

ВСТУП

Одним з важливих етапів технологічного процесу збагачення та отримання залізорудного концентрату є процес подрібнення, який виконується за допомогою млинів. Вхідним продуктом подрібнення є кінцевий продукт дроблення. Для руд, що мають вкраплення корисного компоненту у пустій породі, подрібнення – останній етап розкриття зерен корисних мінералів перед збагаченням. Подрібнення може проводитися як у водному середовищі – мокре подрібнення, так і в повітряному середовищі – сухе подрібнення. Основним обладнанням цього технологічного етапу є млини різних типів: механічні (з тілами, що мелють), струменеві (без тіл, що мелють), безперервної і періодичної дії.

Серед різноманіття обладнання для подрібнення найбільшого поширення для подрібнення рудної сировини набули барабанні млини з обертовим барабаном мокрого подрібнення. Такі кульові млини широко застосовуються на збагачувальних фабриках руд чорних та кольорових металів для попереднього подрібнення та розкриття руд. Кульові млина перших стадій подрібнення застосовують для попереднього подрібнення руд, а кульові млини других і третіх стадій – для розкриття руди та подальшого збагачення. Режим роботи та ефективність подрібнення та розкриття руди у кульових млинах значною мірою визначаються ступенем завантаження млинів рудою. Причому для кожного типу руди потрібна своя оптимальна крупність помелу, що забезпечує необхідне розкриття руди та високі показники магнітного збагачення. Слід також додати, що процес подрібнення є досить енерговитратним.

Сам процес подрібнення є дуже складним з точки зору вивчення та розрахунку основних параметрів, оскільки мова йде про трикомпонентне динамічне середовище, що складається з рідини, дробленого твердого та дроблячих куль. Суттєвий вплив на процес має конфігурація футерування та ступінь завантаженості млина. На сьогоднішній день відомо багато модифікацій

футерування, що збільшують ефективність дроблення та знижують його енергоємність.

Отже дослідження процесу подрібнення у кульових барабанних млинах мокрого подрібнення та визначення раціональних параметрів процесу млина є **актуальним науково-технічним завданням.**

Метою роботи є покращення режиму роботи кульових барабанних млинах мокрого подрібнення за рахунок обґрунтування експлуатаційних параметрів.

Об'єкт досліджень – процесу подрібнення у кульових барабанних млинів мокрого подрібнення.

Предмет дослідження – параметри кульових барабанних млинів мокрого подрібнення.

1. АНАЛІЗ МЕХАНІЧНИХ ПЕРЕДАЧ ЗІ ЗМІННИМ ПЕРЕДАВАЛЬНИМ ВІНОШЕННЯМ

1.1. Аналіз області застосування кульових барабанних млинів

Млини кульові барабанні мокрого подрібнення призначені для помелу різних рудних та нерудних корисних копалин, будівельних матеріалів середньої твердості. Млини використовуються при виробництві будматеріалів (гіпс, силікатна цегла, сухі суміші та ін.), при виробництві матеріалів для асфальтобетону (мінеральний порошок), при виробництві сировини для ЛКМ, паперу (мікромармур, мікрокальцит), у гірничорудній, гірничохімічній та інших галузях промисловості.

Млини кульові барабанні мокрого подрібнення працюють у різних технологічних схемах (у відкритому або закритому циклі) і дозволяють отримувати однорідний за тонкістю продукт подрібнення за допомогою тіл, що мелють. Такі млини використовуються на всіх стадіях подрібнення, зокрема, в одностадіальній схемі подрібнення руд, а також при доподрібненні промпродуктів та концентратів.

Продуктивність млина залежить від властивостей подрібнюваних матеріалів (міцність, розмолоздатність), крупності матеріалів на вході (до 50 мм), вологості матеріалів (до 0,5 %), тонкощі помелу, рівномірності живлення, заповнення тілами, що мелють, і матеріалом.

Кульові млини характеризуються наступними параметрами:

- діаметр куль - від 30 мм;
- крупність оброблюваної сировини (на вході) - до 50 мм;
- тонкість помелу (на виході) – до 2 мкм;
- діаметр барабана - від 900 мм;
- довжина барабана - від 1500 мм;
- об'єм барабана - від 0,9 м³;
- потужність електродвигуна - від 18 кВт;
- робоча напруга - від 380 В;
- продуктивність - від 2 т/год;
- маса - від 5 т.

Млини характеризуються внутрішнім діаметром барабана (при знятому футеруванні) та його робочою довжиною.

Загалом параметри кульових млинів регламентовано стандартом ГОСТ 10141-91. Мельницы стержневые и шаровые общие технические требования

Схема конструкції кульового барабанного млина мокрого подрібнення наведена на рис. 1.1. При обертанні барабана тіла, що подрібнюють, завдяки тертю захоплюються внутрішньою поверхнею барабана і піднімаються на деяку висоту. Потім вільно падають або перекочуються донизу. Подрібнювана руда подається через центральний отвір в одній з кришок всередину барабана і, просуваючись уздовж нього, подрібнюється. Подрібнення відбувається під дією удару падаючих подрібнюючих тіл і від стирання та роздавлювання частинок між тілами. Діаметр куль зазвичай дорівнює 0.042-0.056 діаметра барабана.

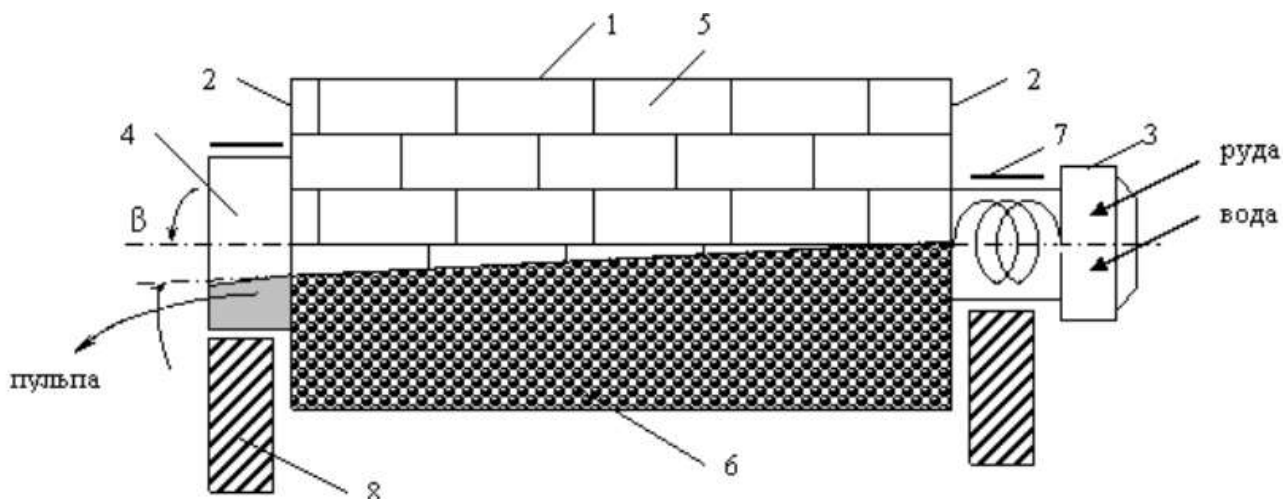


Рис 1.1 – Принципова схема барабанного млина: 1 – барабан, 2 – торцеві кришки, 3 – завантажувальна цапфа зі стрічковою спіраллю, 4 – розвантажувальна цапфа, 5 – футерування, 6 – рудно-кульове завантаження, 7 – підшипники, 8 – фундамент.

Конструктивні типи кульових барабанних млинів мокрого подрібнення різняться за способом розвантаження подрібненого продукту:

- кульові млини з розвантажувальними ґратами (рис 1.2, а);
- кульові млини з центральним розвантаженням МШЦ (рис 2, б);

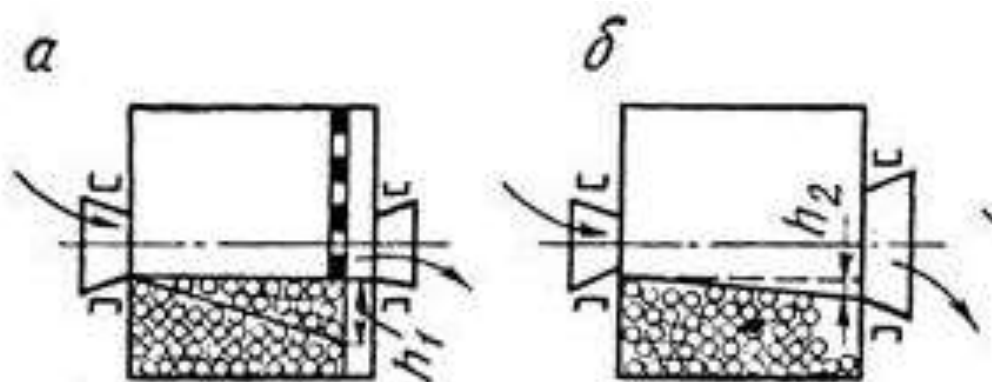


Рис 1.2 – Типи розвантаження млинів: а – з розвантажувальними ґратами; б - з центральним розвантаженням

У млинах з розвантажувальними ґратами (рис 1.2, а) як подрібнювальні тіла застосовуються кулі або рудна галя, подрібнений продукт проходить через отвори решітки, а потім піднімається ліфтерами до центру розвантажувальної цапфи млина. Різниця рівнів пульпи h_1 між завантажувальним і розвантажувальним кінцями барабана значна. Тому швидкість руху матеріалу вздовж млина порівняно висока, що зумовлює отримання продукту подрібнення грубішого, ніж у млинах з центральним розвантаженням.

Кульовий млин з центральним розвантаженням (рис 1.2, б) складається з циліндричного барабана з торцевими кришками, що мають пустотілі цапфи, за допомогою яких барабан спирається на корінні підшипники. Барабан і кришки футерують всередині сталевими плитами. У барабан завантажують сталеві різного діаметра (від 40 до 120 мм) Обертання барабану передається від електродвигуна за допомогою малої шестерні, насадженої на приводному валу, і зубчастого вінця на барабані. Вихідний матеріал завантажується в млин живильником через ліву порожнисту цапфу, з змінною завантажувальною лійкою. Подрібнений матеріал розвантажується через праву цапфу, футеровану розвантажувальною лійкою.

Барабан млина виготовляють зварюванням або клепаним із товстої листової сталі. Корінні підшипники робляться з великою опорною поверхнею з можливістю самовстановлення з бабітовими вкладишами, що мають кульову опору в корпусі підшипника.

У млині використовуються футерувальні плити, що слугують для запобігання зношення обічайки млина, для зменшення ковзання між обічайкою та подрібнюючим середовищем. Футерувальні плити виготовляють із чавуну, марганцевистої сталі, із гуми (рис 1.3).

Футерувальні плити роблять ребристими для зменшення ковзання між обічайкою та подрібнюючим середовищем. Деякі профілі футерування наведені на рис 1.3.

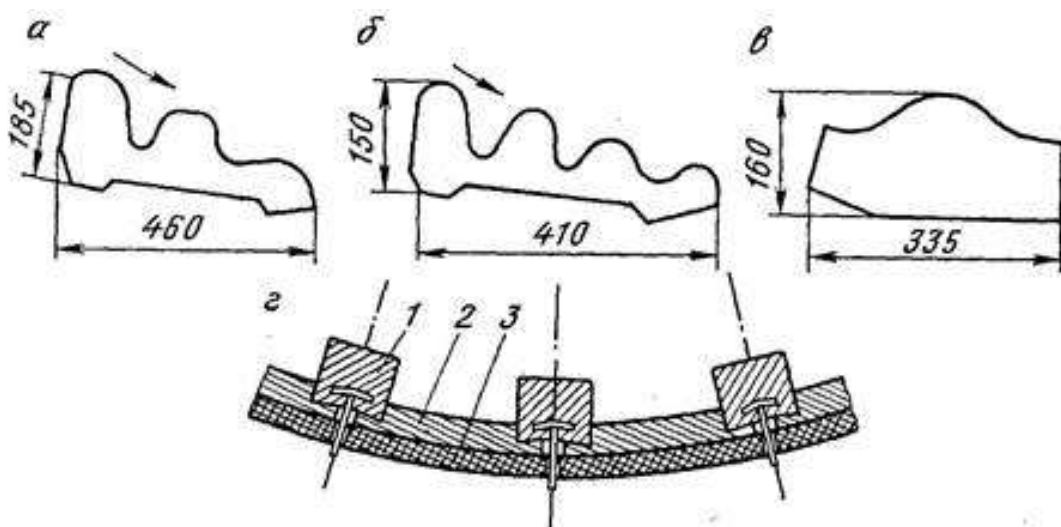


Рис 1.3 – Профілі футерування: а – ребриста типу «Норільськ-III»; б – ребриста типу «Норільськ-IV»; в – хвильового типу; г – гумова типу «Скега»

Футерувальні плити типу рис 1.3, а застосовують для млинів першої стадії подрібнення, футерування типу рис 1.3, б і г використовують у млинах другої та третьої стадії подрібнення, а футерування типу рис 1.3, в – для стрижневих млинів.

Приклад конструкції кульового барабанного млина мокрого подрібнення наведено на рис 1.4

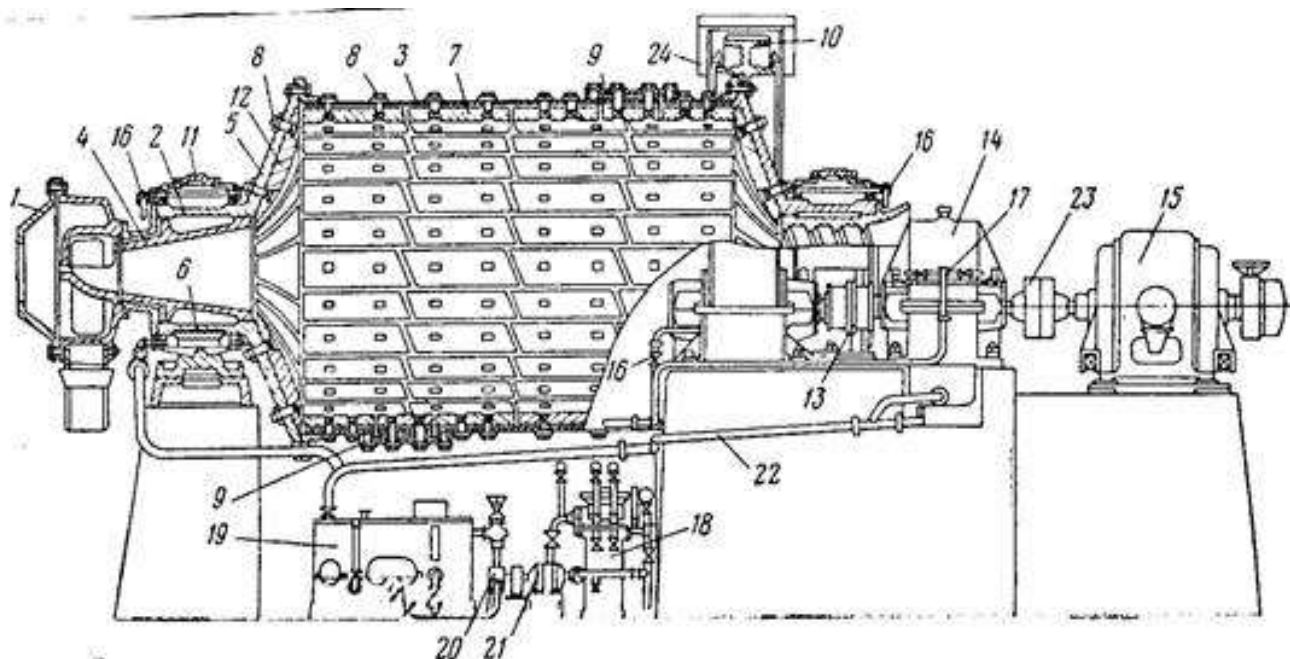


Рис. 1.4 – Кульовий млин МШЦ-2700x3600: 1 – живильник (комбінований); 2 – цапфи (горловини); 3 – барабан (обичайка); 4 - футерування-патрубок цапфи; 5 – кришки; 6 – корінний (головний) підшипник; 7 - футерування барабана; 8 - футерувальні болти; 9 – люки барабана; 10 - вінцева шестерня (зубчастий вінець); 11 – корпус підшипника; 12 - футерування кришки; 13 - муфта вал-шестірні; 14 – редуктор; 15 – головний електродвигун; 16 - нагнітальний оливопровід мастила млина; 17 - нагнітальний оливопровід редуктора; 18 - оливоохолоджувач; 19 - бак-відстійник; 20 - оливонасоси; 21 - двигун оливонасоса; 22 - зливний оливопровід; 23 - муфта головного двигуна; 24 - кожух вінцевої шестерні.

Важливим моментом експлуатації млина є швидкісні режими роботи, які визначають частотою обертання його барабана. Розрізняють наступні режими (рис 1.5):

- каскадний режим - кулі безперервно циркулюють, піднімаючись концентричними круговими траєкторіями і скочуючи паралельними шарами каскадом вниз. Подрібнення матеріалу відбувається головним чином за рахунок роздавлювання та стирання. Каскадний режим характеризується тонким подрібненням, підвищеним виходом шламів та зносом футерування;

- водоспадний режим - кулі піднімаються до певної висоти, після чого сходять із кругової траєкторії і як тіла, кинуті під кутом до горизонту, падають по параболічній траєкторії водоспадом униз, повертаючись на кругову траєкторію. Подрібнення матеріалу відбувається головним чином за рахунок удару, частково стирання, при цьому отримують грубіший кінцевий продукт.
- змішаний режим - кулі зовнішнього шару рухаються параболічною траєкторією, а кулі внутрішнього шару - перекочуються каскадом;
- критичний режим - починає центрифугувати лише зовнішній, нескінченно тонкий шар кульового завантаження, тобто. практично не центрифугує жоден шар і робота подрібнення продовжується. У міру збільшення частоти обертання вище критичної центрифугування вступають шари куль, розташовані ближче до осі млина. При певній надкритичній частоті всі шари куль починають центрифугувати, і їхнє падіння припиняється, при цьому робота подрібнення стає рівною нулю.

