot{y}_{ci}(t) + a_y \Delta t$$

$$\dot{z}_{ci}(t + \Delta t) = \dot{z}_{ci}(t) + a_z \Delta t$$

Відповідним чином визначаються і значення кутових швидкостей  $\bar{\omega}(t + \Delta t) = \bar{\omega}(t) + \Delta \bar{\omega}(t)$ , де проекції приростів  $\Delta \bar{\omega}(t)$  визначаються із динамічного рівняння Ейлера, [10]:

$$\bar{\omega}_x^{\wedge}(t + \Delta t) = \bar{\omega}_x^{\wedge}(t) + \frac{L_x^{(e)} - (I_z - I_y)\bar{\omega}_y^{\wedge}(t)\bar{\omega}_z^{\wedge}(t)}{I_x} \Delta t;$$

$$\bar{\omega}_y^{\wedge}(t + \Delta t) = \bar{\omega}_y^{\wedge}(t) + \frac{L_y^{(e)} - (I_x - I_z)\bar{\omega}_z^{\wedge}(t)\bar{\omega}_x^{\wedge}(t)}{I_x} \Delta t;$$

$$\bar{\omega}_z^{\wedge}(t + \Delta t) = \bar{\omega}_z^{\wedge}(t) + \frac{L_z^{(e)} - (I_y - I_x)\bar{\omega}_x^{\wedge}(t)\bar{\omega}_y^{\wedge}(t)}{I_x} \Delta t.$$

Тут проекції вектора прискорень  $\bar{a}(a_x, a_y, a_z)$  визначаються із першого векторного рівняння руху системи (2.46), а проекції вектора  $\bar{L}^{(e)}$  - із другого рівняння системи (2.46), де в'язі від взаємодії замінені силовою дією векторів  $\bar{P}_{ij}, \bar{F}_{ij}$ .



### 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 3.1. Моделювання методом обчислювального експерименту

Обчислювальний експеримент - це методологія і технологія досліджень, які використовують прикладну математику та ЕОМ (електронні обчислювальні машини) в якості технічної основи, використовуючи математичні моделі. Основою обчислювального експерименту є створення математичних моделей об'єктів, які відтворюються за допомогою особливої математичної структури. Ця структура відображає властивості об'єкта, що проявляються ним в різних експериментальних умовах.

В основі обчислювальних експериментів лежить створення математичних моделей об'єктів, відтворених за допомогою спеціальних математичних структур. Ця структура відображає властивості, які виявляє об'єкт у різних експериментальних умовах.

Але ці математичні структури перетворюються на моделі шляхом фізичної інтерпретації їхніх елементів. У процесі встановлюється зв'язок між параметрами математичної структури та експериментально визначеними властивостями об'єкта. Властивостям об'єктів відповідають окремі елементи моделі та характеристики моделі в цілому. Таким чином, математичні структури разом з описом відповідності до експериментально визначених властивостей об'єкта утворюють модель, яка відтворює об'єктивно існуючі зв'язки та закони у математичній формі. Для кращого розуміння модель може супроводжуватися елементами візуалізації. Кожен обчислювальний експеримент базується на математичних моделях і обчислювальних математичних методах. Сучасна обчислювальна математика включає різні частини, які розвивалися разом з електронно-обчислювальною технікою.

З використанням математичного моделювання і методів обчислювальної математики було розроблено теорію та практику обчислювального експерименту, який можна розділити на наступні етапи:

1. Побудова моделі досліджуваного об'єкту, зазвичай починаючи з фізичної моделі, де враховуються основні та другорядні фактори. Встановлено припущення та умови застосовності моделі та визначено межі коректності отриманих результатів. Модель виражається математично, зазвичай у формі диференціальних рівнянь.

2. Розробка методів обчислення заданої математичної задачі передбачає використання алгебраїчних формул для виконання обчислень та умов, що визначають порядок застосування цих формул. Набір цих формул і умов утворює алгоритм розрахунку. Обчислювальні експерименти часто мають багатофакторний характер, оскільки рішення проблеми залежить від багатьох вхідних параметрів. Однак кожен конкретний розрахунок в обчислювальних експериментах проводився з фіксованими значеннями для всіх параметрів. Часто постає завдання знайти оптимальний набір параметрів. Тому при розробці оптимальної підгонки потрібні численні розрахунки для одного типу варіантів задачі. Для цього під час організації обчислювальних експериментів можна використовувати ефективні чисельні методи.

3. Розробка алгоритму та програми для вирішення задачі на ЕОМ.

4. Виконання обчислень на ЕОМ. Результат отримується у вигляді цифрової інформації. Точність цієї інформації залежить від достовірності моделі, яка використовується в обчислювальному експерименті, а також від правильності алгоритмів та програм.

5. Після розрахунків у обчислювальному експерименті важливо провести обробку результатів, проаналізувати їх і зробити висновки.

Обчислювальний експеримент набуває особливого значення, коли неможлива побудова фізичної моделі.

При дослідженні руху частинок в потоці практично неможливо визначити траєкторію кожної частинки, її швидкості та прискорення, а також параметри силової взаємодії з іншими частинками. Для кожної частинки всі ці параметри будуть змінюватись по різному, але їх значення будуть коливатися відносно певних середніх величин із відповідним відхиленням, яке носитиме статистичний характер.

Розроблена модель взаємодії дозволяє на ЕОМ визначити змінні в часі кінематичні і динамічні параметри руху для кожної частинки.

За отриманим в процесі обчислювального експерименту розподілом швидкостей можна більш чітко зрозуміти процеси, що проходять в середині потоку частинок і зіставити їх з теоретичними даними, отриманими в результаті аналітичного дослідження дисперсного середовища з точки зору механіки суцільних середовищ.

Для того, щоб модель, яка побудована на основі визначення взаємодій окремими частинками адекватно відтворювала реальний процес, необхідно отримані результати зіставляти із експериментальними даними і, при необхідності корегувати параметри моделі.

Корекцію моделі доцільно проводити за такими інтегральними параметрами, як коефіцієнт відновлення при ударі, коефіцієнти зовнішнього тертя між частинками та коефіцієнтом тертя кочення частинок по робочих поверхнях.

### **3.2. Методика дослідження переміщення частинок на еом**

Розроблена теоретична модель є складною для її відпрацювання в повному об'ємі. В рамках такої теоретичної моделі не деталізовано ряд важливих особливостей ударної взаємодії, що виходять за рамки контактної задачі Герца. Це наприклад, особливості бокового удару, зміщення площадки

контакту від тангенціальних сил, перехід від ковзання частинки до її кочення, удар частинки із значною власною кутовою швидкістю, переміщення частинок по робочій поверхні із різним напрямком їх власного обертання і т.д. Ці ефекти доцільно враховувати певними апроксимаційними залежностями, які вибираються таким чином, щоб побудовані моделі відповідали даним експериментальних досліджень чи практичним результатам.

Складність фізичного процесу викликає необхідність поетапного дослідження переміщення і взаємодії частинок на ЕОМ із поступовим розв'язком таких задач:

Удар однієї частинки із площиною.

Удар частинок між собою при різних початкових значеннях та напрямках лінійних і кутових швидкостей.

Однчасна взаємодія частинок між собою та з робочою поверхнею.

Однчасна взаємодія багатьох частинок між собою та з декількома робочим поверхнями.

В рамках розв'язання перших двох задач визначаються параметри контактної взаємодії двох об'єктів. В дослідженні частинка приймалась у вигляді кулі, поверхня якої описувалась алгебро-логічною функцією виду (2.3).

В цьому випадку алгоритм визначення контактних зон та параметрів силової взаємодії суттєво спрощується. Так в точці зближення (в точці можливого чи реального контакту) рівень поля для  $i$ -ої частинки визначається за залежністю:

$$f_i = (f_k - r_i) / 2, \quad (3.1)$$

де  $f_k$  - рівень поля  $k$ -ої поверхні (робочої поверхні чи іншої частинки) в геометричному центрі  $i$ -ої частинки, для якої визначається умова рівноваги;  $r_i$  - радіус  $i$ -ої частинки.

Вплив неврахованих факторів, що призводять до зменшення швидкостей після контакту частинки із поверхнею порівняно із швидкістю до контакту можна врахувати зменшенням сил контактної взаємодії при розходженні тіл, порівняно із контактною взаємодією при їх зближенні, тобто  $P_- < P_+$ . Тут  $P_+$  співпадає із значенням  $P$ , обчисленим за формулою Герца.

Для цього знайдемо нормальну складову швидкості частинки відносно поверхні:

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_k = v_x n_x + v_y n_y + v_z n_z \quad (3.2)$$

Нехай сила при розходженні об'єктів  $P_- = k P_+$ , де  $k$ - коефіцієнт, що враховує зменшення контактної сили при розходженні внаслідок гістерезису. Тоді математично залежність розрахункової сили контактної взаємодії:

$$P_p = 0,5P[(1+k) + (1-k)\text{sgn}(v_n)], \quad (3.3)$$

де  $k$  – коефіцієнт зменшення сили;  $\text{sgn}(v_n) = \pm 1$  – знакова функція, яка дорівнює  $+1$  для додатніх значень  $v_n$  і  $-1$  – для від'ємних.

Більш плавно, що важливо для числових методів, зменшення сили контактної взаємодії при розходженні об'єктів можна моделювати залежністю

$$P_p = 0,5P[(1+k) + (1-k)\text{th}(\lambda v_n)], \quad (3.4)$$

де  $\lambda$  – параметр моделі, що згладжує криву навантаження в точці максимального зближення частинок,  $\lambda = 10^3 - 10^4$ .

Параметри  $k$  та  $\lambda$  вибираються із інтегральної умови, з якої відношення швидкостей до і після контактної взаємодії ( $v_+/v_-$ ) відповідає коефіцієнту відновлення при ударі.

В алгоритмі взаємодії частинок із довільною поверхнею необхідно враховувати режими ковзання та кочення частинки і можливість переходу із одного режиму в інший. При режимі ковзання тангенціальна складова сили

приймалось пропорційною силі нормальної взаємодії із врахуванням коефіцієнта сухого тертя, а при перекочуванні частинки сила тертя визначалась за коефіцієнтом тертя кочення, який приймався пропорційно радіусу площадки контакту.

### **3.3. Алгоритми взаємодії частинок в потоці**

Врахувати одночасну взаємодію частинок між собою в потоці можливо при реалізації спеціальних алгоритмів та програм на ЕОМ. Програма одночасної взаємодії частинок в потоці між собою та з робочими поверхнями включає такі процедури:

Уніфікований опис поверхонь частинок та робочих елементів одночасно у власних та нерухомій (базовій) системах координат.

Взаємозв'язок між кожною із рухомих та базовою системами координат за допомогою відповідних матричних перетворень.

Пошук контактних зон. Визначення координат точок контакту, відносних швидкостей та напрямків сил взаємодії.

Визначення сил взаємодії між частинками на основі розв'язку контактної задачі Герца.

Розв'язок системи рівнянь кожної із частинок, визначення біжучих лінійних та кутових переміщень, швидкостей, прискорень.

Відбір даних для статистичного опрацювання інформації, побудова графіків.

На першому етапі, для відпрацювання параметрів взаємодії, досліджувалась взаємодія тільки двох об'єктів, наприклад частинки (кульки) із поверхнею.

Алгоритм розрахунку параметрів взаємодії кульки із площиною наведений у блок-схемі (додаток а).

В першому блоці вводились фізико-механічні властивості кульки і робочої поверхні: коефіцієнти Пуассона  $\nu_i$ ,  $\nu_k$ ; модулі пружності  $E_i$  і  $E_k$ ; густина матеріалу частинки та робочої поверхні  $\gamma_i$ ,  $\gamma_k$ ; коефіцієнт тертя  $\mu_{ik}$ .

В другому блоці визначалась маса частинки  $m_i$ ; моменти інерції, складові ударної сили, що залежать від матеріалу тіл взаємодії.

В третьому блоці задавалась форма робочої поверхні та вводились її параметри, в тому числі швидкісні параметри для рухомих поверхонь.

Задавались початкові значення координат частинки, лінійних та кутових швидкостей.

Задавались початкові та кінцеві значення часу взаємодії, інтервал його зміни.

Проводилась перевірка закінчення циклу розрахунків за величиною вибраного часового інтервалу.

В сьомому блоці проводилось визначення параметрів контактних зон за рівнем їх геометричних полів, а саме оцінювався рівень поля робочої поверхні в центрі частинки, тобто віддаль від центру частинки до поверхні, яка порівнювалась із радіусом частинки, визначалась точка контакту за вектором-напрямком контактної зони, та оцінювались в цій точці значення рівня полів  $f$ - віддалі до ідеальної поверхні частинки, та  $g^*$ - квадрату радіуса ідеальної площадки контакту.

В восьмому блоці перевірялась умова контакту і при відсутності контакту ( $f > 0$ ) відбувається перехід на блок 11.

Визначались швидкості кожної із поверхонь в точці контакту, відносні швидкості частинки та робочої поверхні.

За рівнем полів визначалась нормальна складова сили контактної ударної взаємодії та, із врахуванням відносних переміщень поверхонь, тангенціальні сили в точці контакту, величина зміщення прикладання сили взаємодії та моменти від вказаних сил, які діють на частинку.

В 11 блоці при відсутності контакту, силам взаємодії присвоюються нульові значення.

За рівнодіючими сил та моментів сил визначають відповідно лінійні та кутові прискорення, що отримує частинка при проходженні за малий часовий проміжок  $dt$ , а за прискореннями – відповідно лінійні та кутові швидкості частинки, і відповідно, нові значення координати частинки.

Перевіряється значення лічильника  $n$ ,  $i$ , при досягненні заданого значення циклів розрахунку, відбувається перехід на блок 14, в іншому випадку- на блок 16.

В блоці 14 виводять на друк значення координат частинки, її швидкостей і прискорень, та сил взаємодії.

Обнулюється значення лічильника.

Надаються нові значення параметрам часу та лічильнику і керування передається на блок 6, повторюючи цикл розрахунків.

Завершують розрахунки.

Розроблений алгоритм лежить в основі інших алгоритмів взаємодії частинок між собою та з робочими поверхнями. Так, алгоритм визначення взаємодії частинок між собою має такий же вигляд і відрізняється тільки залежностями формалізованого опису поверхонь та залежностями для пошуку параметрів контактних зон. Алгоритм одночасної взаємодії частинки із робочою поверхнею та іншою частинкою є по-суті поєднанням двох попередніх алгоритмів, при якому визначаються спочатку параметри взаємодії частинки із площиною, потім із іншою частинкою, а параметри руху визначаються із умови сумарної дії всіх сил та моментів, прикладених до частинки, для чого в окремому блоці передбачено їх векторне сумування. Така модель стала перехідною до розробки алгоритму одночасної взаємодії в потоці багатьох частинок між собою та з декількома робочими обмежуючими поверхнями, який може бути використаний для подальших досліджень.



### 3.4. Аналіз досліджень на еом контактної взаємодії частинок

В дослідженні розглядаються частинки у вигляді сталених кульок, оскільки їх фізичні властивості та характер силової взаємодії найбільш досліджені.

Аналіз розрахунків за побудованими математичними моделями показує, що графік залежності контактної сили від часу відповідає даним, які подані в літературі.