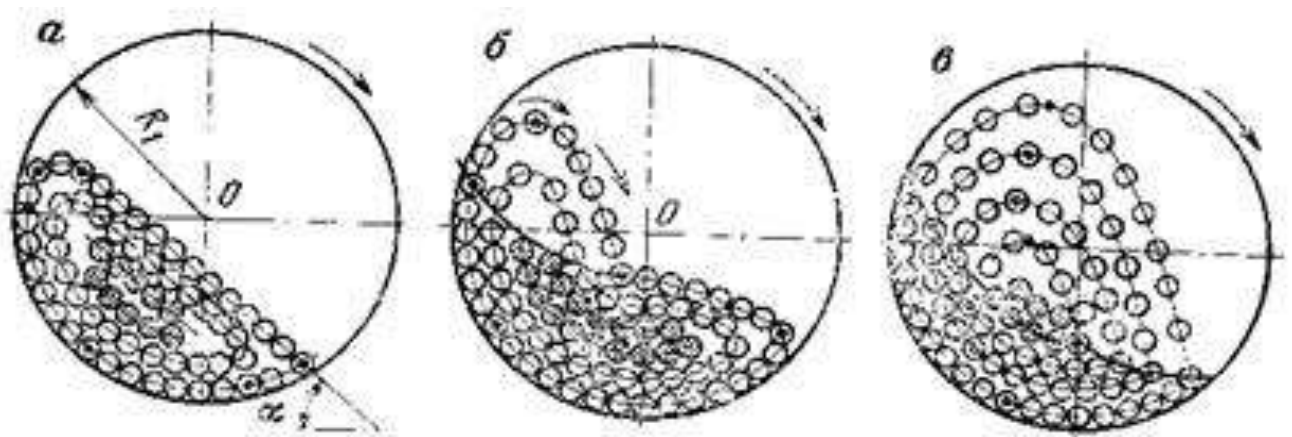


Рис 1.5 – Режимы работы млина: а – каскадный; б – смешанный; в - водоспадный

Як було сказано вище, суттєвий вплив на режим роботи, попри швидкість обертання, має форма футерування. При гладкому футерування швидкість обертання повинна бути більшою, ніж при застосування футерування з ребрами. З іншого боку футерування з ребрами швидше спрацьовується.

1.2. Аналіз методик розрахунку кульових млинів.

Як зазначено у [1-20], режим роботи кульового млина визначається двома основними параметрами, а саме:

- відносною частотою обертання барабана, що дорівнює відношенню фактичної частоти обертання до умовної критичної частоти обертання;
- коефіцієнтом відносного заповнення млина тілами, що мелють, який дорівнює відношенню об'єму мелючих тіл до внутрішнього об'єму барабана млина.

Слід зазначити, що вказана умовна критична частота обертання барабана млина відповідає такій частоті обертання, при якій сила інерції обертального руху мелючих тіл, центр тяжіння яких знаходиться на внутрішній поверхні барабана, дорівнює силі тяжіння цього тіла. При цьому подрібнююче тіло нескінченно малих розмірів, підняте у верхню точку барабана, знаходиться в динамічній рівновазі, тобто, не відривається від поверхні футерування барабана і обертається з нею як одне ціле (центрифугує).

Насипна щільність тіл, що мелють, залежить від їх фракційного складу і щільності матеріалу. Дослідники [1-20] при проведенні розрахунків приймають насипна щільність куль $\sim 4,6 \text{ т/м}^3$ і породи, що подрібнюється - $\gamma_s \sim 6,6 \text{ т/м}^3$. Відповідно, залежно від частоти обертання барабана млина, можливий один з наступних швидкісних режимів руху тіл, які були зазначені вище.

Базова методика визначення основних параметрів млинів, викладена у [1, 2, 8, 12-15, 19], дозволяє визначити наступні параметри:

- частоти обертання млина для кожного з режимів та траєкторії руху куль;
- продуктивність подрібнення;
- необхідну потужність приводного двигуна.

У роботах [1, 5, 6, 9, 16, 17] наведені ускладнені розрахунки, які не завжди доречні для проектування основних параметрів млина.

1.3. Аналіз програмних продуктів для симуляції руху завантаження в млинах

Спроби створення програмних засобів для симуляції руху тіл, що мелють, в барабані кульового млина ведуться досить давно.

На сьогоднішній день подібне програмне забезпечення дозволяє оцінити ефективність подрібнення матеріалу у млині без виготовлення експериментальних установок, а також вивчати складні параметри процесу подрібнення, недоступні для дослідження в лабораторних умовах. До ого ж використання таких програмних пакетів сприяє зниженню термінів проектування нових конструкцій млинів.

Розглянемо деякі програмні продукти для моделювання роботи кульових млинів.

Програму MillSoft було створено на основі досліджень вчених Б.К. Мішра (B.K. Mishra, професор Інституту Мінералів та Матеріалознавства) та Р.К. Раджамані (R.K. Rajamani, професор Університету штату Юта) у 1990 році [24, 28, 29]. Вона працює на основі методу дискретних елементів [30], за допомогою якого кожна куля задана радіусом, масою, моментом інерції та фізичними властивостями. Зіткнення куль змодельовані через прискорення, швидкості та переміщення кожного (рис 1.6).

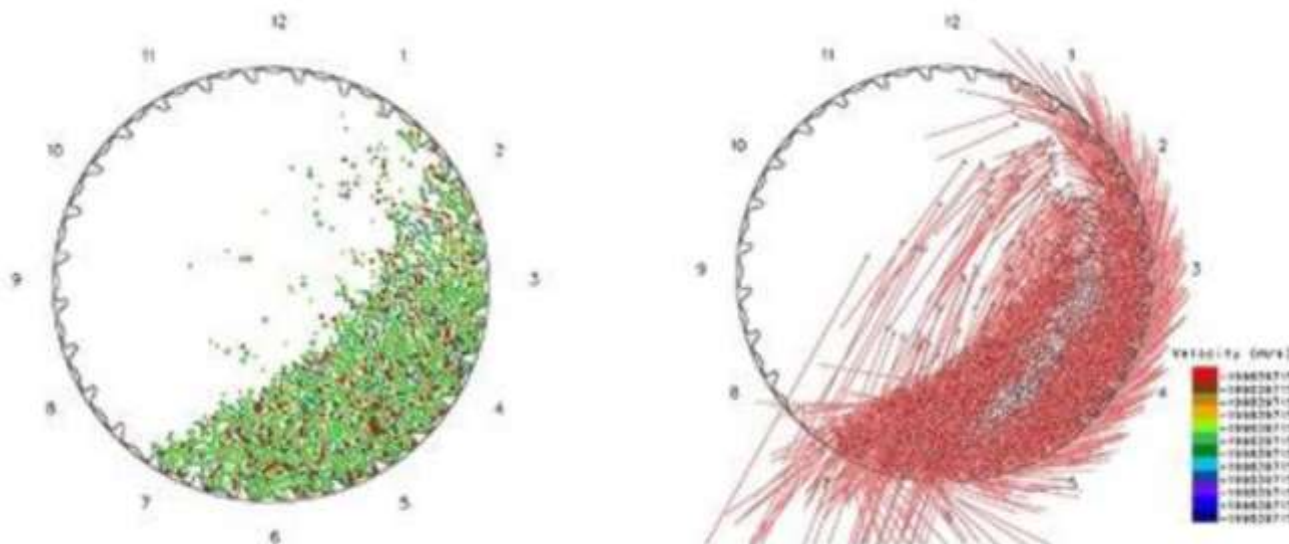


Рис. 1.6 - Результат роботи програми MILLSOFT [30]

Програма Milltraj створено на базі розрахункової моделі руху куль професора М.С. Повел (M.S. Powell) [40, 41] за допомогою дискретного моделювання. Рівняння дозволяють обчислити координати центру мас кульового

завантаження, кількість траєкторій, кут повороту кульового завантаження [32, 33, 34]. На рис 1.7 показано знімок екрану програми Milltraj [27, 39].

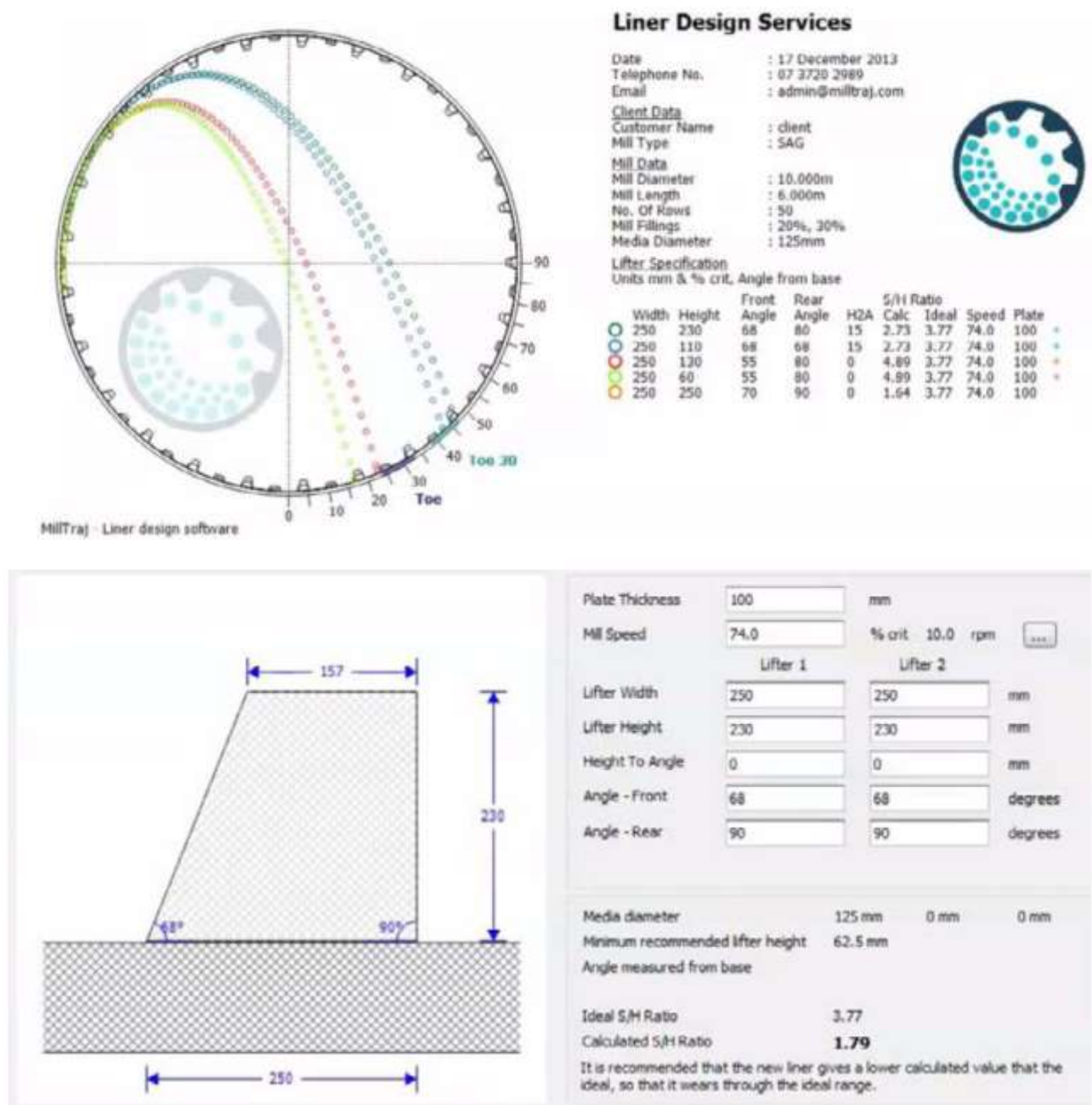


Рис 1.7 - Знімок екрану програми Milltraj [39]

Для перевірки математичної моделі в лабораторних умовах на експериментальному млині досліджувалися траєкторії руху куль за допомогою рентгенографії [34]. Всі отримані дані були зібрані в базу даних та використані у програмі MillTraj.

Програма JK SAG Charge розроблено на основі моделі руху кульового завантаження, яка дозволяє обчислювати потужність, споживане млином (рис 1.8).

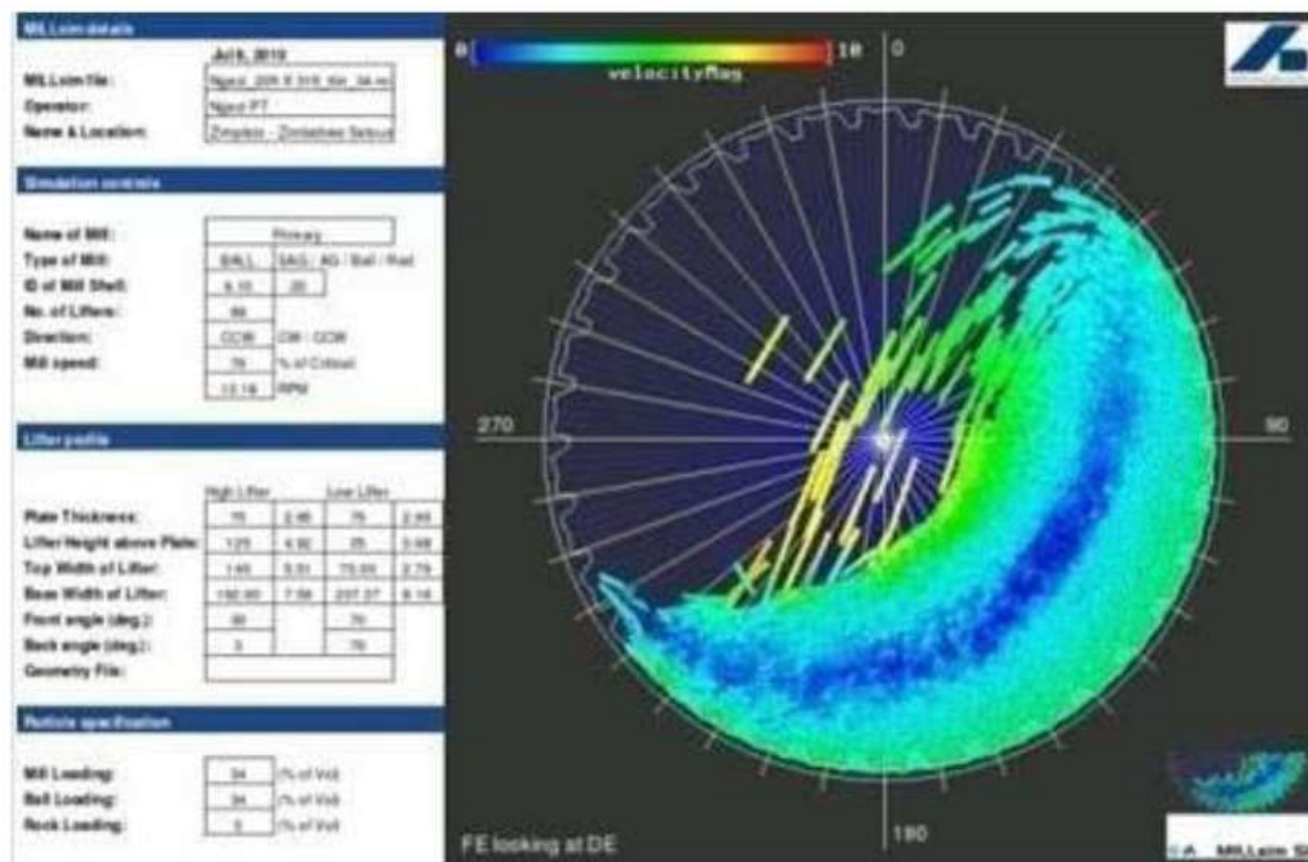


Рис 1.8 – Результат роботи програми JK SAG Charge [34]

Отримані дані з математичної моделі були порівняні з показниками роботи промислових та лабораторних кульових млинів та млинів подрібнення [38].

Математична модель П. Клірі із компанії "CSIRO" (Клейтон, Австралія) описує процес подрібнення на основі методу дискретних елементів [38].

Сили зіткнень обчислюються для кожного тіла, що мелє. Усі сили, що діють на кожен кулю, підсумовуються та обчислюється положення та швидкість кулі (рис 1.9).

У побудованій моделі обчислюється кут відриву і кут падіння тіл, що мелють, задається профіль футеровки [21, 22, 23]. З метою перевірки був використаний млин 592x200 мм. Цей млин є зменшеною копією (1:10) млина Alcoa SAC (рисунок 1.30). Кути відриву і падіння були перевірені експериментальним млином зі скляною кришкою за допомогою високошвидкісної камери.

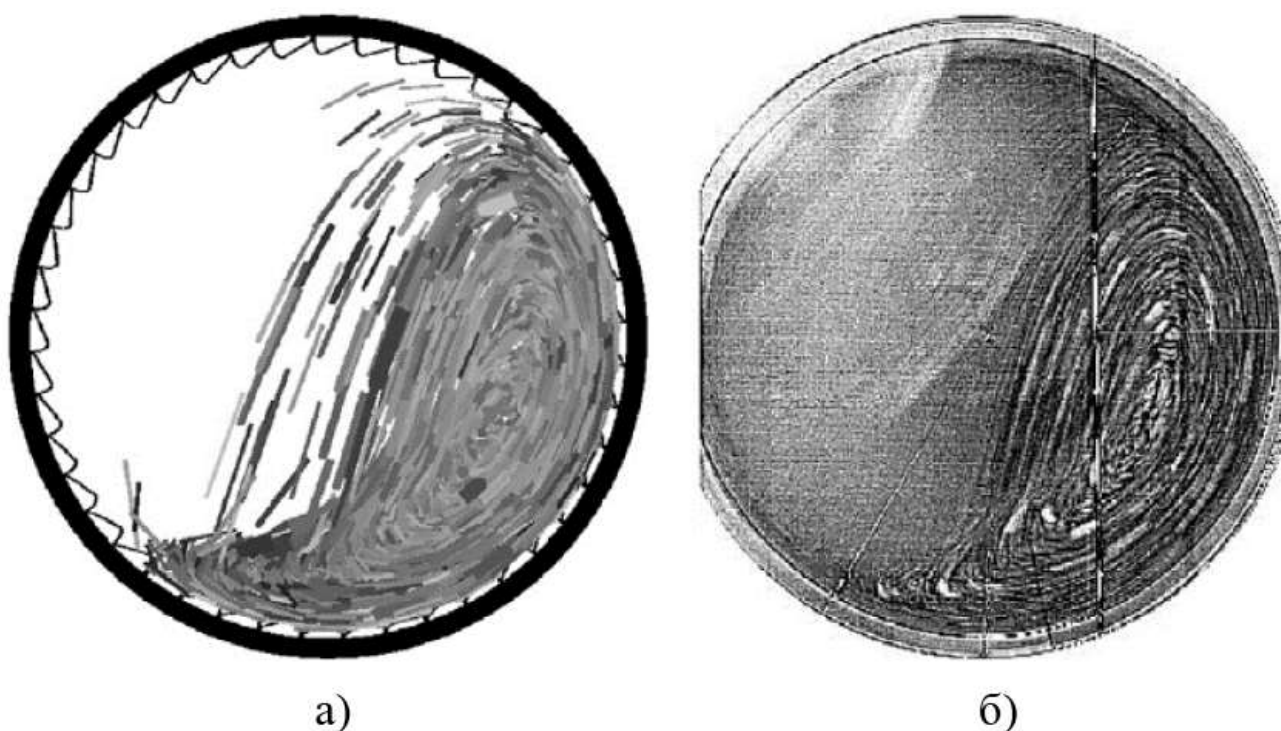


Рис 1.9 - Порівняння а) моделювання за допомогою методу дискретних елементів; б) фотографування експериментального лабораторного млина (коефіцієнт заповнення 0,35, відносна частота обертання 0,75) [21]

Програма Т. Койович з Науково-дослідного центру мінеральної сировини Julius Kruttschnitt (Квінсленд, Австралія) призначене для симуляції руху куль усередині млина.

Для млинів напів- та самоподрібнення була створена математична модель, яка дозволяє перевірити, наскільки ефективний заданий режим роботи (рис 1.10). Для заданого типорозміру млина програмою обчислюється ступінь заповнення, споживана потужність та частота обертання.



Рис 1.10 - Знімок екрана SAG Mill Online Charge Simulator

Програма ROCKY є одним з найновіших програмних забезпечень. Код програми заснований на успішних рішеннях компанії Conveyor Dynamics, Inc. [35, 36, 37].

Сьогодні програмним забезпеченням Rocky займається компанія "Granular Dynamics International, LLC" у партнерстві з "Engineering Simulation and Scientific Software Company (ESSC)".

Професор Лоуренс К. Норделл займався написанням математичної моделі, яка зараз називається Rocky [26]. Програма дозволяє проводити симуляції руху нециліндричних частинок, на відміну інших моделей.

Програмне забезпечення EDEM є інструментом інженерного аналізу на базі методу дискретних елементів, здатний генерувати складний аналіз, необхідний для вирішення завдань у галузі проектування, створення прототипів та оптимізації деяких процесів.

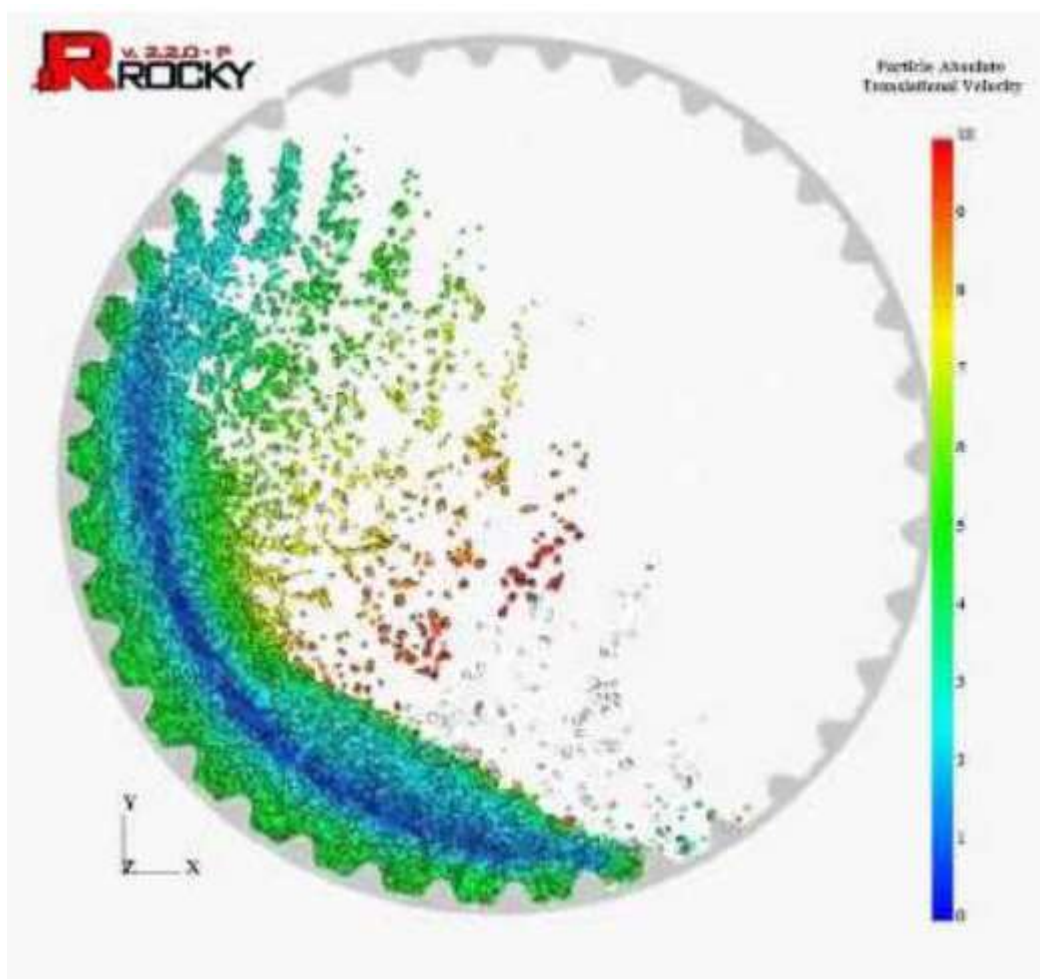


Рис 1.11 - Знімок екрану програми Rocky [35]

З EDEM можна швидко та легко створювати параметризовані моделі систем гранульованих твердих речовин. Тривимірні електронно-цифрові моделі були імпортовані із CAD систем за допомогою універсальних форматів файлів. Також можна формувати свої моделі частинок, додавати механічні, матеріальні та інші фізичні властивості. Вони можуть бути збережені в бібліотеці, що дозволяє створити набір властивостей, притаманних визначення процесів.

Програмний комплекс EDEM управляє та відстежує інформацію про кожну частинку окремо (маса, температура, швидкість тощо), а також про сили, що діють на неї. Програма може взяти до уваги форму частинки, не припускаючи, що це частинки сферичної форми. Для аналізу процесу, EDEM надає дані симуляції та 3D візуалізацію потоку частинок.

Аналіз взаємодії тіл, що мелють один з одним, а також тіл, що мелють, з корпусом млина виконувався за допомогою програмного комплексу EDEM Solution [25].

Взаємодія пружних тіл визначається за допомогою контактної моделі, заснованої на теорії Р. Міндліна та теорії Г. Герца [31].

Основою програмного комплексу EDEM до розрахунку великої кількості частинок є метод дискретних елементів. Ядро програмного комплексу використовує фізичну модель контактної взаємодії пружних тіл сферичної форми, що визначає, як частинки поведуться у процесі взаємодії друг з одним. В основі механіки контактної взаємодії лежить теорія пружної взаємодії Г. Герца та доповнена теорія зсуву Р. Міндліна

Аналізуючи існуючі рішення виробників футеровок, а також сучасні програмні продукти для симуляції руху тіл, що мелють, у кульових барабанних млинах можна зробити наступні висновки: геометричні параметри футеровок не досліджені в достатній мірі; більшість програмних продуктів призначені для вирішення вузьких завдань у галузі моделювання процесу подрібнення.

1.4. Мета, об'єкт, предмет, завдання та методи дослідження

Метою роботи є покращення режиму роботи кульових барабанних млинів мокрого подрібнення за рахунок обґрунтування експлуатаційних параметрів млина.

Об'єкт досліджень – процесу дроблення у кульових барабанних млинах мокрого подрібнення

Предмет дослідження – параметри кульових барабанних млинів мокрого подрібнення

Завдання дослідження

1. Розробка спрощеної математичної моделі кульового барабанного млина ;
2. Аналіз розробленої моделі;
3. Дослідження впливу форми футерування на частоту обертання та

потрібну потужність млина;

4. Розробка рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів млина.

Методи досліджень, що використовуються у роботі, включають патентний аналіз відомих конструкцій варіаторів; методи аналітичного моделювання; методи комп'ютерного моделювання.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ КУЛЬОВОГО МЛИНА

2.1. Загальна методика досліджень

Задля досягнення поставленої мети покращення режиму роботи кульових барабанних млинів мокрого подрібнення за рахунок обґрунтування експлуатаційних параметрів планується проведення наступних досліджень.

На першому етапі планується розробка спрощеної математичної моделі кульового барабанного млина. Така методика, попри свою спрощеність, дасть змогу швидко розрахувати основні параметри проектного млина.

Далі планується проведення аналіз розробленої моделі з метою визначення її адекватності та корегування формул на базі аналізу технічних характеристик відомих конструкцій млинів.

На наступному етапі планується проведення дослідження впливу форми футерування на частоту обертання та потрібну потужність млина за допомогою методів комп'ютерного моделювання. Досліджується вплив висоти та кількості ліфтерів на робочу частоту обертання барабану з міркувань, що максимум висоти падіння кулі досягається при куті відриву $54^{\circ}40'$.

Наприкінці планується розробка рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів млина.

2.2. Спрощена математична модель млина

Вихідні дані

- продуктивність млина Q , т/год;
- максимальний розмір частинок руди $d_{\max}$;
- середній діаметр частинок руди до подрібнення d_n ;
- середній діаметр частинок руди після подрібнення d_k .
- насипна щільність куль, що дорівнює γ_k ;
- коефіцієнт заповнення барабана тілами, що мелють, $k_z = 0,2 \dots 0,35$
- щільність сталі $\rho_{\text{ст}}$;

- ККД приводу млина $\eta = 0,9-0,94$.

Розрахунок

Рекомендоване співвідношення довжини млина до його діаметру [8, 12-15, 19]

$$\frac{L}{D} = 1,5..2 \quad (2.1)$$

Дослідний коефіцієнт, що враховує вплив розмірів куль, кульове завантаження, щільність пульпи при мокрому помелі, природу матеріалу, що подрібнюється, крупність харчування і готового продукту, циркуляційне навантаження, схему подрібнення та ін. приблизно визначається [8, 12-15, 19]

$$k = (2.3 \cdot 10^{-3} \dots 8 \cdot 10^{-3}) \cdot \left(\frac{d_n}{d_k} \right), \quad (2.2)$$

де d_n - середній діаметр частинок руди до подрібнення, мм; d_k – середній діаметр частинок руди після подрібнення, мм.

Продуктивність млина визначається за емпіричною формулою [8, 12-15, 19]

$$Q = k \cdot V \cdot D^{0.6} \quad (2.3)$$

де V - об'єм барабана, m^3 ; D – внутрішній діаметр барабана, м.

Виходячі з формул (2.1) і (2.3), визначимо діаметр та довжину барабану млина

$$\begin{cases} \frac{L}{D} = 1,5...2 \\ Q = k \cdot V \cdot D^{0.6} \end{cases}$$

$$D = \sqrt[3.6]{\frac{4 \cdot Q}{(1,5...2) \cdot \pi \cdot k}} \quad (2.4)$$

$$L = (1,5...2) \cdot D$$

Звідки об'єм барабану млина, m^3

$$V = 0,5 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L \quad (2.5)$$

Критична швидкість обертання об/хв [8, 12-15, 19]

$$n_{kp} = \frac{42,4}{\sqrt{D}} \quad (2.6)$$

Робоча швидкість обертання, об/хв [8, 12-15, 19]

$$n = 0.75 \cdot n_{кр} \quad (2.7)$$

Оптимальний діаметр куль визначають наближено за формулою [8, 12-15, 19]:

$$d_{\kappa} = 28 \cdot \sqrt[3]{d_{\max}} \quad (2.8)$$

Маса кульового завантаження [8, 12-15, 19]:

$$M_{\kappa\mathcal{Z}} = k_{\mathcal{Z}} \cdot \gamma_{\kappa} \cdot V \quad (2.9)$$

Маса однієї сталеві кулі:

$$m_{\kappa} = 0,5236 \cdot \rho_{cm} \cdot d_{\kappa}^3 \quad (2.10)$$

Кількість куль у завантаженні [8, 12-15, 19]:

$$z = \frac{M_{\kappa\mathcal{Z}}}{m_{\kappa}} \quad (2.11)$$

Маса завантаження млина [8, 12-15, 19]

$$m_{\mathcal{ZM}} = 1.14 \cdot M_{\kappa\mathcal{Z}}, \quad (2.12)$$

Маса подрібнюваного матеріалу, що знаходиться в млин [8, 12-15, 19]і:

$$m_p = 0,14 \cdot M_{\kappa\mathcal{Z}} \quad (2.13)$$

Потрібна потужність, Вт [8, 12-15, 19]

$$N = \frac{0.2 \cdot M_{\kappa\mathcal{Z}} \cdot D \cdot n}{\eta} \quad (2.14)$$

2.3. Аналіз математичної моделі млина

Мета аналізу – визначення адекватності побудованої математичної моделі.

Для аналізу скористаємося відомими технічними характеристиками існуючих млинів.

Аналізуючи рекомендоване співвідношення довжини млина до його діаметру на основі наведених вище таблиць, можна зазначити, що наведене співвідношення у формулі (2.1) потребує корегування, оскільки воно різне для млинів з центральним розвантаженням та розвантаженням крізь решітку.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики кульових млинів з центральним розвантаженням для мокрого подрібнення [8, 10, 11, 15, 18]

	Продуктивність, т/год	Внутрішній діаметр барабана (без футерування), мм	Довжина барабана, мм	Товщина футерування, мм	Номінальний робочий об'єм барабана, м³	Швидкість обертання барабана, об/хв.	Потужність електродвигуна, кВт	Маса млина з редуктором (без електрообладнання та кили), т	Маса кульового завантаження, т
МШЦ 900х1800		900	1800	70	0,9	42	22	5,2	
МШЦ 1500х3000		1500	3000	100	4	30	110	23	
МШЦ 2100х2200	7..22	2100	2200	100	6,3	24	200	45	15
МШЦ 2100х3000	10..29	2100	3000	100	8,5	24	200	48	16,5
МШЦ 2700х3600	22..63	2700	3600	120	17,5	21	400	81	34
МШЦ 3200х3100	30..86	3200	3100	120	22,4	19,8	630	104	47
МШЦ 3200х4500	42..121	3200	4500	120	32	19,8	800	160	61
МШЦ 3600х4500	50..150	3600	4500	120	40	18	1120	172	90
МШЦ 3600х5500	65..183	3600	5500	120	49	18,2	1250	181	100
МШЦ 4500х6000	120..340	4500	6000	140	84	118	2500	312	120

Отже скориговане співвідношення довжини млина до його діаметру:

- для МШЦ

$$\frac{L}{D} = 1..2 \quad (2.15)$$

- для МШР

$$\frac{L}{D} = 0,7..1,5 \quad (2.16)$$

Залежність товщини футерування від діаметру барабану, подана у роботі [15] наведена у табл 2.1, 2.2. Апроксимуємо ці данні та отримаємо залежність у вигляді функції (рис 2.1)

$$h_{\phi} = 39,779 \cdot \ln(D+82,107) - 197,533 \quad (2.17)$$

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики кульових млинів з розвантаженням через решітку для мокрого подрібнення [8, 10, 11, 15, 18]

	Продуктивність, т/год	Внутрішній діаметр барабана без футерування, мм	Довжина барабана, мм	Товщина футерування, мм	Номінальний робочий об'єм барабана, м ³	Швидкість обертання барабана, об/хв.	Потужність електродвигуна, кВт	Експлуатаційна маса, т	Маса млина з редуктором без електродвигуна і куль, т	Маса кульового завантаження, т
МШР 900х900		900	900	70	0,45	40	15		1	
МШР 1200х1200		1200	1200	100	1	735	28	10,3	10,3	
МШР 1500х1500		1500	1500	100	2,2	970	55	15,4		
МШР 2100х1500	6..18	2100	1500	100	4,3	24,4	132	41		10
МШР 2100х2200	8,5..26	2100	2200	100	6,3	24,6	200	49		15
МШР 2100х3000	11..34	2100	3000	100	8,6	24,6	200	51		20
МШР 2700х2100	16..47	2700	2120	120	10	21	400	81		21
МШР 2700х2700		2700	2700	120	13	21	315		31	
МШР 2700х3600	25..73	2700	3600	120	17,5	21	400	91		36
МШР 3200х3100	35..103	3200	3100	120	22	19,8	630	113		45
МШР 3600х4000		3600	4000	120	35,5	18	1000		82	82
МШР 3600х5000	68..192	3600	5000	120	45	18	1250	185		100
МШР 4000х5000		4000	5000	140	55	17,18	2000	261,5		
МШР 4500х5000		4500	5000	140	71	16,66	2500	295,9	150	