Характер сили взаємодії  $i$ -ої кулі з плоскою площиною  $k$  чи з іншою  $j$ -ою кулею аналогічний і відрізняється лише величиною сили взаємодії, яка при вільному ударі кульок менша ніж при ударі кульки і нерухомої площини.

Оскільки взаємодія двох кульок носить імпульсний характер, то особливості ударної взаємодії краще досліджувати при ударі частинки із площиною. Дослідження проводилось для великих ( $r=0.01$  м,  $r=0.02$  м) і малих ( $r=0.001$  м) кульок (опрацювання результатів та побудова графіків реалізована в середовищі Delphi 5, додаток Б).

На рис.3.1 показано, що при зближенні частинки із поверхнею без початкової швидкості, вона під дією власної ваги прогинає робочу поверхню і відбуваються коливання, які згасають. Величина згасання задається параметром моделі  $k$  (розділ 3.2) і підбирається із умови відповідності коефіцієнту відновлення чи кількості відбивань кулі від поверхні ( $k=5$ ). Із рис.4.1 випливає, що точність обчислень (вибір інтервалу часу) може суттєво вплинути на вигляд кривої, що описує коливання сил.

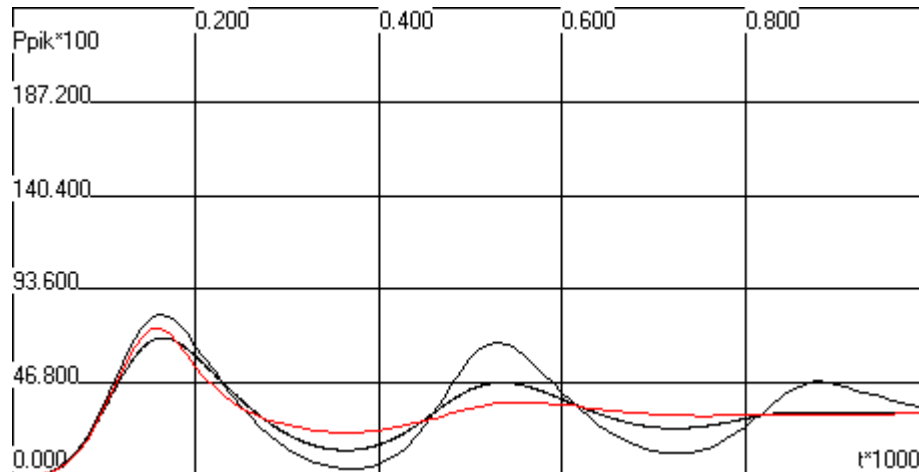


Рис. 3.1 – Зміна сили взаємодії сталюї кульки радіусом 0,01 м із плоскою поверхнею під впливом сили тяжіння із початковим проникненням  $f=0$  в залежності від параметру відновлення моделі та точності обчислень: 1.  $K=0,5$ ;  $dt=0.000001$ ; 2.  $K=0,5$ ;  $dt=0.00001$ ; 4.  $K=0,4$ ;  $dt=0.00001$ ;

На рис.3.2 показана зміна сили взаємодії при ударі кулі з різною початковою швидкістю. При  $v_z=0.005$  м/с відбувається два мікроскопічних відскоки кулі від поверхні (за період 0.001с.). При  $v_z=0.01$  м/с їх буде три за період 0.002 с. При  $v_z=0.02$  м/с кількість відбивань кулі від поверхні буде п'ять. При цьому різко зростає сила миттєвої взаємодії. При  $v_z=0.01$  м/с миттєва контактна сила в 17 разів перевищує силу ваги.

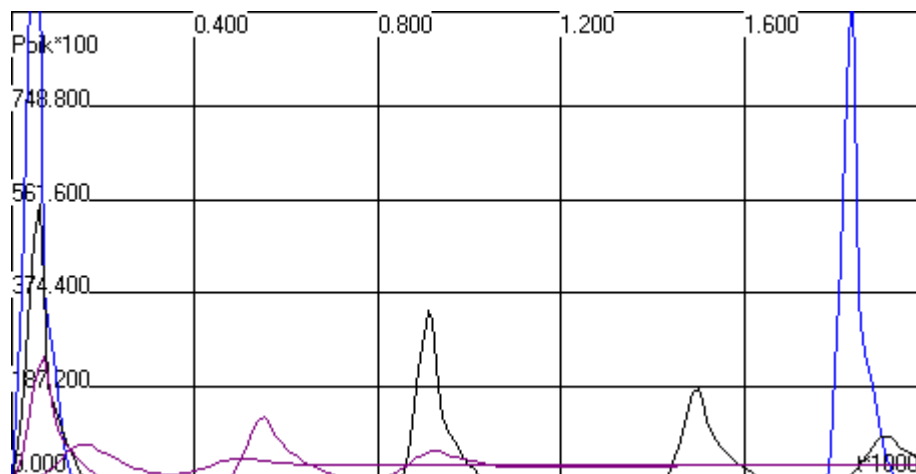


Рис. 3.2 – Зміна контактної сили на протязі 0,002 с при ударі сталюї кульки радіусом 0,01 м із плоскою сталюю поверхнею із різними

початковими швидкостями: 1.  $V_z=0$  м/с; 2.  $V_z=0,005$  м/с; 4.  $V_z=0,01$  м/с; 4.  $V_z=0,02$  м/с.

Аналіз рис.3.3 показує, що при початковому відносному дотичному русі кульки з  $v_{відн}$ . Як і при початковому обертанні коливний процес згагасє повільніше, а при ударі, відповідно, кількість відбивань кулі від поверхні буде більшою.

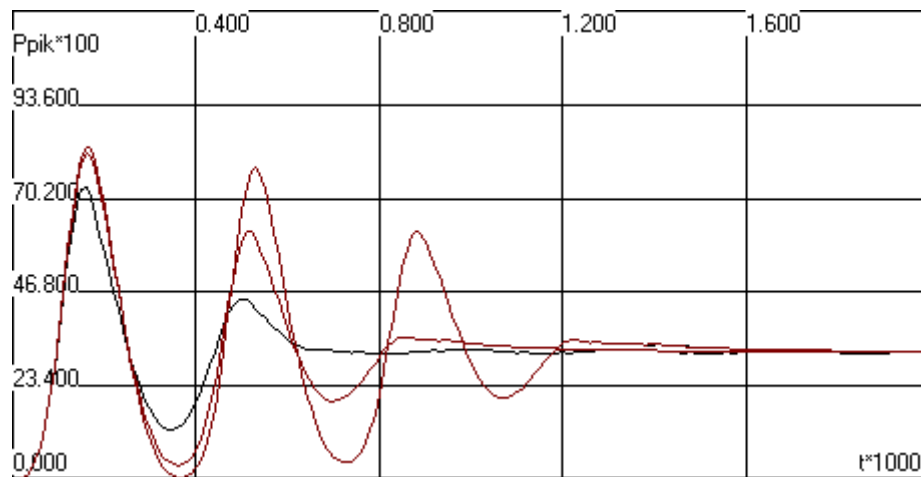


Рис.3.3 – Вплив кутової та відносної лінійної швидкостей сталльної кульки на її силу взаємодії із плоскою поверхнею:

$$1. V_{ik}=0, \omega=0; 2. V_{ik}=0.005 \text{ м/с}, \omega=0 ; 4. V_{ik}=0, \omega=1 \text{ с}^{-1}; \quad (3.5)$$

Із рис.3.4 слідує, що характер взаємодії для частинок різних розмірів однаковий. Для більших частинок амплітуда та період коливного процесу відповідно більші.