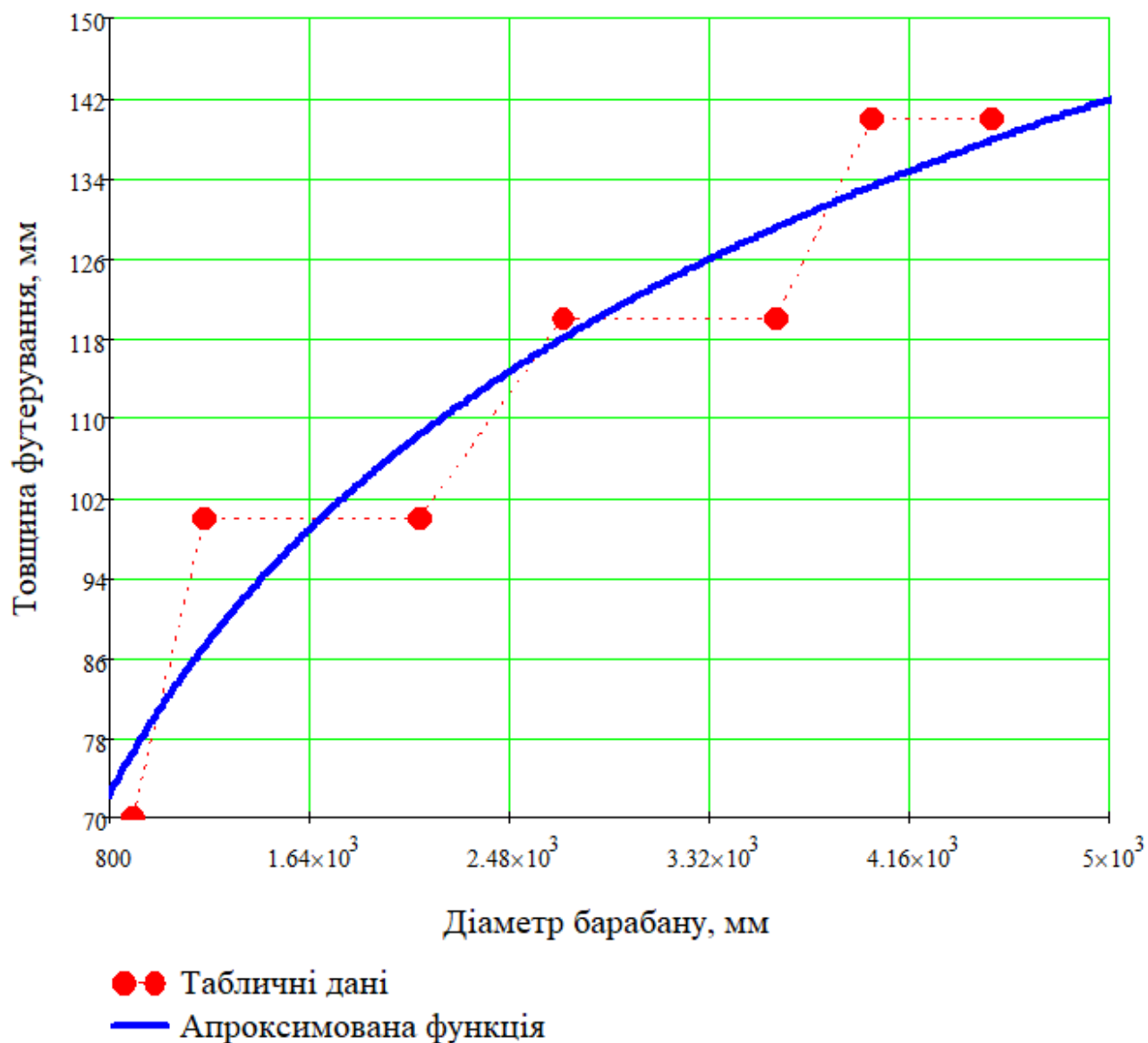


Рис 2.1 - Залежність товщини футерування від діаметру барабану

Проаналізуємо розрахункову кількість обертів барабану млина та на основі даних реальних зразків.

Відповідний графік наведено на рис 2.2.

З графіка видно, що реальні млини мають дещо збільшену кількість обертів, ніж розрахункова за математичною моделлю. Різниця складає 8,7%..9,8%.

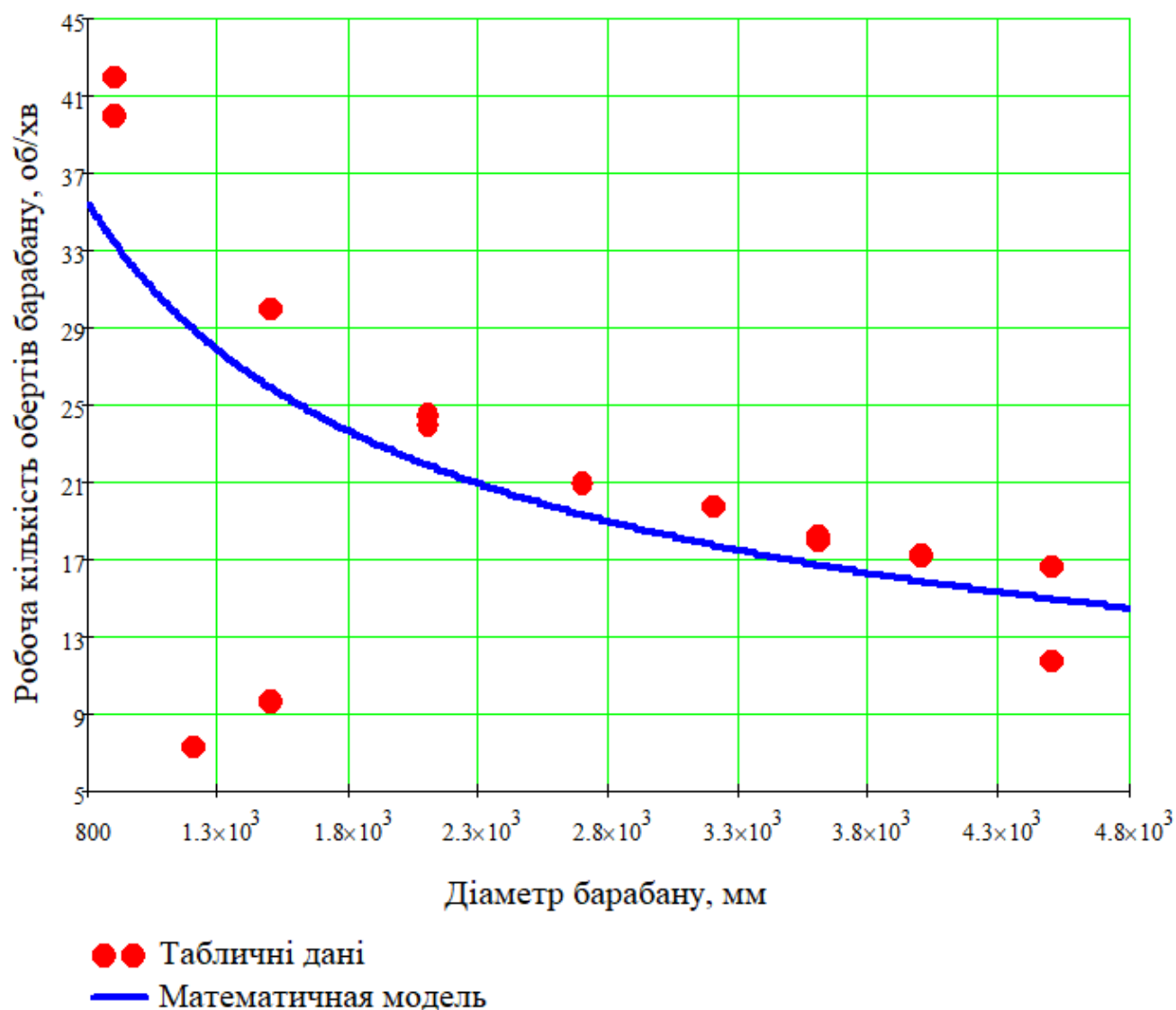


Рис 2.2 - Залежність робочої кількості обертів від діаметру барабану млина

Додатково проаналізуємо розрахункову потужність млина та на основі даних реальних зразків. Відповідний графік наведено на рис 2.3.

З графіка видно, що реальні млини мають збільшену потужність, ніж розрахункова за математичною моделлю, причому при збільшенні типорозміру ця різниця експоненційно збільшується.

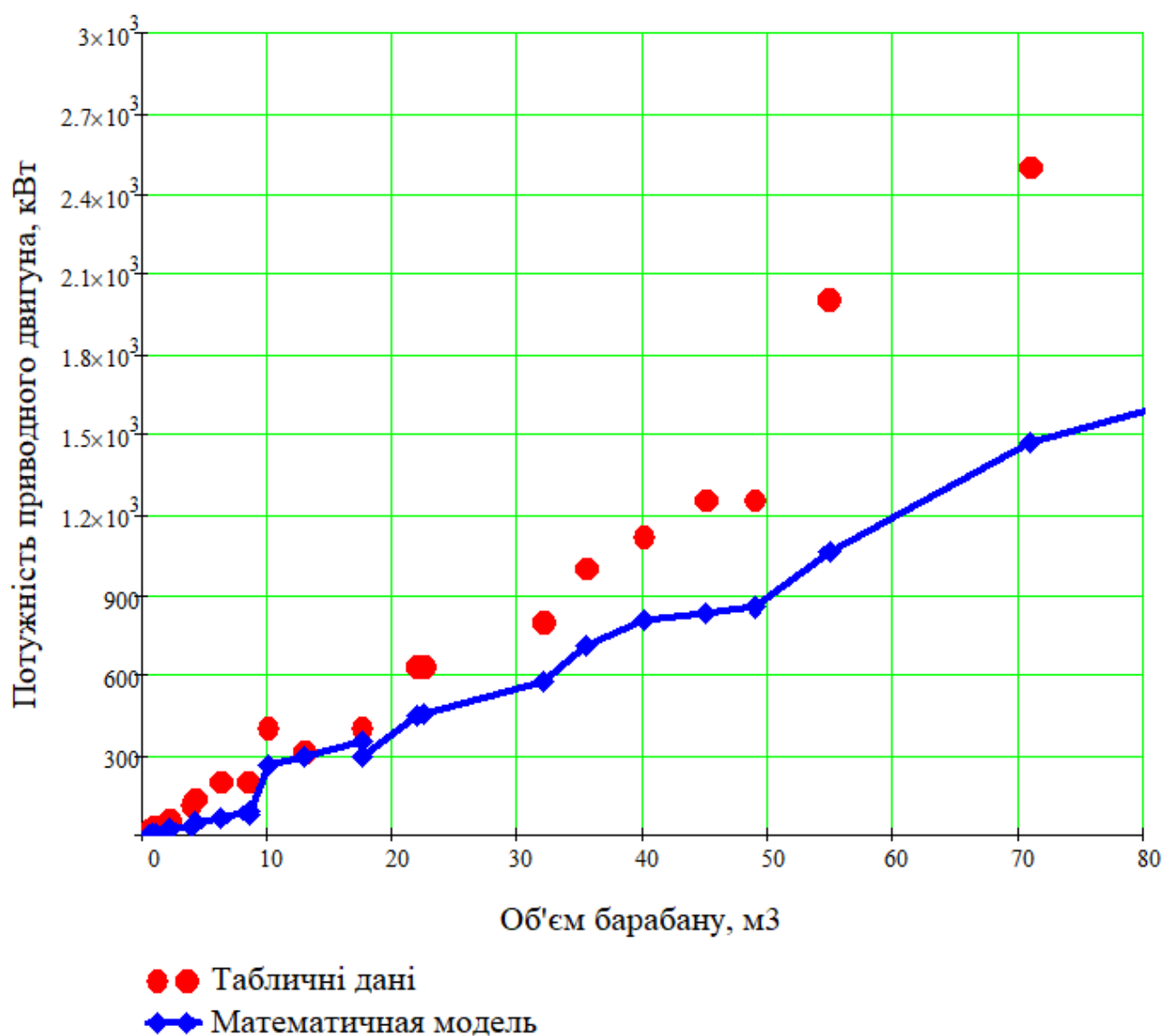


Рис 2.3 – Залежність потужності приводного двигуна млина від об'єму барабану

Наступним питанням, яке не розглядалося у розрахункових методиках - це вплив ліфтерів – виступів на футеруванні, на кут відриву куль від барабану.

2.4. Комп'ютерне дослідження впливу форми футерування на рух куль у млині

2.4.1. Методика проведення комп'ютерного дослідження впливу форми футерування на рух куль у млині

Побудова розрахункової моделі. Для дослідження впливу форми футерування на рух куль у млині, а також отримання чисельних значень кінематичних характеристик тіл, що мелють, потрібно провести експеримент за допомогою комп'ютерного моделювання.

З метою зменшення часу розрахунку, у якості базового млина використаємо млин з діаметром барабану $D = 900$ мм.

Розмір максимального шматка дробленої породи - 10 мм

Середній розмір шматків руди до подрібнення 5 мм

Середній розмір шматків руди після подрібнення 0,05 мм.

Діаметр куль згідно з розробленою математичною моделлю складатиме $d_k = 60$ мм.

Визначимо кількість куль для експериментальної моделі.

Загальна кількість куль 1334. Для кільця довжиною 200 мм кількість куль становитиме 160, що становитиме 145 кг.

Маса шматків руди для кільця довжиною 200 мм складатиме 20 кг.

В якості досліджуваних факторів при проведенні лабораторних та чисельних експериментів були прийняті (рисунок 2.4):

- висота виступів, h (X1), 10, 30, 60 мм.
- кількість виступів, n_l (X2) 10, 15, 20;
- частота обертання, $n_{об}$ (X3) 40, 35, 30 об/хв;

У якості функції відгуку використовується кут відриву куль від барабану α_k (рис 2.4) та потужність співударінь N_y .

Таблиця 2.3 – Матриця експерименту

№ досліду	X1	X2	X3	α_k	N _y
1	10	10	40		
2	10	10	35		
3	10	10	30		
4	10	15	40		
5	10	15	35		
6	10	15	30		
7	10	20	40		
8	10	20	35		
9	10	20	30		
10	30	10	40		
11	30	10	35		
12	30	10	30		
13	30	15	40		
14	30	15	35		
15	30	15	30		
16	30	20	40		
17	30	20	35		
18	30	20	30		
19	60	10	40		
20	60	10	35		
21	60	10	30		
22	60	15	40		
23	60	15	35		
24	60	15	30		
25	60	20	40		
26	60	20	35		
27	60	20	30		

Обмеження та спрощення DEM –методу:

1. Обмежена кількість часток у розрахунку (якомога менша кількість)
2. Мінімальна кількість граней у часток (ідеальною є сфера)
3. Мінімальна інтенсивність процесу (мінімально можливі швидкості руху)
4. За можливості не використовувати функції зношення, адгезії і дроблення
5. За можливості відмовитися від використання CFD-модуля, що розраховує рух у трифазному середовищі

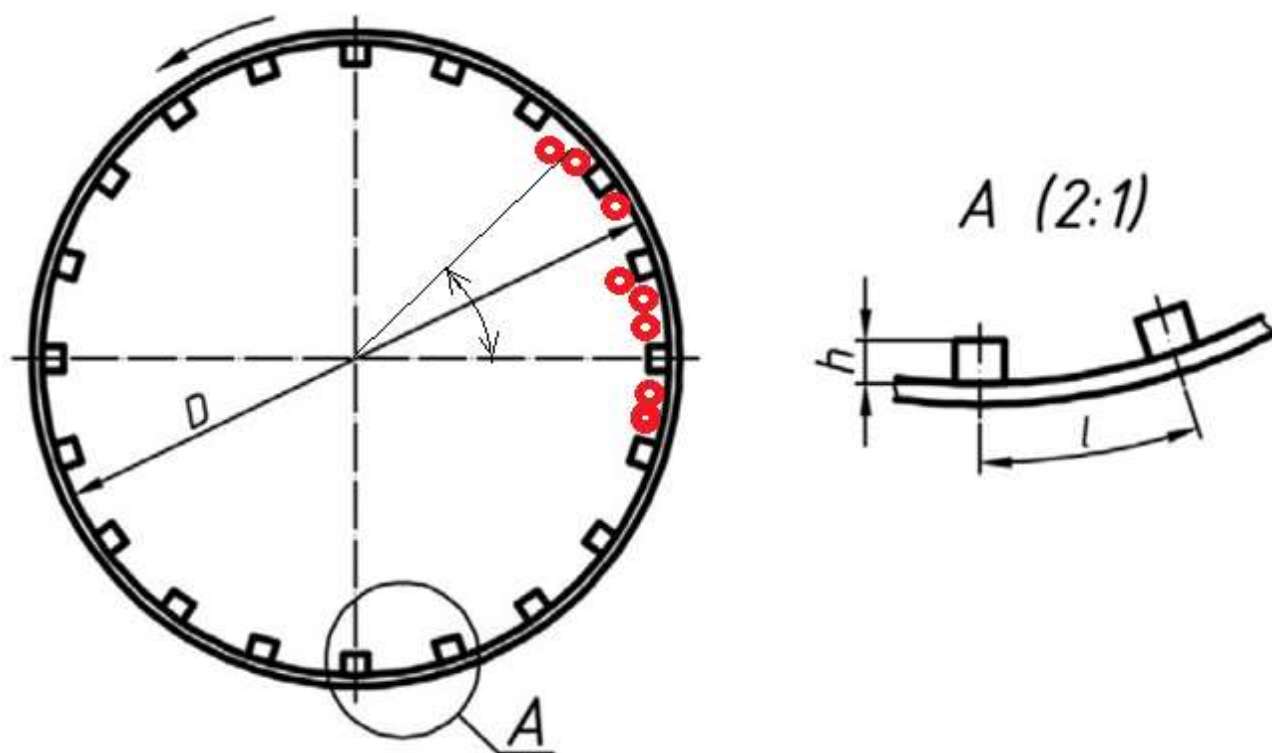


Рис 2.4 – Варійовані чинники

Обмеження та спрощення, прийняті у розрахунковій моделі:

1. Відсікання нижньої частина гранулометричного складу породи, що подрібнюється – розраховуються тільки крупні частинки;
2. У моделі кулі і порода має форму сфери;
3. За можливості не використовувати функції зношення, адгезії і дроблення
4. Використання сухого процесу подрібнення
5. Використання періодичних границь – розрахунок майже плоского перетину млина

У якості матеріалів використуємо для тіл, що мелють - Сталь ШХ-15, корпусу млина - Сталь 35, значення фізичних параметрів яких наведено у таблиці 2.4 [Марочник стали и сплавов. URL: <http://www.splav-kharkov.com/main.php>.].

Таблиця 2.4 Основні характеристики матеріалів

Параметр	Матеріал тіл, що мелють Сталь ШХ-15	Матеріал футеровки Сталь 35
Коефіцієнт Пуассона	0,26	0,29
Щільність, кг/м ³	7812	7830
Модуль зсуву, Па	$8 \cdot 10^{10}$	$8,2 \cdot 10^{10}$

Корпус кульового млина з футеруванням побудовані у САПР SolidWorks (рис 2.5) та експортовані Rocky DEM.

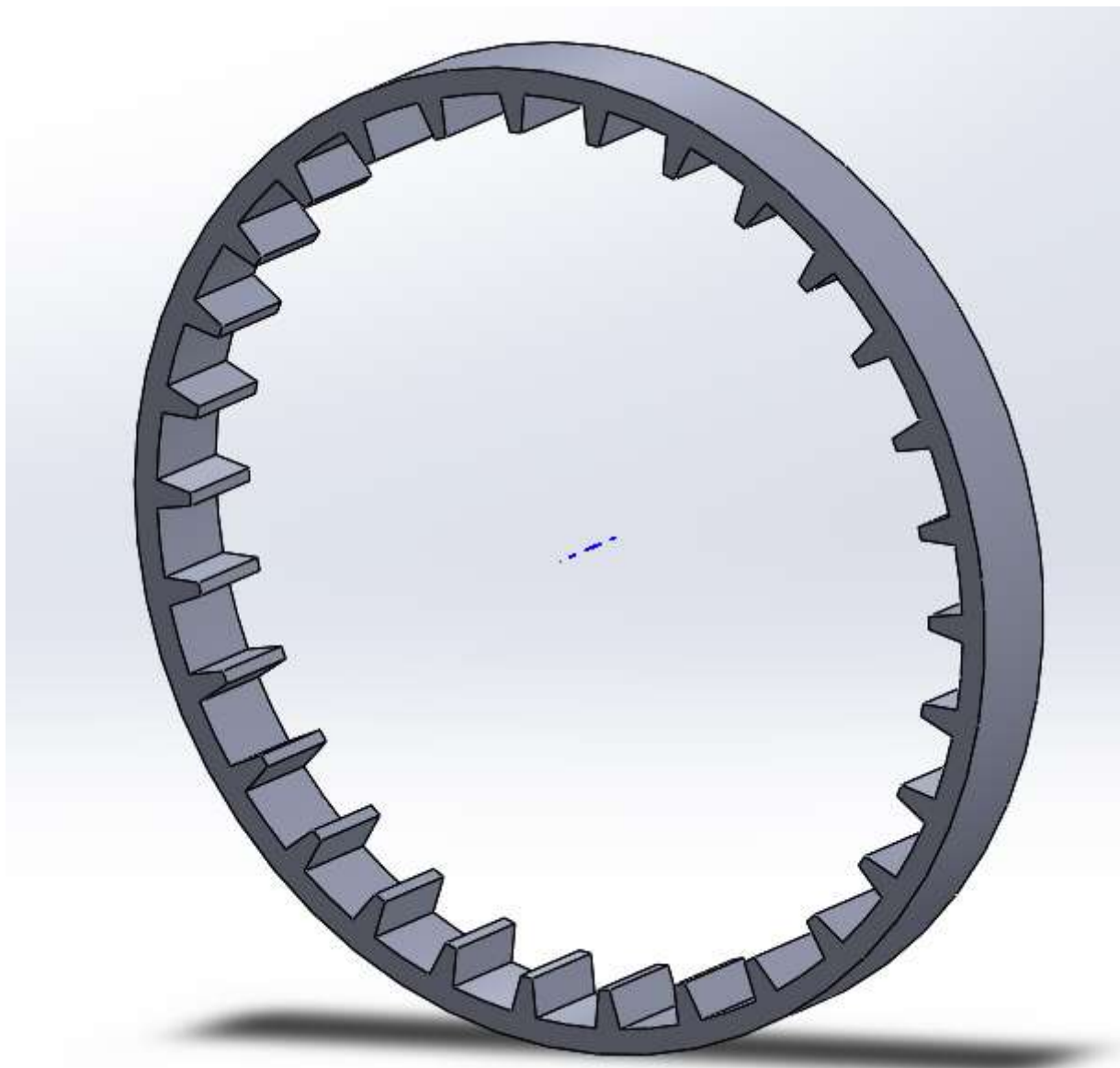


Рис 2.5- Твердотільна модель футерування

Послідовність створення нового проекту у Rocky DEM simulation

1. У розділі Physics встановлюються загальні константи такі, як прискорення вільного падіння та ін. За проектом моделювання роботи млина ніяких змін у цьому розділі не робимо.
2. У розділі Modules визначається параметри збирання статистичних даних про зіткнення тіл у моделі.

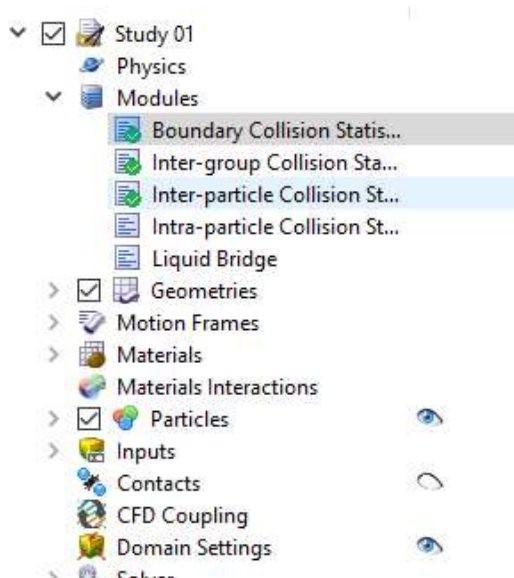


Рис 2.6 - Розділ Modules

Встановлюємо відмітки про збирання даних про зіткнення часток з границями, зіткнення груп часток і зіткнення часток між собою

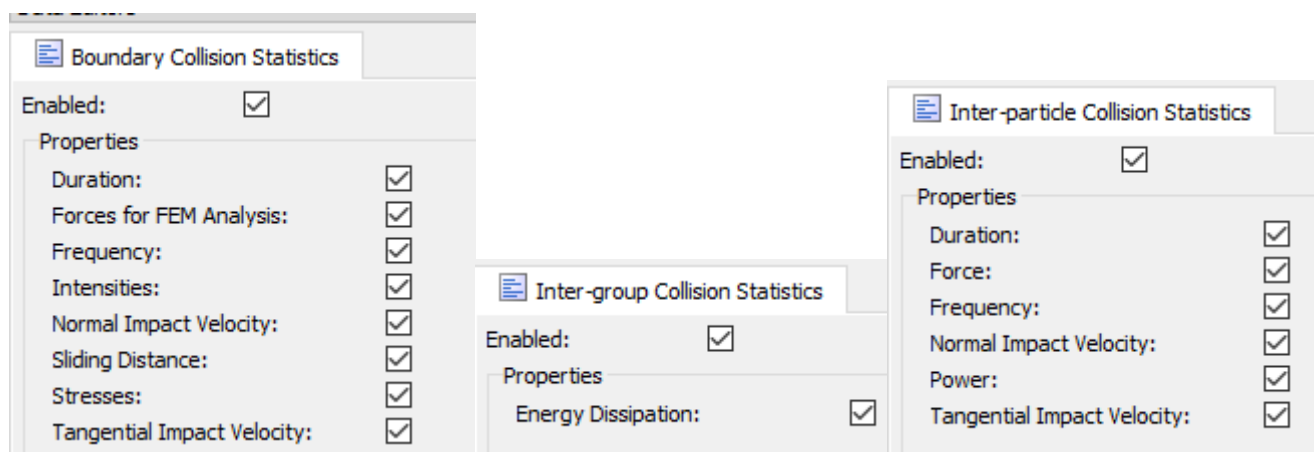


Рис 2.7 - Розділ Modules

3. Розділ Geometries визначає геометрію моделі. Тут завантажується модель перетину барабану млина. Модель будується у SolidWorks та зберігається у форматі STL.

4. У розділі Motion Frames задаються параметри обертання барабану млина.

Встановлюється:

- Motions – Type (тип руху) –Rotation (обертання);
- Initial Angular Velocity (початкова кутова швидкість) задається швидкість обертання барабану у рад/с за встановленою віссю Z;
- Relative position (початкова позиція осі обертання) – виставляється за координатами XYZ.

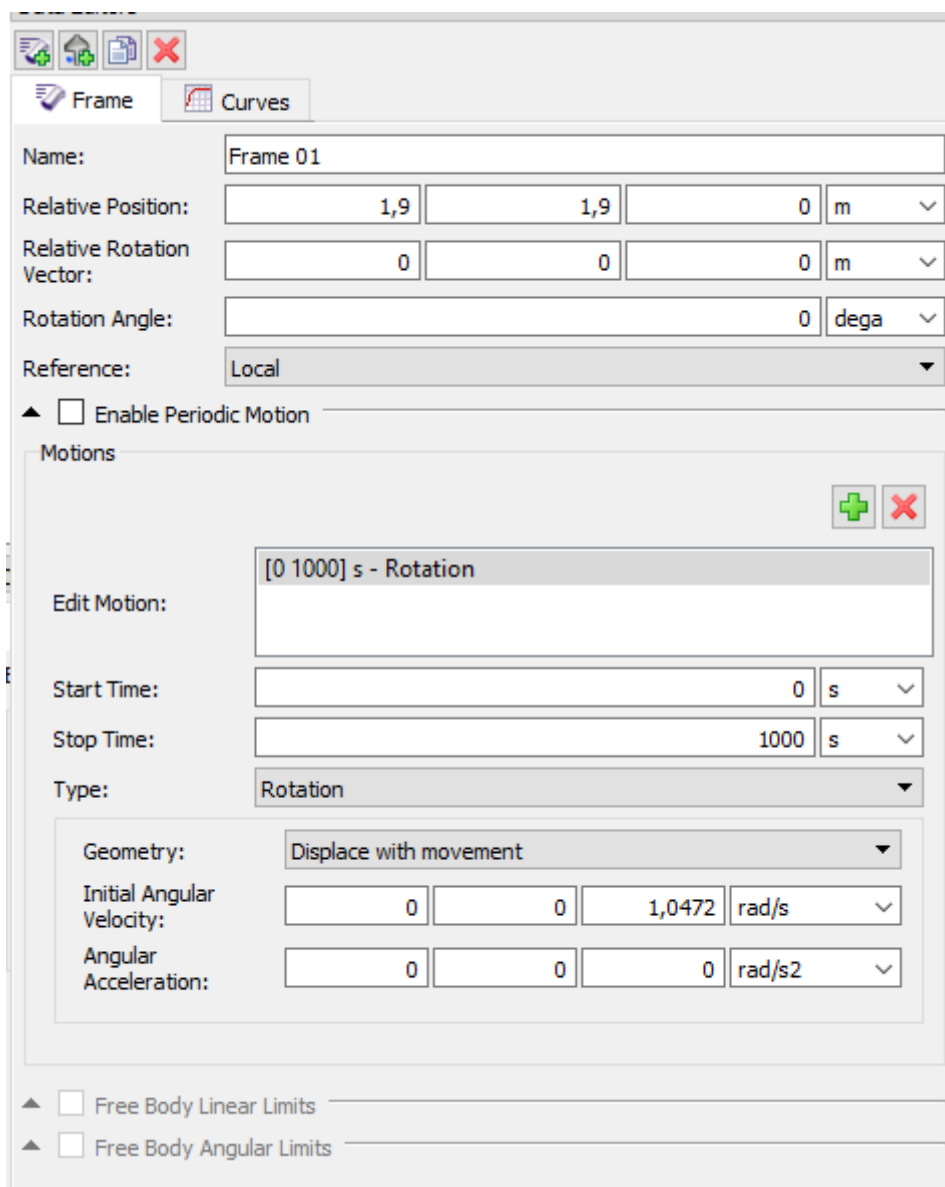


Рис 2.7 - Розділ Motion Frames

5. У розділі Materials визначаються матеріали тіл, що будуть використовуватися у моделі. У моделі будуть використовуватися 2 матеріали – сталь для куль і барабану та залізна руда для частинок породи.

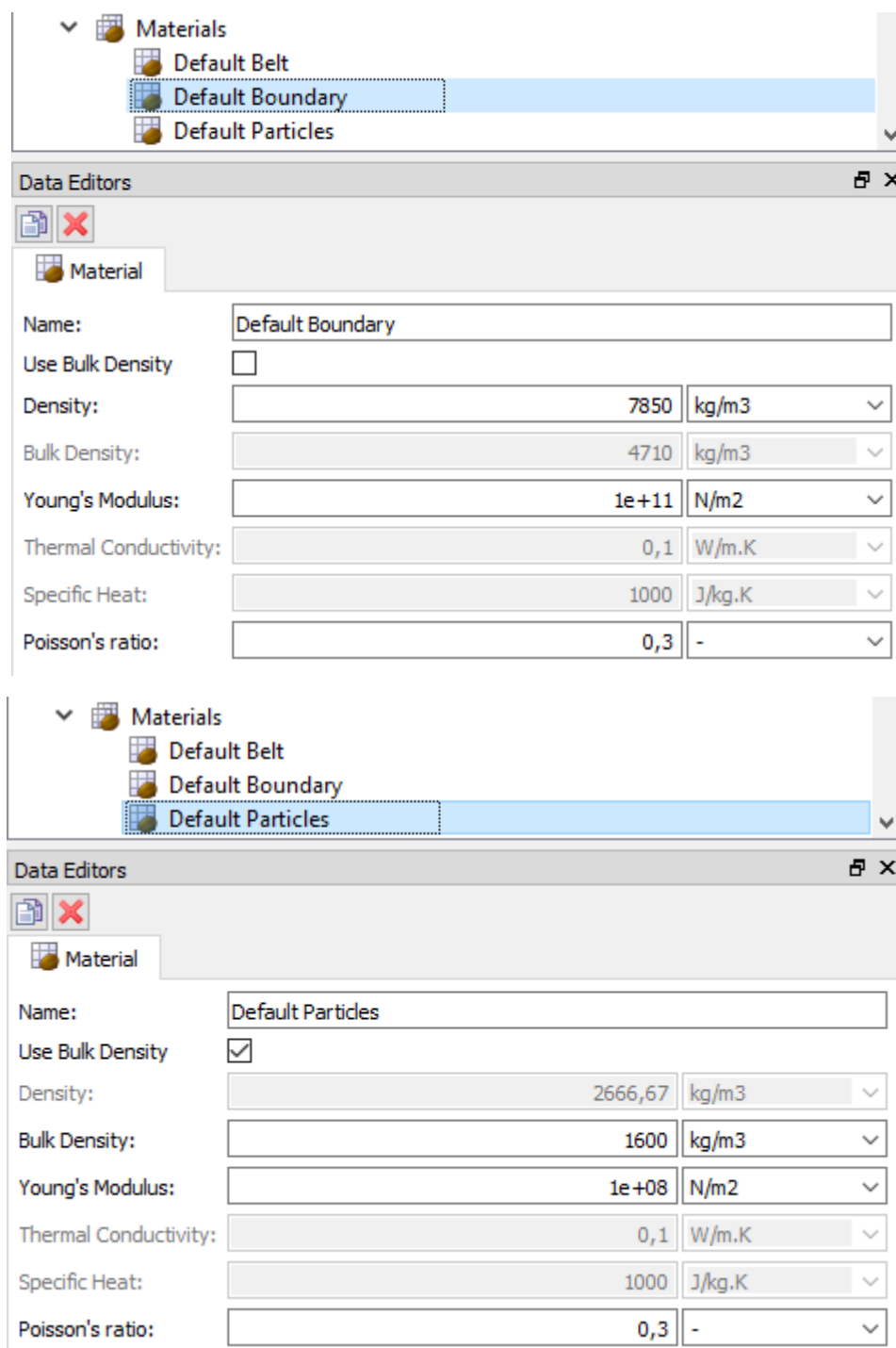


Рис 2.8 - Розділ Materials

6. У розділі Particles задаються частинки, які будуть використовуватися у моделі. У моделі використовуються 2 вида частинок:

- кулі, що мають форму сфери з радіусом 30 мм та матеріалом - сталь

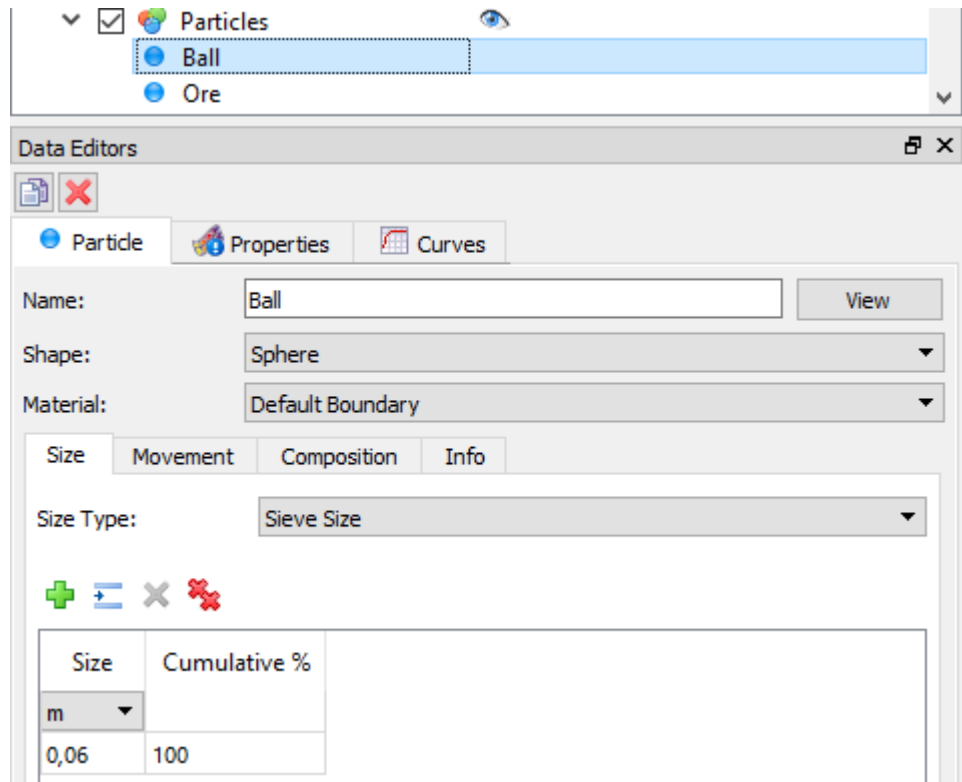


Рис 2.9 - Розділ Particles. Кулі

- Частинки породи, форма – polyhedron з розмірами від 5 мм до 0,5 мм

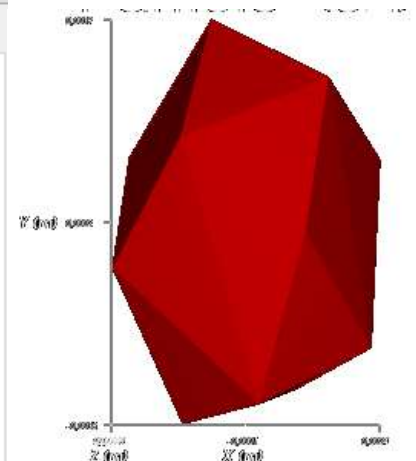
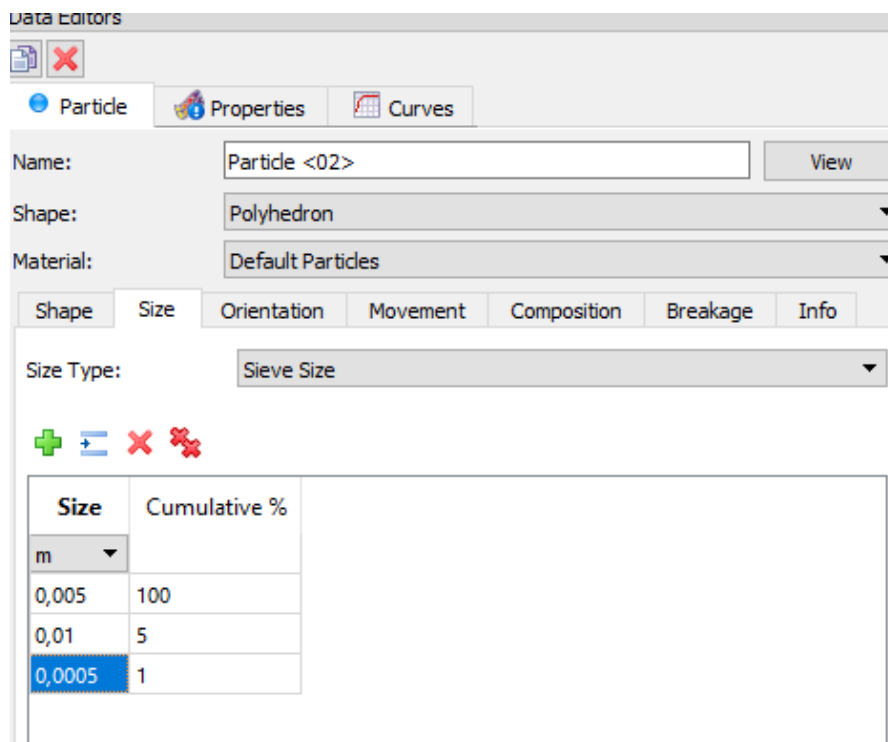


Рис 2.10 - Розділ Particles. Порода

7. У розділ Inputs визначаємо скільки і якого матеріалу буде завантажено у
МЛИН

Data Editors

Input | Info

Name: Volume Fill <1>

Seed Coordinates: 0,5 0,5 0,1 m

Custom Geometries:

☒ Мельница <01>

Use Custom Geometries to Compute ☐

Box bounds

Center Coordinates: 0,502082 0,505857 0,1 m

Dimensions: 0,761268 0,359553 0,2 m

Standard

+ = - ✖

Particle	Mass	Temperature
	kg	K
Particle <01>	145	0
Particle <02>	20	0

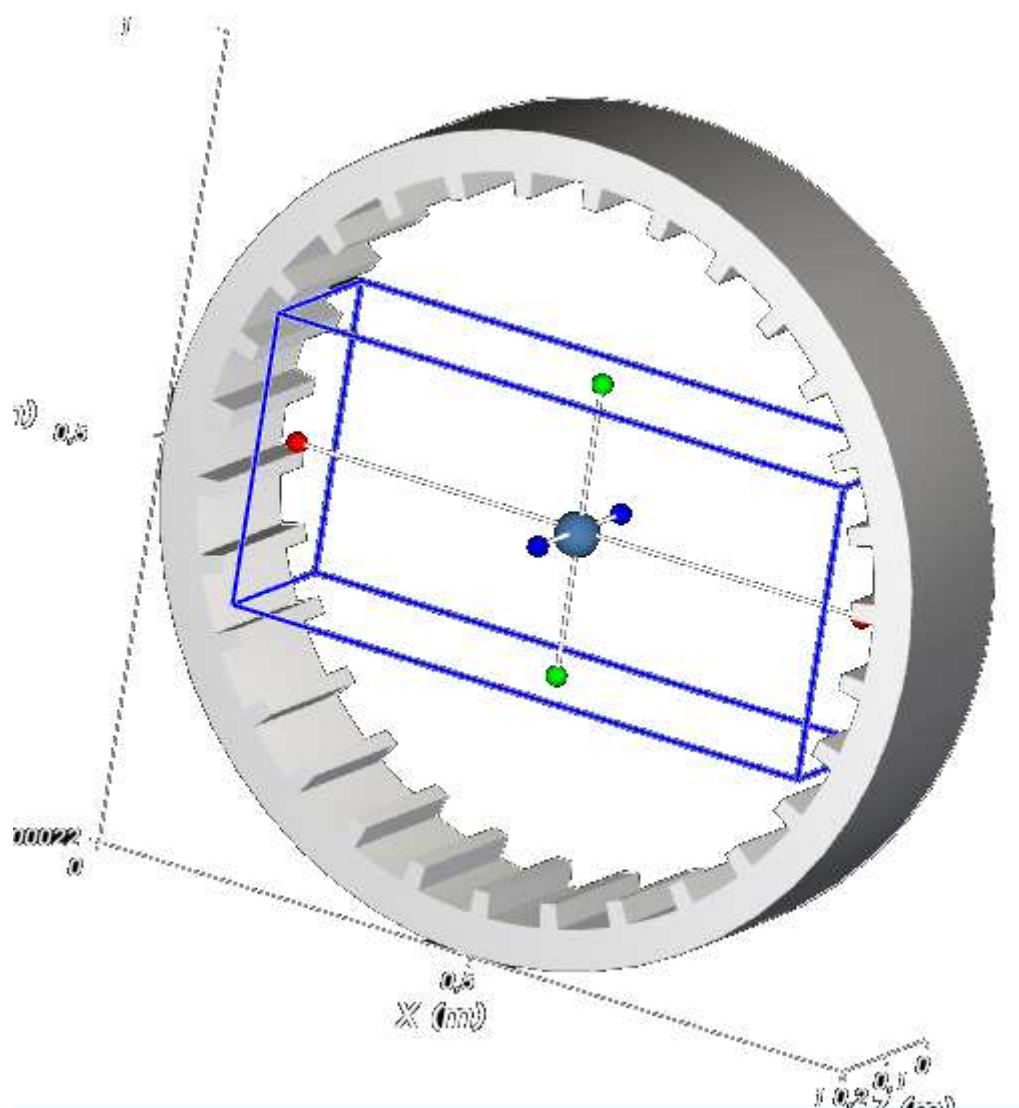


Рис 2.11 - Розділ Inputs

8. У розділ Domain settings встановлюються періодичні границі на торцях кільця. Це означає, що кулі, які перетинають одну торцьову границю зразу з'являються з іншого боку. Вісь встановлення періодичних границь – Z, додатковий параметр – положення границь визначається геометрією моделі.

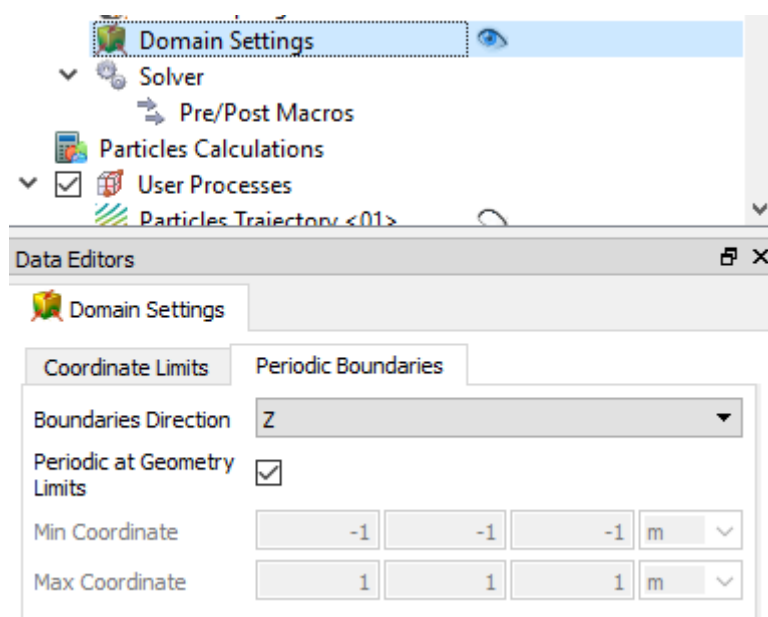


Рис 2.12 - Розділ Domain settings

9. У розділі Solver визначаємо час розрахунку 4 с., та кількість кадрів за секунду – 33.3.

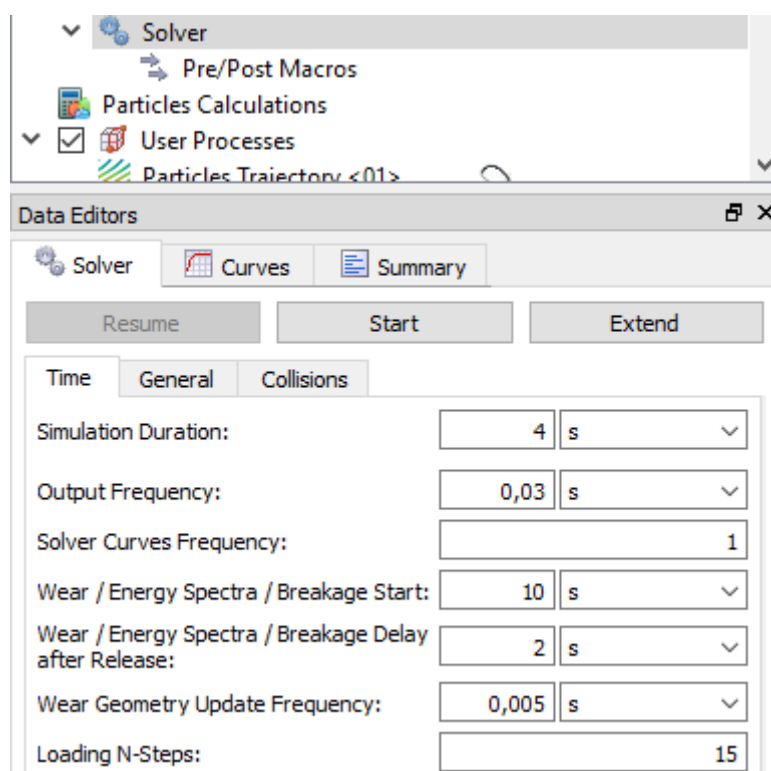


Рис 2.13 - Розділ Solver

У результаті розрахунку записуються для кожного досліджу:

- потужність співударінь (рис 2.14);

- траєкторії руху куль (рис 2.)

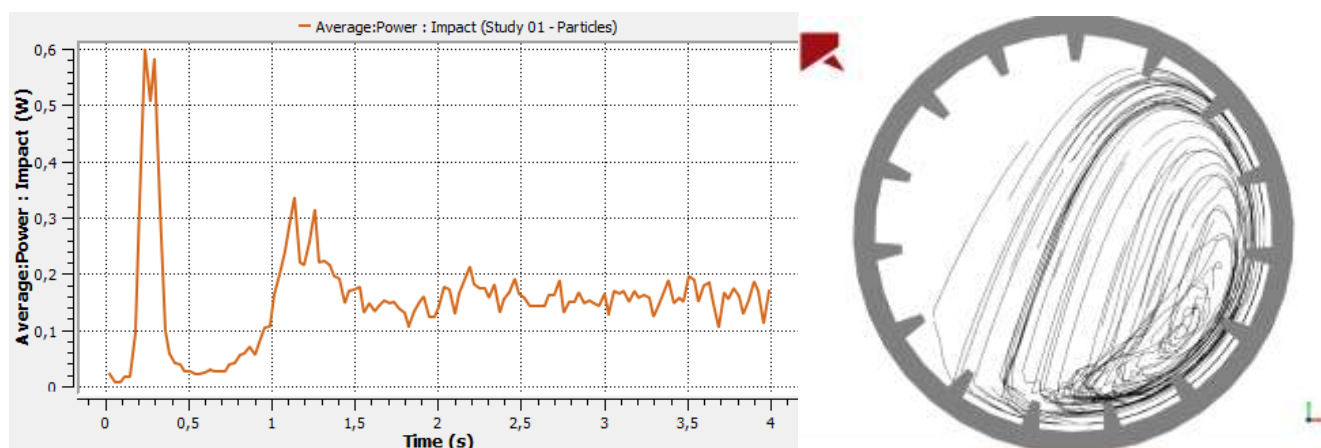


Рис 2.14 – Результати розрахунку

Методика обробки результатів дослідження. На зображенні траєкторії руху тіл, що мелють, визначається кут відриву куль від поверхні барабану.

Величини висоти ліфтерів та їх кількості переводимо у безрозмірні величини та замінюємо їх на:

відносну висоту ліфтеру:

$$\Delta h_{\text{л}} = \frac{h_{\text{л}}}{d_{\text{к}}} \quad (2.18)$$

відносну відстань між ліфтерами:

$$\Delta l_{\text{л}} = \frac{\pi \cdot D}{n_{\text{л}}} \quad (2.19)$$

Визначаємо раціональну частоту обертання барабану для кожного типорозміру ліфтеру, що відповідатиме раціональному куту відриву куль від барабану у $54,67^\circ$ за допомогою функції regress ПКА MathCAD.

Таким же чином визначаємо потужність ударів при раціональній частоті обертання барабану для кожного типорозміру ліфтеру, що відповідатиме раціональному куту відриву куль від барабану у $54,67^\circ$ за допомогою функції regress ПКА MathCAD. Оскільки потужність ударів є динамічною величиною і змінюється кожної миті для розрахунків приймаємо середню величину потужності у сталому режимі роботи с 2с по 4с.

Використовуючи вбудовану функцію regress, визначимо коефіцієнти регресії для побудови математичних моделей впливу висоти та кількості ліфтерів на раціональну швидкість обертання та на середню потужність співударянь.