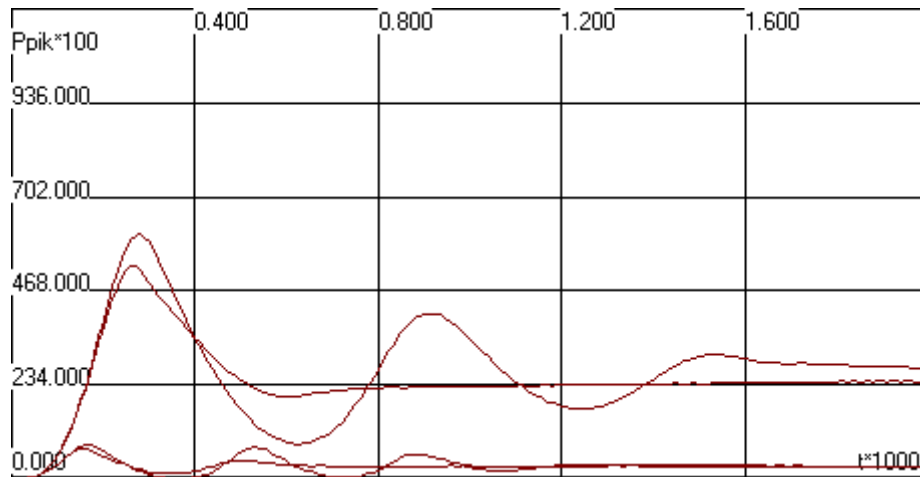


Рис. 3.4 – Зміна сили взаємодії з плоскою поверхнею в часі для сталевих кульок різного розміру: 1.  $r=0.01$  м,  $\omega=0$   $c^{-1}$ ; 2.  $r=0.01$  м,  $\omega=1$   $c^{-1}$ ; 4.  $r=0.02$  м,  $\omega=0$   $c^{-1}$ ; 4.  $r=0.02$  м,  $\omega=1$   $c^{-1}$ ;

Аналіз рис.3.5 і 3.6 показує, що якщо кулю опустити на поверхню з початковою кутовою швидкістю, то вона почне набирати лінійну швидкість, а кутова її швидкість буде зменшуватись до тих пір, поки рух ковзання не перейде в рух кочення. Чим менший розмір частинки, тим швидше відбудеться цей перехід. Відповідно, якщо частинка матиме початкову тангенціальну складову швидкості  $v_{0\tau}$ , то, при контактній взаємодії, вона буде набувати кутової швидкості, яка після переходу від режиму ковзання до режиму кочення стабілізується.

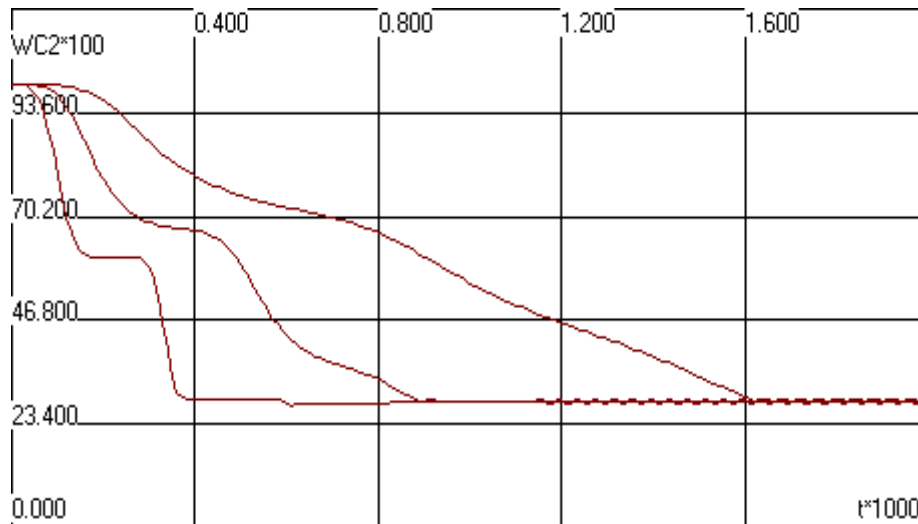


Рис. 3.5 – Зміна кутової швидкості сталених кульок різної маси із початковим значенням  $\omega = 1 \text{ c}^{-1}$  після взаємодії із плоскою поверхнею: 1.  $r=0,005 \text{ м}$ ; 2.  $r=0,01 \text{ м}$ ; 4.  $r=0,02 \text{ м}$ ;

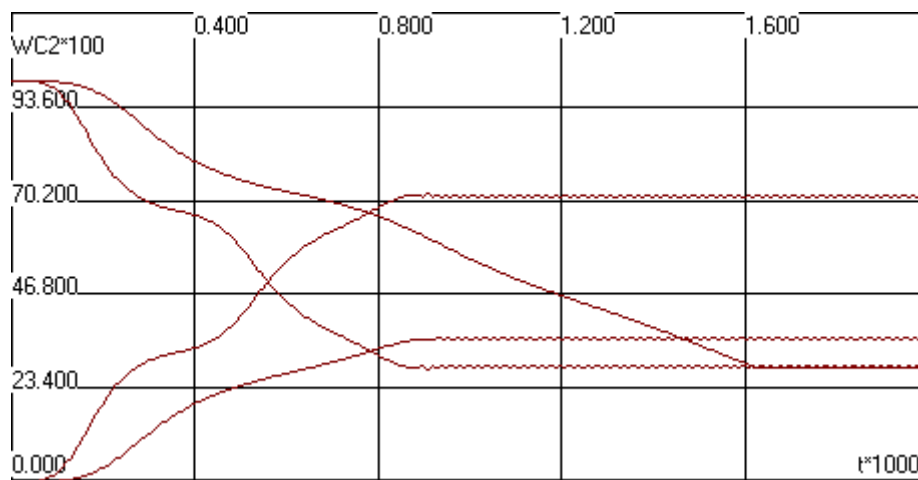


Рис. 3.6 – Зміна кутової швидкості сталених кульок різної маси на протязі  $0,002 \text{ с}$  із різними початковими значеннями  $\omega$  та  $v$  після взаємодії із плоскою поверхнею: 1.  $r=0,01 \text{ м}$ ,  $\omega=0$ ,  $v=0,01 \text{ м/с}$ ; 2.  $r=0,02 \text{ м}$ ,  $\omega=0$ ,  $v=0,01 \text{ м/с}$ ; 4.  $r=0,01 \text{ м}$ ,  $\omega=1 \text{ c}^{-1}$ ,  $v=0$ ; 4.  $r=0,02 \text{ м}$ ,  $\omega=1 \text{ c}^{-1}$ ,  $v=0$ ;

В цьому випадку час переходу до режиму кочення практично не залежить від розмірів кульок.

Із рис.3.7 випливає, що для малих частинок ( $r= 0.001$  м) характер силової взаємодії не змінюється, лише суттєво зменшується період коливного процесу за час удару. Для куль однакової маси час удару незначно зменшується при збільшенні швидкості удару.

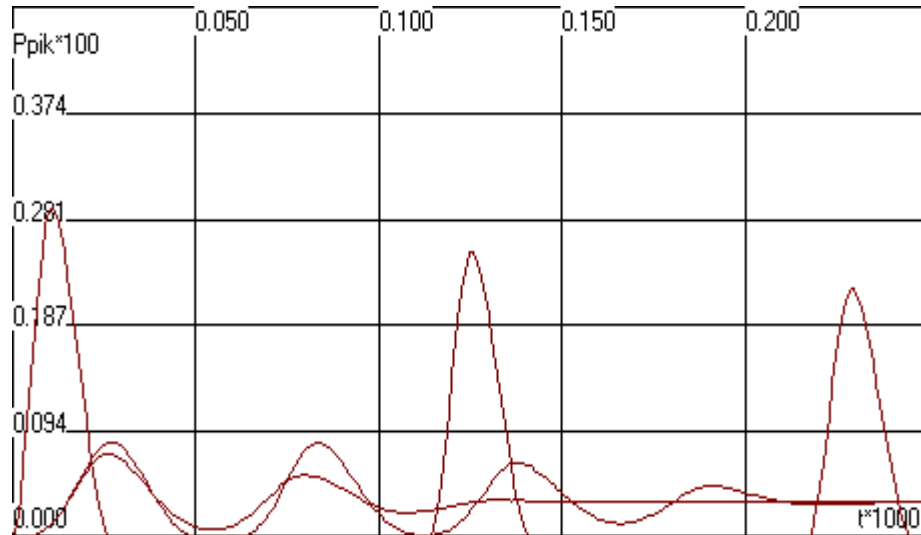


Рис. 3.7 – Зміна сили контактної взаємодії частинки радіусом 0,001 м при її взаємодії із плоскою поверхнею для таких початкових значень: 1.  $v_z=0$ ,  $\omega =0$ ; 2.  $v_z=0$ ,  $\omega =1$   $c^{-1}$ ; 4.  $v_z=0,001$  м/с  $\omega =0$ ;

Із рис. 3.8 – 3.10 випливає, що при ударній взаємодії кутова швидкість зменшується значно більше, ніж при неударному контакті.