Після визначення функцій, проведемо багатокритерійну оптимізацію за такими умовами

Проектні параметри

$$\Delta h_{\text{л}}$$

$$\Delta l_{\text{л}}$$

Критерії оптимізації

$$n_p \rightarrow \min$$

$$N_p \rightarrow \max$$

обмеження

$$0,167 \leq \Delta h_{\text{л}} \leq 1$$

$$141,37 \leq \Delta l_{\text{л}} \leq 282,74$$

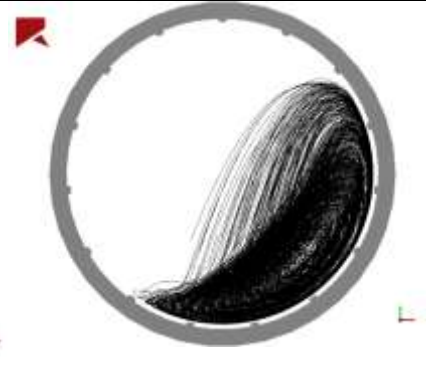
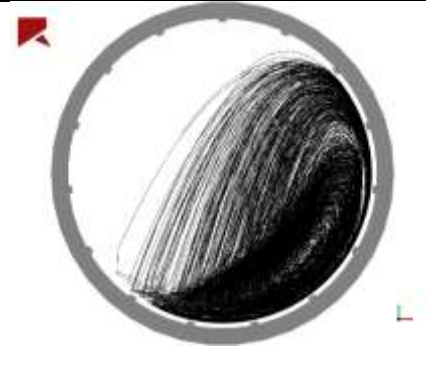
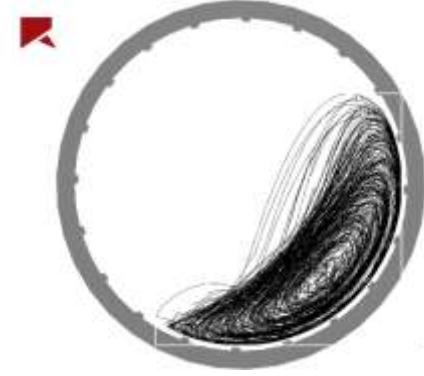
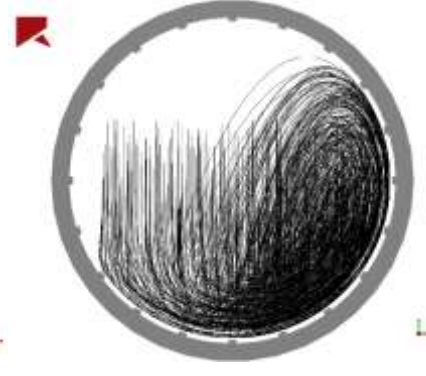
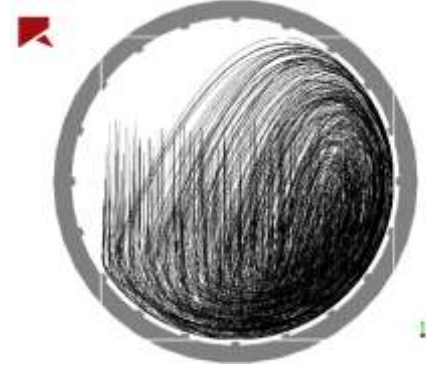
Задля розв'язання завдання багатокритерійної оптимізації використає метод пошуку компромісно рішення на основі зваженого середньоарифметичного.

У результаті буде отримано значення параметрів ліфтерів, що забезпечують мінімальну кількість обертів при максимальній потужності зіткнень.

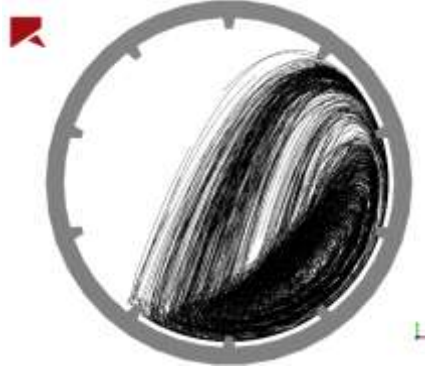
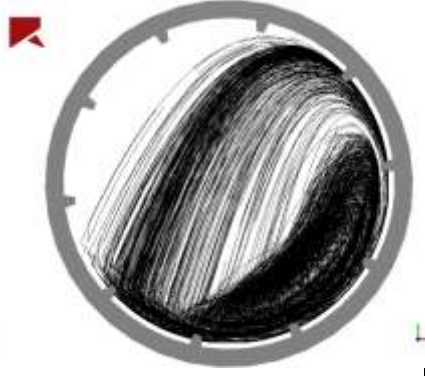
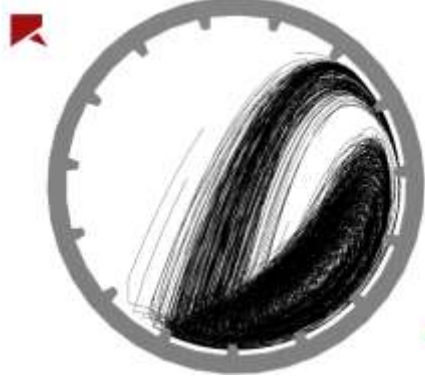
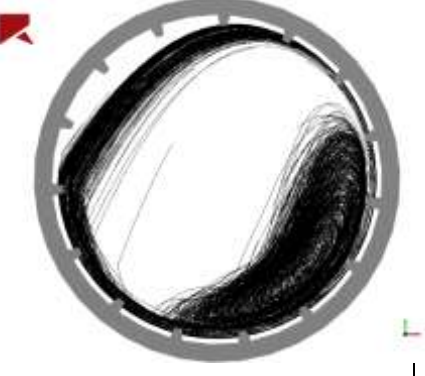
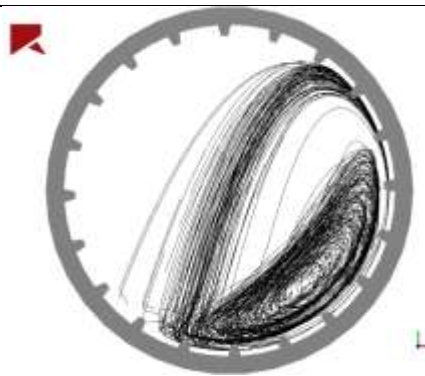
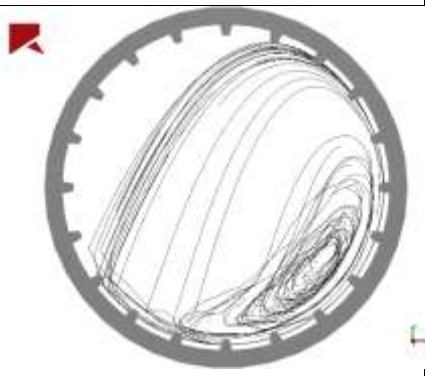
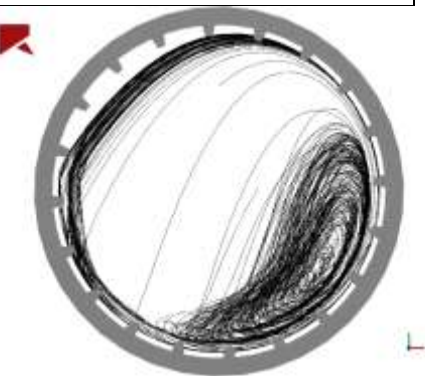
2.4.2. Результати комп'ютерного дослідження впливу форми футерування на рух куль у млині

У результаті первинного дослідження отримано траєкторії руху куль у барабані та значення зміни потужності зіткнень куль. Обробивши ці данні отримаємо таблицю 2.5.

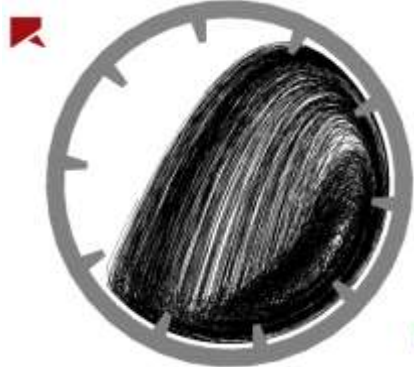
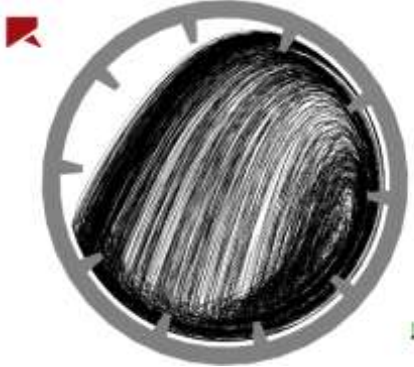
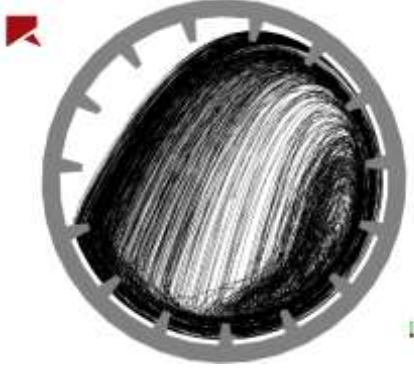
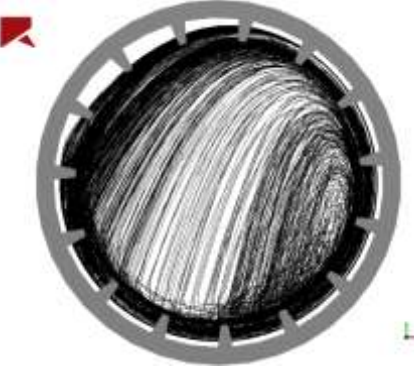
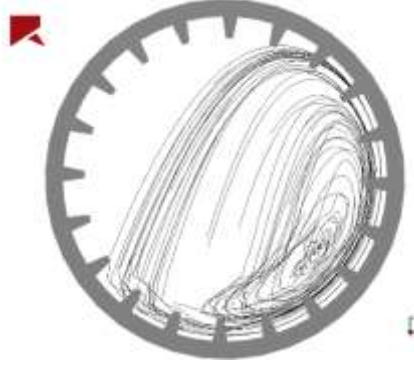
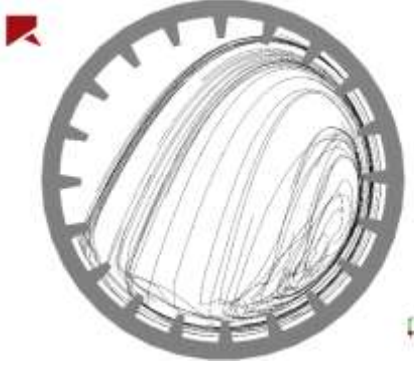
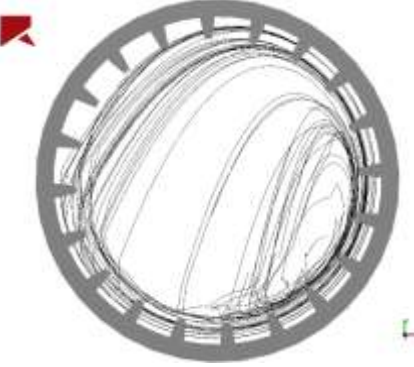
Таблиця 2.5 – Результати дослідження

$X_1 = 0,167; X_2 = 10 \text{ мм}; X_3 = 30$	$X_1 = 0,167; X_2 = 10 \text{ мм}; X_3 = 35$	$X_1 = 0,167; X_2 = 10 \text{ мм}; X_3 = 40$
		
$\alpha_B = 19,55; N_{cp} = 0,12$	$\alpha_B = 28,283; N_{cp} = 0,152$	$\alpha_B = 39,283; N_{cp} = 0,187$
$X_1 = 0,167; X_2 = 15 \text{ мм}; X_3 = 30$	$X_1 = 0,167; X_2 = 15 \text{ мм}; X_3 = 35$	$X_1 = 0,167; X_2 = 15 \text{ мм}; X_3 = 40$
		
$\alpha_B = 28,167; N_{cp} = 0,136$	$\alpha_B = 31,95; N_{cp} = 0,175$	$\alpha_B = 40,817; N_{cp} = 0,207$
$X_1 = 0,167; X_2 = 20 \text{ мм}; X_3 = 30$	$X_1 = 0,167; X_2 = 20 \text{ мм}; X_3 = 35$	$X_1 = 0,167; X_2 = 20 \text{ мм}; X_3 = 40$
		
$\alpha_B = 24,433; N_{cp} = 0,147$	$\alpha_B = 40,617; N_{cp} = 0,188$	$\alpha_B = 57,733; N_{cp} = 0,22$

Продовження табл. 2.5

X1=0,5; X2=10 мм; X3= 30	X1=0,5; X2 = 10 мм; X3=35	X1=0,5; X2=10 мм; X3=40
		
$\alpha_B=41,167$; $N_{cp}=0,153$	$\alpha_B=61,25$; $N_{cp}=0,171$	$\alpha_B=69,617$; $N_{cp}=0,169$
X1=0,5; X2=15 мм; X3= 30	X1=0,5; X2 = 15 мм; X3=35	X1=0,5; X2=15 мм; X3=40
		
$\alpha_B=44,433$; $N_{cp}=0,158$	$\alpha_B=56,283$; $N_{cp}=0,166$	$\alpha_B=69,333$; $N_{cp}=0,164$
X1=0,5; X2=20 мм; X3= 30	X1=0,5; X2 = 20 мм; X3=35	X1=0,5; X2=20 мм; X3=40
		
$\alpha_B=46,667$; $N_{cp}=0,156$	$\alpha_B=55,767$; $N_{cp}=0,167$	$\alpha_B=67,567$; $N_{cp}=0,17$

Продовження табл. 2.5

X1=1; X2=10 мм; X3= 30	X1=1; X2 = 10 мм; X3=35	X1=1; X2=10 мм; X3=40
		
$\alpha_B=52,483$; $N_{cp}=0,16$	$\alpha_B=67,4$; $N_{cp}=0,148$	$\alpha_B=79,933$; $N_{cp}=0,115$
X1=1; X2=15 мм; X3= 30	X1=1; X2 = 15 мм; X3=35	X1=1; X2=15 мм; X3=40
		
$\alpha_B=51,917$; $N_{cp}=0,157$	$\alpha_B=62,3$; $N_{cp}=0,146$	$\alpha_B=77,9$; $N_{cp}=0,117$
X1=1; X2=20 мм; X3= 30	X1=1; X2 = 20 мм; X3=35	X1=1; X2=20 мм; X3=40
		
$\alpha_B=47,583$; $N_{cp}=0,156$	$\alpha_B=60,85$; $N_{cp}=0,15$	$\alpha_B=71,833$; $N_{cp}=0,122$

Визначаємо раціональну частоту обертання барабану для кожного типорозміру ліфтеру, що відповідатиме раціональному куту відриву куль від барабану у $54,67^\circ$ за допомогою функції regress ПКА MathCAD.

$$\text{Ah10n10} := \begin{pmatrix} 30 & 19.55 \\ 35 & 28.283 \\ 40 & 39.283 \end{pmatrix} \quad \text{Ah10n15} := \begin{pmatrix} 30 & 28.167 \\ 35 & 31.95 \\ 40 & 40.817 \end{pmatrix} \quad \text{Ah10n20} := \begin{pmatrix} 30 & 24.433 \\ 35 & 40.617 \\ 40 & 57.733 \end{pmatrix}$$

$$\text{Ah30n10} := \begin{pmatrix} 30 & 41.167 \\ 35 & 61.25 \\ 40 & 69.617 \end{pmatrix} \quad \text{Ah30n15} := \begin{pmatrix} 30 & 44.433 \\ 35 & 56.283 \\ 40 & 69.333 \end{pmatrix} \quad \text{Ah30n20} := \begin{pmatrix} 30 & 46.667 \\ 35 & 55.767 \\ 40 & 67.567 \end{pmatrix}$$

$$\text{Ah60n10} := \begin{pmatrix} 30 & 52.483 \\ 35 & 67.4 \\ 40 & 79.933 \end{pmatrix} \quad \text{Ah60n15} := \begin{pmatrix} 30 & 51.917 \\ 35 & 62.3 \\ 40 & 77.9 \end{pmatrix} \quad \text{Ah60n20} := \begin{pmatrix} 30 & 47.583 \\ 35 & 60.85 \\ 40 & 71.833 \end{pmatrix}$$

$$\underline{g}_{\text{Ah}} := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{A1010} &:= \text{regress}(\text{Ah10n10}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah10n10}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no1010}(x) &:= \text{A1010}_3 + \text{A1010}_4 \cdot x + \text{A1010}_5 \cdot x^2 \\ \text{no1010}(54.67) &= 44.566 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A1020} &:= \text{regress}(\text{Ah10n20}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah10n20}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no1020}(x) &:= \text{A1020}_3 + \text{A1020}_4 \cdot x + \text{A1020}_5 \cdot x^2 \\ \text{no1020}(54.67) &= 39.127 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A3015} &:= \text{regress}(\text{Ah30n15}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah30n15}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no3015}(x) &:= \text{A3015}_3 + \text{A3015}_4 \cdot x + \text{A3015}_5 \cdot x^2 \\ \text{no3015}(54.67) &= 34.345 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A6010} &:= \text{regress}(\text{Ah60n10}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah60n10}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no6010}(x) &:= \text{A6010}_3 + \text{A6010}_4 \cdot x + \text{A6010}_5 \cdot x^2 \\ \text{no6010}(54.67) &= 30.668 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A6020} &:= \text{regress}(\text{Ah60n20}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah60n20}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no6020}(x) &:= \text{A6020}_3 + \text{A6020}_4 \cdot x + \text{A6020}_5 \cdot x^2 \\ \text{no6020}(54.67) &= 32.529 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A1015} &:= \text{lnfit}(\text{Ah10n15}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah10n15}^{\langle 0 \rangle}) \\ \text{no1015}(x) &:= \text{A1015}_0 \cdot \ln(x) + \text{A1015}_1 \\ \text{no1015}(54.67) &= 47.968 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A3010} &:= \text{regress}(\text{Ah30n10}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah30n10}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no3010}(x) &:= \text{A3010}_3 + \text{A3010}_4 \cdot x + \text{A3010}_5 \cdot x^2 \\ \text{no3010}(54.67) &= 32.273 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A3020} &:= \text{regress}(\text{Ah30n20}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah30n20}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no3020}(x) &:= \text{A3020}_3 + \text{A3020}_4 \cdot x + \text{A3020}_5 \cdot x^2 \\ \text{no3020}(54.67) &= 34.45 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A6015} &:= \text{regress}(\text{Ah60n15}^{\langle 1 \rangle}, \text{Ah60n15}^{\langle 0 \rangle}, 2) \\ \text{no6015}(x) &:= \text{A6015}_3 + \text{A6015}_4 \cdot x + \text{A6015}_5 \cdot x^2 \\ \text{no6015}(54.67) &= 31.456 \end{aligned}$$