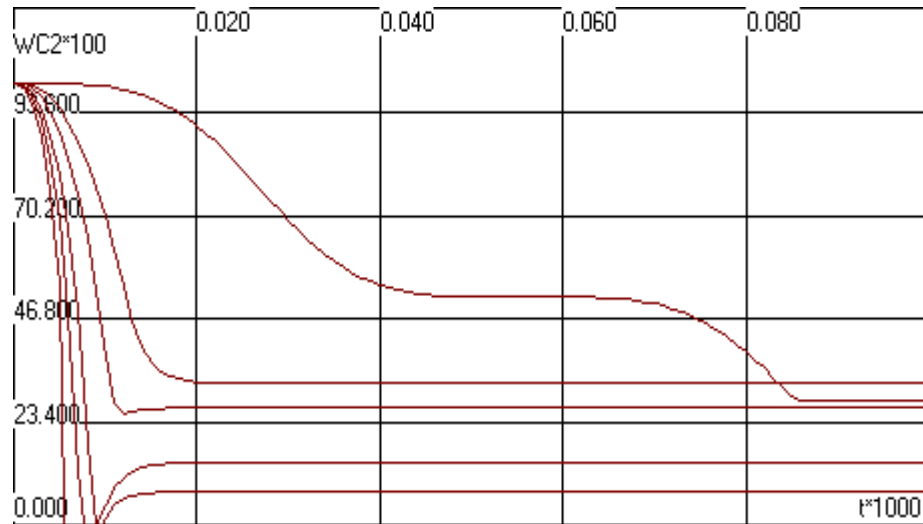


Рис. 3.8 – Зміна кутової швидкості частинки радіусом  $r=0.001\text{м}$  із початковим значенням  $\omega=1\text{с}^{-1}$  при ударі для різних лінійних швидкостей зближення частинок: 1.  $v_z=0\text{ м/с}$ , 2.  $v_z=0,001\text{ м/с}$ , 4.  $v_z=0,002\text{ м/с}$ , 4.  $v_z=0,005\text{ м/с}$ , 5.  $v_z=0,01\text{ м/с}$ , 6.  $v_z=0,02\text{ м/с}$ ,

Для малих частинок (рис.3.8) швидкість спадає значно інтенсивніше, ніж для великих (рис.3.9). Це означає, що рух малих частинок більше підпорядковується закономірностям руху потоку і власні обертання частинок визначаються потоком.

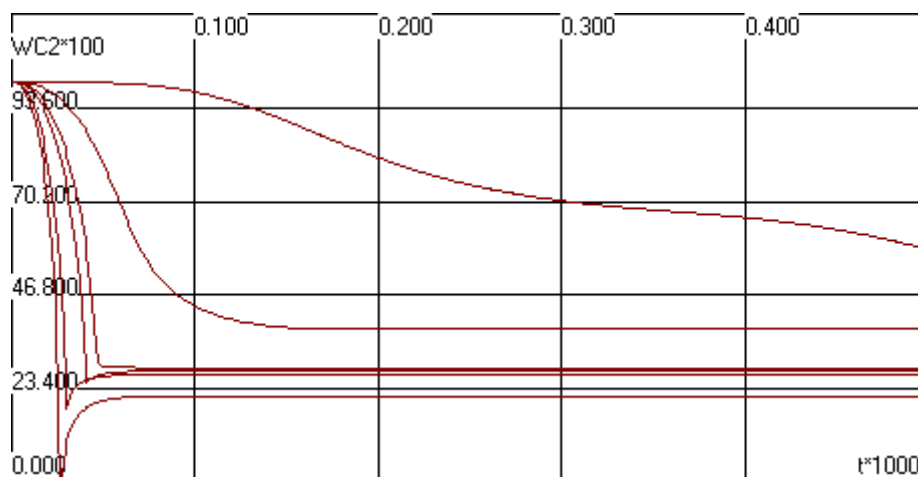


Рис 3.9 – Зміна кутової швидкості частинки радіусом  $r=0.01\text{м}$  із початковим значенням  $\omega=1\text{с}^{-1}$  при ударі для різних лінійних швидкостей зближення частинок: 1.  $v_z=0\text{ м/с}$ , 2.  $v_z=0,01\text{ м/с}$ , 4.  $v_z=0,02\text{ м/с}$ , 4.  $v_z=0,05\text{ м/с}$ , 5.  $v_z=0,1\text{ м/с}$ , 6.  $v_z=0,2\text{ м/с}$ ,

Для більших частинок (рис.3.9) навіть при великих швидкостях взаємодії, частинки мають залишковий обертовий момент, що робить їх рух в потоці менше передбачуваним.

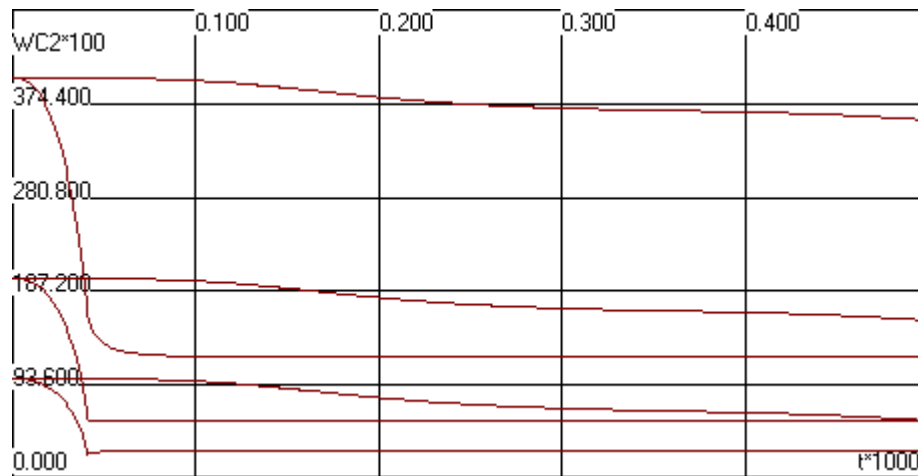


Рис.3.10 – Зміна кутової швидкості кульки  $r=0.01$  м при ударі при різних початкових умовах: 1.  $\omega=1$  с<sup>-1</sup>,  $v_z=0,1$  м/с; 2.  $\omega=1$  с<sup>-1</sup>,  $v_z=0$ ; 4.  $\omega=2$  с<sup>-1</sup>,  $v_z=0,1$  м/с; 4.  $\omega=2$  с<sup>-1</sup>,  $v_z=0$ ; 5.  $\omega=4$  с<sup>-1</sup>,  $v_z=0,1$  м/с; 6.  $\omega=4$  с<sup>-1</sup>,  $v_z=0$ ;

Із рис.3.10 випливає, що незалежно від величини початкової кутової швидкості, після зіткнення частинка втрачає більшу частину обертового моменту.

### 3.5. Моделювання піднімання куль гвинтовим транспортером підйомником.

Ще більш складнішими будуть динамічні впливи реакцій транспортуючих та направляючих поверхонь на кульовий об'єкт при його переміщенні гвинтовими транспортуючими пристроями. Так, при вертикальному підйомі куль гвинтовим пристроєм по двох направляючих, нормальні реакції від поверхонь будуть спрямовані до центру кулі, а тангенціальні - протилежно вектору швидкостей відносного переміщення поверхонь куль та опорних поверхонь в точках контакту.



Для розрахунку вертикального підйому куль розмістимо систему координат  $Oxyz$  таким чином, щоб вісь  $Oz$  співпадала із віссю гвинта, а вісь  $Ox$  була спрямована в сторону куль, що піднімаються.

Для центрування куль гвинтова поверхня робочого органу повинна притискати їх до направляючих, що забезпечується відповідним її нахилом.

Тоді параметричне рівняння обертової гвинтової поверхні буде:

$$x = u \cos(v - \omega t); \quad y = u \sin(v - \omega t); \quad z = vT / (2\pi) - u \sin \delta. \quad (3.1)$$

де  $u$  та  $v$  - лінійний та кутовий параметр гвинтової поверхні;  $\omega$  - кутова швидкість обертання гвинта;  $\delta$  - кут нахилу гвинтової поверхні в радіальному січенні.

На кулю, що розміщена на віддалі  $\rho$  від осі гвинта і має координати  $C(\rho; 0; \omega T / 2\pi)$ , зі сторони направляючих в горизонтальній площині будуть діяти реакції  $N_k^x$  та  $N_k^y$ , що направлені до центру кулі. Зі сторони гвинтової поверхні на кулю буде діяти нормальна реакція

$$N_k^z = N_k (\sin \delta \cdot i^x + \sin \alpha_\rho \cos \delta \cdot j^y + \cos \alpha_\rho \cos \delta \cdot k^z), \quad (3.)$$

де  $\alpha_\rho$  - кут підйому гвинта в точці контакту з кулею.

Реакції, що діють на кулю із 3 ступенями вільності, залежать від перерозподілу сил, що вноситься силами тертя, напрямком яких задається напрямком вектора кутової швидкості,  $\vec{\omega}_k = \omega_x^y + \omega_y^z + \omega_z^x$  і може бути визначений експериментально.

З метою встановлення умов транспортування кулі по направляючих гвинтовим підйомником, експериментального визначення динамічного коефіцієнта тертя кульових об'єктів по пруткових направляючих та гвинтовій поверхні та визначення оптимізації транспортної системи для кульових об'єктів, розроблена експериментальна установка, рис., яка в автоматизованому режимі буде реалізовувати програму експерименту.

## **4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1. Техніка безпеки при роботі з 3d принтером під час вивчення основ проектування і моделювання.**

Виходячи з досвіду ХХІ століття, кожен кілька десятиліть з'являються нові навички і знання, необхідні для повсякденного використання. Зараз таким навиком стає одне з найцікавіших напрямків розвитку оточуючих нас технологій – 3D-друк.

3D друк – це автоматичне створення об'ємного фізичного предмета з використанням тривимірної комп'ютерної моделі. Принцип створення досить простий: спочатку готується файл для друку за допомогою будь-якої системи автоматизації проектування (САПР). Після створення файл відправляється на 3D-принтер, де він згодом перетворюється на остаточний виріб. Говорячи про розміри вихідних моделей, то більшість сучасних побутових принтерів можуть друкувати предмети з габаритами у середньому 20 куб. см. В даний час, крім пластика, існує ряд матеріалів для роздрукування моделі, але для цього потрібні принтери, ціна і умови експлуатації яких виходять за рамки побутового домашнього використання. Це вироби з нержавіючої сталі, сталі з бронзою, алюмінію, кераміки, дерева, текстильних волокон і навіть харчових інгредієнтів.

Сфера освіти, наслідуючи тенденції заходу, переживає період відходу від старої школи. Цей перехід спрямований, в першу чергу, на розвиток творчих і винахідницьких здібностей. 3D-принтер дає студентам можливість на заняттях з основ проектування і моделювання розробляти дизайн предметів, які неможливо зробити навіть за допомогою 4-осьових фрезерних верстатів. Наприклад, багатопарові об'єкти або складні отвори. Майже все, що можна намалювати на комп'ютері в 3D-програмі, може бути втілено в життя. Студенти можуть розробляти деталі, друкувати, тестувати і оцінювати

їх. Застосування 3D-технологій неминуче веде до збільшення частки інновацій в студентських проектах.

Для кращого засвоєння матеріалу, можна підвищити залученість студентів в навчання, зробивши груповий проект. В результаті студенти навчаться не тільки моделюванню, створенню конструкцій і підготовці макета до друку, але й співпраці в команді. Кожен учасник розуміє важливість виконання своєї частини завдання, від якої залежить доля всього проекту.

На сьогодні настає необхідність у створенні спеціальних навчальних класів, навіть лабораторій основ проектування і моделювання, де студенти зможуть освоювати сучасне обладнання, вчитися його використовувати в своїй професії, розуміти, де потрібно застосовувати автоматизацію, а де простіше зробити традиційним ручним способом. Це, в свою чергу, створює необхідність у розробці техніки безпеки, зокрема, при роботі з 3D-принтером.

#### Отримання опіків

Потрібно пам'ятати, що принцип роботи 3D-принтера заснований на плавленні пластикової нитки. Таким чином, нагріваючись, пристрої створюють велику небезпеку при дотику. Як правило, температура екструдера працюючого пристрою може варіюватися від 170 до 300°C. Конкретний показник залежить від типу матеріалу і моделі принтера.

Температура плавлення філаменту, який використовується в принтерах, цілком достатня для отримання опіку. Для ABS пластику вона становить близько 210-270°C, для PLA – 180-190°C. Цього вистачить, щоб отримати болючі ушкодження при контакті як з самим матеріалом, так і нагріваючими елементами принтера, такими як стіл і сопло екструдера.

При друці PLA пластика цей ризик нижче, оскільки не нагрівається стіл, але працюючи з ABS, також потрібно бути максимально обережними і не торкатися до гарячих елементів. Ризик отримання травми прямо пропорційний площі нагріваючої поверхні. Температуру слід перевіряти

тільки за показаннями датчиків, які мають відображатися при друці або на дисплеї пристрою, але категорично не рукою або підручними засобами.

У тих ситуаціях, коли потрібен безпосередній контакт з неостиглими поверхнями, наприклад, при прочищенні сопла, необхідно користуватися спеціальними інструментами та засобами індивідуального захисту рук.

Щодо електротравм, як і будь-який пристрій, що працює від мережі, 3D-принтер може завдати людині електротравму. При правильній експлуатації приладу цього не станеться. Навіть у разі порушення заземлення напруга в відкритих частинах 3D-принтера зазвичай не перевищує 12-24 В, що вважається безпечним і завдасть лише легкий шок. Однак, при розборі корпусу пристрою для ремонту, заміни деталі або очищення від пластику, можливість отримати удар струмом напругою 220 В зростає урази.

Потрібно пам'ятати, що будь-який електроприлад перед обслуговуванням обов'язково повинен бути відключений від мережі. Деякі принтери мають зовнішній, а не внутрішній трансформатор, але це не повинно стати причиною забути про безпеку і залишити вилку в розетці.

Також не можна не згадати про ризики короткого замикання. Імовірність такої ситуації в 3D-принтері, як і в будь-якому іншому побутовому пристрої, невелика. Але, тим не менш, на ринку представлені як 3D-принтери з підвищеним ступенем безпеки, так і звичайні. У таких пристроях, як правило, є два нагрівальних елементи: екструдер і підігрівальна платформа або просто стіл. Температура цих вузлів може доходити до 310°C (екструдер) і 110°C (стіл).

Щоб уникнути опіків під час друку, принтер повинен бути обов'язково з закритими стінками. Наявність дисплея і світлової індикації допоможуть зрозуміти, навіть при вимкненому принтері, яка температура його нагрівальних елементів в даний момент.

Екструдер – це найгарячіша частина, тому працюючи з ним, необхідно бути максимально акуратним. Для зняття залишків пластику з екструдера обов'язково використовуйте спеціальний інструмент.

Що стосується електричної частини, тут також є на що звернути увагу у 3D-принтері. Всі дроти і місця з'єднань повинні бути ізольовані, а найкраще – заховані в корпусі принтера. Будь-які відкриті з'єднання, контакти, дроти, плати при випадковому замиканні можуть як мінімум вивести з ладу техніку, а в гіршому випадку – завдати шкоди здоров'ю.

#### Небезпека пожежі

Відкритий корпус принтера також може стати причиною пожежі матеріалів, що знаходяться поряд з принтером. Краще тримати папір і горючі рідини, які мають низьку температуру запалювання, подалі від працюючого принтера, особливо якщо він має відкриту конструкцію.

Ще однією проблемою може бути перегрів екструдера. Наприклад, температура запалювання PLA пластика становить приблизно 388°C. Теоретично, якщо зламано датчик температури принтера, це може призвести до самозаймання матеріалу. Якщо принтер має корпус з фанери або пластику, це додає йому пожежонебезпеку.

Тому в приміщеннях, де здійснюється друк, рекомендується встановити пожежну сигналізацію та завжди мати при собі вогнегасник. Також необхідно уникати залишати працюючий принтер без нагляду. Розуміючи, що неможливо постійно спостерігати за друкуванням кілька годин, все ж краще час від часу контролювати роботу принтера.

#### Рухомі деталі

3D-принтери мають багато рухомих частин, таких як двигуни, шківни, різьбові стержні, каретка та вентилятори. Всі ці елементи можуть легко зачепити тіло і призвести до травм.

Необхідно уникати контакту з рухомими частинами принтера під час його роботи. Не лізьте всередину пристрою і не намагайтеся самостійно виправити застряглий об'єкт або вдарити каретку вручну.

Якщо 3D-принтер має відкриту конструкцію, то працюючи з ним, вам потрібно носити щільний одяг і слідкувати за волоссям, щоб мінімізувати ризик зачеплення тканини або волосся за рухомі деталі. Також слід

попередньо піклуватися про розташування катушки з матеріалом, щоб уникнути зачеплення нитки за зайві предмети та випадкове впадання принтера на підлогу.

Якщо ж у пристрій все ж таки потрапили одяг або волосся, слід негайно вимкнути принтер і вручну перемістити каретку до повного звільнення.

#### Шкідливі випари

При плавленні частина полімеру неминуче переходить в газоподібний стан і змішується з повітрям. Вид вихідної речовини залежить від пластику. З огляду на те, що для виготовлення PLA застосовуються природні компоненти, вважається, що він біосумісний і безпечний для людини при плавленні. Але насправді, лабораторних досліджень, які підтверджують цей факт, практично немає.

ABS-пластик є матеріалом на основі нафтопродуктів, що вже має на увазі підвищену токсичність при нагріванні.

Ще однією небезпекою є розпад частини пластика на отруйні складові при нагріванні і плавленні.

Наступний фактор ризику пов'язаний з наночастинками діаметром менше 1 мікрона, які у великій кількості виділяються при 3D-друці. Ці частинки можуть проникати безпосередньо в легені і епідерміс, викликаючи різні розлади органів дихання і алергічні реакції.

В ході випробувань, проведених італійськими вченими Фабріціо Мерло і Стефано Маццони, з'ясувалося, що час, протягом якого вміст наночастинок в повітрі повертається до звичайного рівня, становить від 10 до 30 хвилин після закінчення процесу 3D-друку.

Також вчені радять працювати в добре провітрюваних приміщеннях: ідеально використовувати систему вентиляції, яка здатна тричі на годину міняти весь об'єм повітря в кімнаті. Це означає, що для приміщення об'ємом

100 м<sup>3</sup> потрібна система вентиляції, що здатна обробити 300 м<sup>3</sup> повітря в годину.

Інші речовини і домішки, які вивільняються при використанні пластику. Результати дослідження, вже згаданих раніше Фабріціо Мерло і Стефано Маццони, показали, що в ході плавлення і змішування пластику виділяються випари багатьох токсичних речовин, серед яких, наприклад, аміак і фенолібензол. Наявність конкретних речовин залежить від нитки, а точніше – від полімеру, з якого вона складається.

Отже, можемо виділити наступні правила для забезпечення себе від шкідливого впливу парів пластику:

1. Використовуйте систему вентиляції для забезпечення свіжого повітря та відведення шкідливих випарів.

2. Звертайте увагу на запахи. Сильний запах свідчить про підвищену концентрацію активних речовин. Якщо відчуваєте неприємний запах, варто перевірити рівень вентиляції та забезпечити додаткову циркуляцію повітря.

3. Працюйте з пристроєм у закритому корпусі, якщо це можливо. Це допоможе зменшити взаємодію зі шкідливими випарами та забезпечить більш контрольовані умови роботи.

4. Купуйте витратні матеріали у перевірених виробників. Якісний витратний матеріал повинен мати сертифікати або декларації відповідності, що гарантує його безпеку та якість.

5. Будьте обережними і дотримуйтеся вимог безпеки при роботі з 3D-обладнанням. Ознайомтеся з керівництвом з експлуатації, використовуйте необхідні захисні засоби, які передбачені виробником, і дотримуйтеся елементарних правил техніки безпеки.

На закінчення відзначимо, що 3D-принтер, як і будь-який пристрій, може призвести до травмування. Але це не є приводом відмовитися від його застосування, але є причиною задуматися над технікою безпеки. Зокрема, з увагою поставитися до організації робочого місця, вивчити керівництво з експлуатації та дотримуватися елементарних правил техніки безпеки.

## 4.2. Вимоги щодо організації робочого місця користувача ПК

Приміщення з ЕОМ повинні бути оснащені системою автоматичної пожежної сигналізації відповідно до вимог переліку однотипних за призначенням об'єктів, які підлягають обладнанню автоматичними установками пожежегасіння та пожежної сигналізації, затвердженого наказом Міністерства внутрішніх справ України і зареєстрованого в Міністерстві юстиції України з димовими пожежними сповіщувачами та переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку 2 шт. на кожні 20 кв. м площі приміщення з урахуванням граничнодопустимих концентрацій вогнегасної рідини відповідно до вимог Правил пожежної безпеки в Україні [45].

Правила експлуатації ЕОМ встановлюють вимоги безпеки та санітарно-гігієнічні вимоги до обладнання робочих місць користувачів ЕОМ і працівників, що виконують обслуговування, ремонт та налагодження ЕОМ, та роботи з застосуванням ЕОМ, відповідно до сучасного стану техніки та наукових досліджень у сфері безпечної організації робіт з експлуатації ЕОМ та з урахуванням положень міжнародних нормативно-правових актів з цих питань.

Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого середовища включають вимоги до параметрів мікроклімату, освітлення, рівень шуму і електромагнітного випромінювання.

У виробничих приміщеннях на робочих місцях мають забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості й рухливості повітря.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення. Природне світло повинно проникати через бічні світлопрорізи, зорієнтовані, як правило, на північ чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5%. При виробничій потребі дозволяється експлуатувати ЕОМ у приміщеннях без природного освітлення за



узгодженням з органами державного нагляду за охороною праці та органами і установами санітарно-епідеміологічної служби.

Загальне освітлення має бути виконане у вигляді суцільних або переривчатих ліній світильників, що розміщуються збоку від робочих місць (переважно зліва) паралельно лінії зору працівників.

Рівні шуму на робочих місцях осіб, що працюють з відеотерміналами та ЕОМ, визначені ДСанПіН 3.3. 2-007-98.

Для забезпечення нормованих рівнів шуму у виробничих приміщеннях та на робочих місцях застосовуються шумопоглинальні засоби, вибір яких обґрунтовується спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Рівні електромагнітного випромінювання та магнітних полів повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.1. 006 "ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля", СН N 3206-85 "Гранично допустимі рівні магнітних полів частотою 50 Гц" та ДСанПіН 3.3. 2-007-98.

### **4.3. Огляд системи моніторингу довкілля**

Державна система моніторингу довкілля - це система спостережень, збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки. Це Положення визначає порядок створення та функціонування такої системи в Україні.

Система моніторингу є складовою частиною національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн .

Система моніторингу – це відкрита інформаційна система, пріоритетами функціонування якої є захист життєво важливих екологічних

інтересів людини і суспільства; збереження природних екосистем; відвернення кризових змін екологічного стану довкілля і запобігання надзвичайним екологічним ситуаціям.

Створення і функціонування системи моніторингу з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території, ґрунтується на принципах:

узгодженості нормативно-правового та організаційно-медичного забезпечення, сумісності технічного, інформаційного і програмного забезпечення її складових частин;

систематичності спостережень за станом довкілля та техногенними об'єктами, що впливають на нього;

своєчасності отримання, комплексності оброблення та використання інформації про стан довкілля, що надходить і зберігається в системі моніторингу;

об'єктивності первинної, аналітичної і прогнозної інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та оперативності її доведення до органів державної влади, органів місцевого самоврядування, громадських організацій, засобів масової інформації, населення України, заінтересованих міжнародних установ та світового співтовариства.

Моніторинг довкілля здійснюють:

Мінприроди - ґрунтів на природоохоронних територіях (вміст ЗР, у тому числі радіонуклідів); державного екологічного картування території України для оцінки його стану та його змін під впливом господарської діяльності; наземних екосистем (фонова кількість ЗР, у тому числі радіонуклідів); видів рослинного і тваринного світу, що перебувають під загрозою зникнення, та видів, що перебувають під особливою охороною.

Мінекономіки - ґрунтів сільськогосподарського використання (радіологічні, агрохімічні та токсикологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів);

сільськогосподарських рослин і продуктів з них (токсикологічні та радіологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів).

Держлісагентство - ґрунтів земель лісового фонду (радіологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів); лісової рослинності (стан, продуктивність, пошкодження біотичними та абіотичними чинниками, біорізноманіття, радіологічні визначення); мисливської фауни (видові, кількісні та просторові характеристики);

Держгеокадастр - ґрунтів і ландшафтів, зрошуваних і осушених земель (вторинне підтоплення і засолення тощо); берегових ліній річок, морів, озер, водосховищ, лиманів, заток, гідротехнічних споруд (динаміка змін, ушкодження земельних ресурсів);

Мінрегіон - питної води централізованих систем водопостачання (вміст ЗР, обсяги споживання); стічних вод міської каналізаційної мережі та очисних споруд (вміст ЗР, обсяги надходження);

Держгеонадра - підземних вод (ресурси та використання); ендегенних та екзогенних процесів (видові і просторові характеристики, активність прояву).

Фінансування робіт із створення і функціонування системи моніторингу та її складових частин здійснюється відповідно до порядку фінансування природоохоронних заходів за рахунок коштів, передбачених у державному та місцевих бюджетах згідно із законодавством.

Покриття певної частини витрат на створення і функціонування складових частин і компонентів системи моніторингу може здійснюватися за рахунок інноваційних фондів у межах коштів, передбачених на природоохоронні заходи, міжнародних грантів та інших джерел фінансування.

## ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі була розроблена та досліджена автоматизована система транспортування сферичних об'єктів.

У процесі роботи було проведено детальний аналіз наявних методів транспортування сферичних об'єктів, оцінено їх переваги та недоліки. Виявлено, що багато з існуючих систем мають обмеження у точності, швидкості або масштабованості, що створює потребу в новому підході.

На основі здобутої інформації була розроблена автоматизована система транспортування сферичних об'єктів. Для реалізації системи було використано контролер ESP32, який забезпечує високу швидкість обробки даних та забезпечує підтримку необхідних інтерфейсів.

Особливістю розробленої системи є можливість керування не лише звичайними інтерфейсами, але й за допомогою смартфона. Для забезпечення цієї функціональності був розроблений спеціальний додаток, який використовує блютуз модуль для бездротового з'єднання з системою транспортування.

Експериментальні результати підтвердили ефективність та надійність розробленої системи. Вона демонструє високу точність переміщення сферичних об'єктів, що є важливим для багатьох промислових та лабораторних застосувань.

Застосування розробленої системи може знайти широке використання в різних галузях, включаючи виробництво, логістику, наукові дослідження та медицину. Її гнучкість і можливість адаптації до різноманітних вимог дозволяють ефективно виконувати завдання транспортування об'єктів різних розмірів та ваги.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Marblevator, Magnetic Tracks . URL: <https://www.printables.com/model/293260-marblevator-magnetic-tracks>.
2. The Marble Roller Coaster. URL: <https://www.instructables.com/The-Marble-Roller-Coaster/>
3. Marblevator, Wave. URL: <https://www.instructables.com/Marblevator-Wave/>
4. The Solar Marble Machine. URL: <https://www.instructables.com/The-Solar-Marble-Machine/>.
5. Обґрунтування параметрів шнекового конвеєра з додатковими лопатями для транспортування стружки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.05 «Піднімально-транспортні машини» / Д.П. Часов. – Тернопіль, 2015. – 20с.
6. Гевко І.Б , Дубиняк Т. С. “Взаємозв'язок конструктивних елементів гвинтових механізмів з характером навантаження” – Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів - ТНТУ, Тернопіль – 2015. – с. 260.
7. Гевко І.Б., Паливода Ю.Є., Скиба О. П., Дубиняк Т. С., Мельничук А. Л., Кондратюк О. М. “Взаємозв'язок конструктивних елементів гвинтових і захисних механізмів від характеру навантаження” – Вісник національного університету водного господарства та природокористування, випуск 3(75) - Рівне – 2016. с. 256 – 265.
8. Ohnivskiy R., Semenets V. (2023) Rukh kul po paraplelnikh napriamnikh [Motion of balls along parallel guides]. VI International Student Scientific and Technical Conference "Natural Sciences and Humanities. Topical issues" (Tern., 27-28 April 2023), pp. 11-12 [in Ukrainian].
9. Охнівський Р. Дослідження взаємодії сферичних об'єктів у потоці / Охнівський Р., Семенець В. // VI Міжнародна студентська науково-технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 27-28

квітня 2023. — Т. : ТНТУ, 2023. — С. 9–10. — (Автоматизація та приладобудування).

10. Методика визначення коефіцієнта при переміщенні вантажу в гвинтових конвеєрах / О. Р. Дмитрів, М. В. Грубенюк, Р. П. Цапик, Р. І. Охнівський // Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 1. — С. 188–189. — (Сучасні технології на транспорті).

11. Автоматизоване визначення динамічних коефіцієнтів тертя при транспортуванні кульових об'єктів / Роман Захарійович Золотий, О. Р. Дмитрів, Р. І. Охнівський, В. П. Семенець // Збірник тез доповідей Х Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 24-25 листопада 2021 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2021. — Том І. — С. 5–6. — (Фізико-технічні основи розвитку нових технологій).

12. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.

13. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.

14. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.

15. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.