Таким же чином визначаємо потужність ударів при раціональній частоті обертання барабану для кожного типорозміру ліфтеру, що відповідатиме раціональному куту відриву куль від барабану у $54,67^\circ$ за допомогою функції regress ПКА MathCAD. Оскільки потужність ударів є динамічною величиною і змінюється кожної миті для розрахунків приймаємо середню величину потужності у сталому режимі роботи с 2с по 4с.

$$\begin{aligned}
 \text{Nh10n10} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.12 \\ 35 & 0.152 \\ 40 & 0.147 \end{pmatrix} & \text{Nh10n15} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.136 \\ 35 & 0.172 \\ 40 & 0.188 \end{pmatrix} & \text{Nh10n20} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.147 \\ 35 & 0.207 \\ 40 & 0.22 \end{pmatrix} \\
 \text{Nh30n10} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.153 \\ 35 & 0.171 \\ 40 & 0.169 \end{pmatrix} & \text{Nh30n15} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.158 \\ 35 & 0.166 \\ 40 & 0.164 \end{pmatrix} & \text{Nh30n20} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.156 \\ 35 & 0.167 \\ 40 & 0.17 \end{pmatrix} \\
 \text{Nh60n10} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.16 \\ 35 & 0.148 \\ 40 & 0.115 \end{pmatrix} & \text{Nh60n15} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.157 \\ 35 & 0.146 \\ 40 & 0.117 \end{pmatrix} & \text{Nh60n20} &:= \begin{pmatrix} 30 & 0.156 \\ 35 & 0.15 \\ 40 & 0.122 \end{pmatrix} \\
 g &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 \text{N1010} &:= \text{regress}(\text{Nh10n10}^{(0)}, \text{Nh10n10}^{(1)}, 2) \\
 \text{No1010}(x) &:= \text{N1010}_3 + \text{N1010}_4 \cdot x + \text{N1010}_5 \cdot x^2 \\
 \text{No1010}(44.566) &= 0.11 \\
 \text{N1020} &:= \text{regress}(\text{Nh10n20}^{(0)}, \text{Nh10n20}^{(1)}, 2) \\
 \text{No1020}(x) &:= \text{N1020}_3 + \text{N1020}_4 \cdot x + \text{N1020}_5 \cdot x^2 \\
 \text{No1020}(39.127) &= 54.677 \\
 \text{N3015} &:= \text{regress}(\text{Nh30n15}^{(0)}, \text{Nh30n15}^{(1)}, 2) \\
 \text{No3015}(x) &:= \text{N3015}_3 + \text{N3015}_4 \cdot x + \text{N3015}_5 \cdot x^2 \\
 \text{No3015}(34.345) &= 0.166 \\
 \text{N1015} &:= \text{lnfit}(\text{Nh10n15}^{(0)}, \text{Nh10n15}^{(1)}) \\
 \text{No1015}(x) &:= \text{N1015}_0 \cdot \ln(x) + \text{N1015}_1 \\
 \text{No1015}(47.968) &= 0.224 \\
 \text{N3010} &:= \text{regress}(\text{Nh30n10}^{(0)}, \text{Nh30n10}^{(1)}, 2) \\
 \text{No3010}(x) &:= \text{N3010}_3 + \text{N3010}_4 \cdot x + \text{N3010}_5 \cdot x^2 \\
 \text{No3010}(32.273) &= 0.164 \\
 \text{N3020} &:= \text{regress}(\text{Nh30n20}^{(0)}, \text{Nh30n20}^{(1)}, 2) \\
 \text{No3020}(x) &:= \text{N3020}_3 + \text{N3020}_4 \cdot x + \text{N3020}_5 \cdot x^2 \\
 \text{No3020}(34.45) &= 0.166
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N6010 &:= \text{regress}(\text{Nh60n10}^{(0)}, \text{Nh60n10}^{(1)}, 2) & N6015 &:= \text{regress}(\text{Nh60n15}^{(0)}, \text{Nh60n15}^{(1)}, 2) \\
 \text{No6010}(x) &:= N6010_3 + N6010_4 \cdot x + N6010_5 \cdot x^2 & \text{No6015}(x) &:= N6015_3 + N6015_4 \cdot x + N6015_5 \cdot x^2 \\
 \text{No6010}(30.668) &= 0.16 & \text{No6015}(31.456) &= 0.156 \\
 \\
 N6020 &:= \text{regress}(\text{Nh60n20}^{(0)}, \text{Ah60n20}^{(1)}, 2) \\
 \text{No6020}(x) &:= N6020_3 + N6020_4 \cdot x + N6020_5 \cdot x^2 \\
 \text{No6020}(32.529) &= 54.579
 \end{aligned}$$

У результаті попередньої обробки результатів дослідження отримано наступний план експерименту

$$\begin{array}{ccccc}
 & dh & dn & N & alfa \\
 NA := & \begin{pmatrix} 0.167 & 282.74 & 0.11 & 44.566 \\ 0.167 & 188.5 & 0.224 & 42.75 \\ 0.167 & 141.37 & 0.21 & 39.127 \\ 0.5 & 282.74 & 0.164 & 32.273 \\ 0.5 & 188.5 & 0.166 & 34.345 \\ 0.5 & 141.37 & 0.166 & 34.45 \\ 1 & 282.74 & 0.16 & 30.668 \\ 1 & 188.5 & 0.156 & 31.456 \\ 1 & 141.37 & 0.154 & 32.529 \end{pmatrix} & & & \\
 & dh & dn & & \\
 hn := & \begin{pmatrix} 0.167 & 282.74 \\ 0.167 & 188.5 \\ 0.167 & 141.37 \\ 0.5 & 282.74 \\ 0.5 & 188.5 \\ 0.5 & 141.37 \\ 1 & 282.74 \\ 1 & 188.5 \\ 1 & 141.37 \end{pmatrix} & & &
 \end{array}$$

Використовуючи вбудовану функцію regress, визначимо коефіцієнти регресії для побудови математичних моделей впливу висоти та кількості ліфтерів на раціональну швидкість обертання та на середню потужність співударянь.

$$R := \text{regress}(hn, NA^{(3)}, 2) = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ -0.053 \\ -1.484 \times 10^{-4} \\ 0.096 \\ 35.702 \\ -31.557 \\ 25.359 \end{pmatrix} \quad f(x, y) := \text{interp}\left[R, hn, NA^{(3)}, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right]$$

$$R1 := \text{regress}\left(hn, NA^{(2)}, 2\right) = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 9.173 \times 10^{-4} \\ -3.603 \times 10^{-6} \\ 7.919 \times 10^{-4} \\ 0.193 \\ -0.26 \\ 0.037 \end{pmatrix} \quad f1(x, y) := \text{interp}\left[R1, hn, NA^{(2)}, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right]$$

Встановлена залежність раціональної частоти обертання від параметрів ліфтерів (рис 2.15)

$$n_p(\Delta h, \Delta l) = 35,702 - 31,557 \cdot \Delta h + 0,096 \cdot \Delta l + 25,359 \cdot \Delta h^2 - 1,484 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta l^2 - 0,053 \cdot \Delta h \cdot \Delta l \quad (2.20)$$

Встановлена залежність потужності співударінь від параметрів ліфторів (рис 2.16)

$$N_p(\Delta h, \Delta l) = 0,193 - 0,26 \cdot \Delta h + 7,919 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta l + 0,037 \cdot \Delta h^2 - 3,603 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta l^2 + 9,173 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta h \cdot \Delta l \quad (2.21)$$

Фактично обидві залежності є нелінійними із явно вираженими екстремумами.

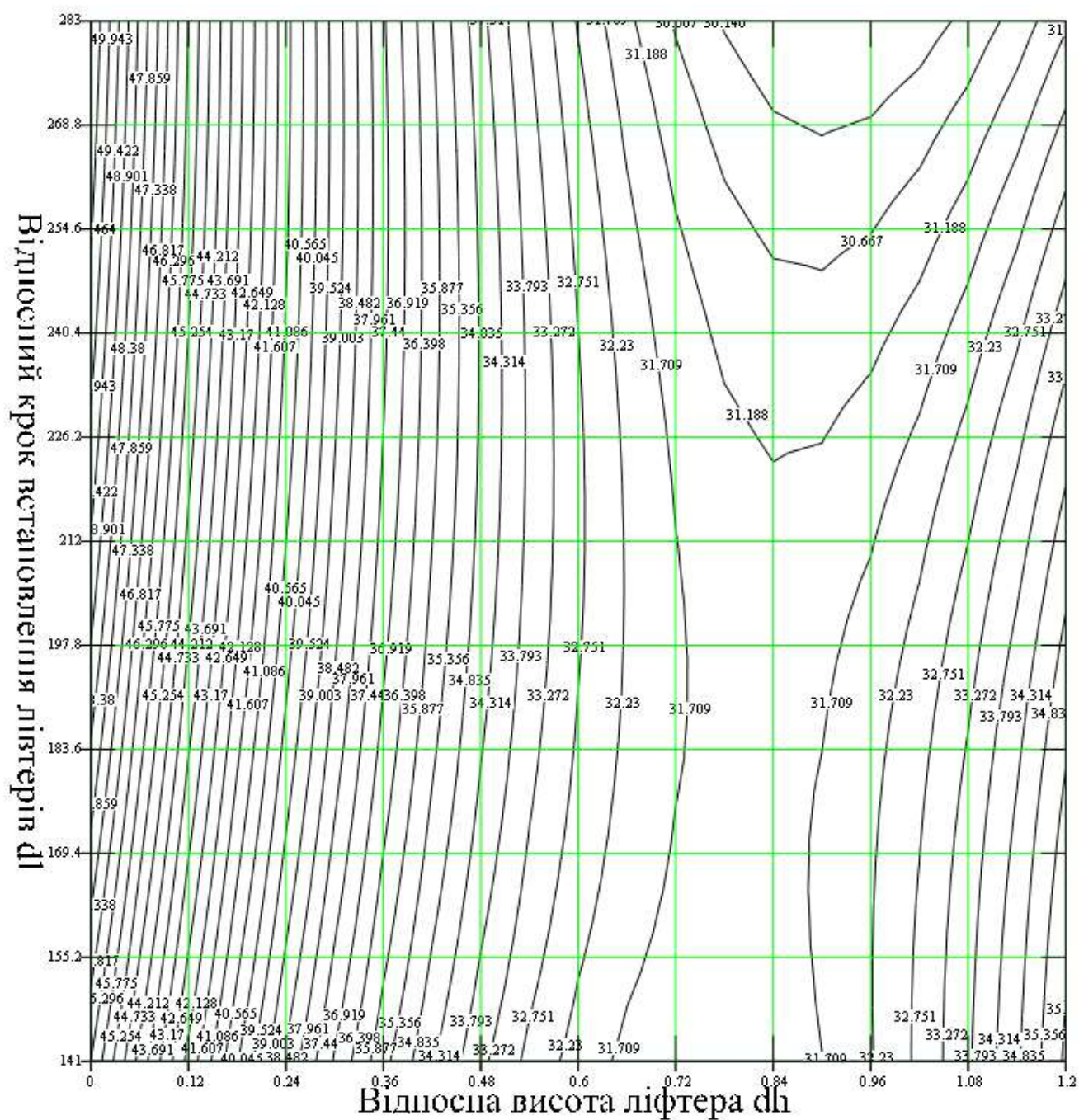


Рис 2.15 – Залежність раціональної частоти обертання від параметрів ліфтерів

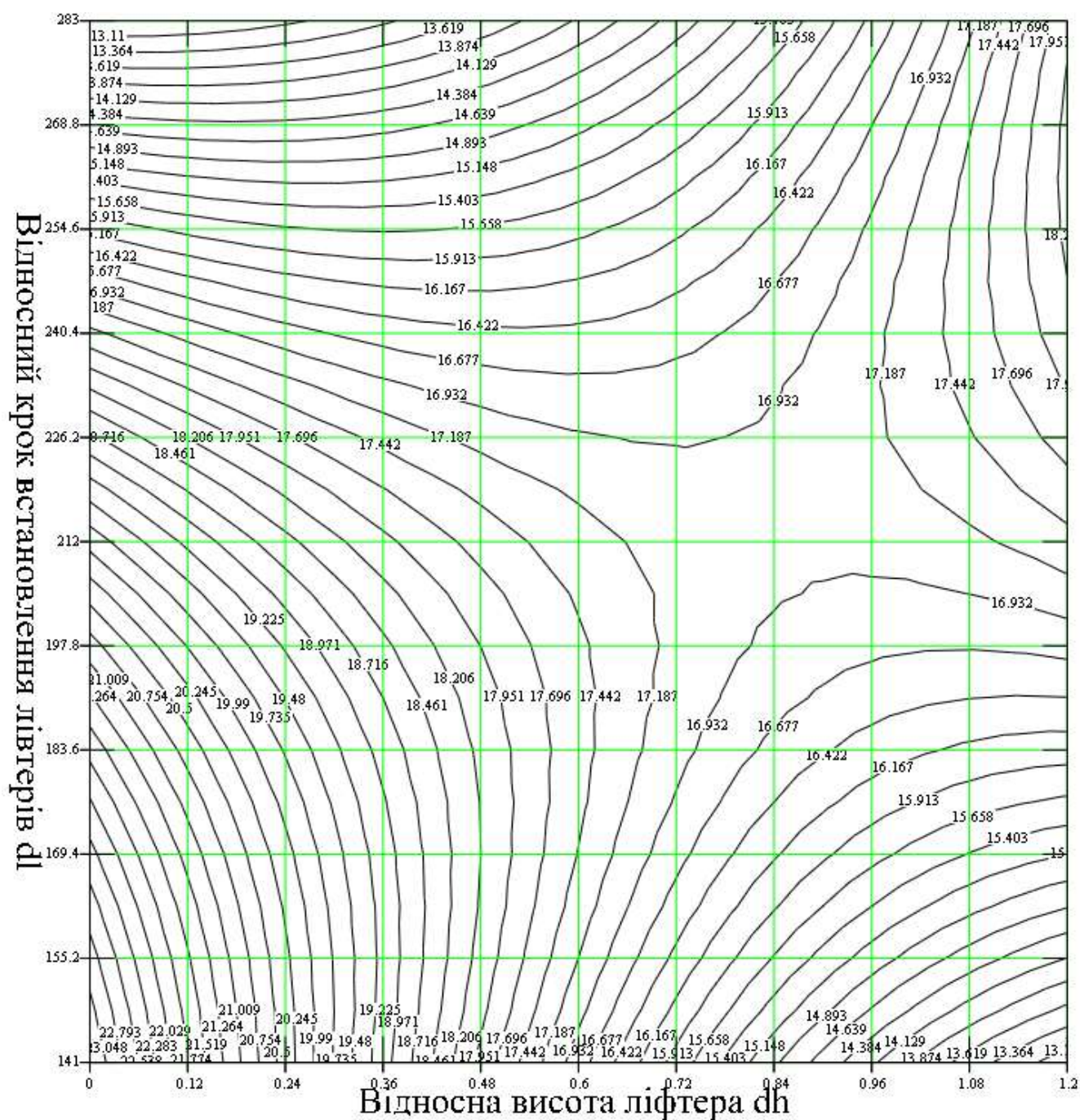


Рис 2.16 – Залежність потужності співударінь від параметрів ліфтерів

Після визначення функцій, проведемо багатокритерійну оптимізацію за такими умовами:

- проектні параметри

$$\Delta h_{\text{л}}$$

$$\Delta I_{\text{л}}$$

- критерії оптимізації

$$n_p \rightarrow \min$$

$$N_p \rightarrow \max$$

- обмеження

$$0,167 \leq \Delta h_{\lambda} \leq 1$$

$$141,37 \leq \Delta l_{\lambda} \leq 282,74$$

Задля розв'язання завдання багатокритерійної оптимізації використає метод пошуку компромісно рішення на основі зваженого середньоарифметичного.

Мінімум функції n_p буде при значенні $\Delta h_{\lambda} = 0,809$; $\Delta l_{\lambda} = 178,96$, тобто $n_p(0,809, 178,96) = 31,47$

Максимум функції N_p буде при значенні $\Delta h_{\lambda} = 0,8345$; $\Delta l_{\lambda} = 216,1$, тобто $N_p(0,8345, 216,1) = 0,17$

Очевидно, що проектні параметри при яких обидві функції мають екстремуми, знаходяться не далеко один від одного. Це дає змогу сподіватися, що компромісне рішення буде близьким до оптимального.

Визначаємо зважене середньоарифметичне

$$\Delta h_{cp} = \frac{0,809 + 0,8345}{2} = 0,82175; \Delta l_{cp} = \frac{178,96 + 216,1}{2} = 197,53 \quad (2.22)$$

Отже, визначено компромісні проектні параметри на базі середньозваженого середньоарифметичного.

При цих значеннях цільові функції мають наступні значення

$$n_p(0,82175, 197,53) = 31,524; N_p(0,82175, 197,53) = 0,169$$

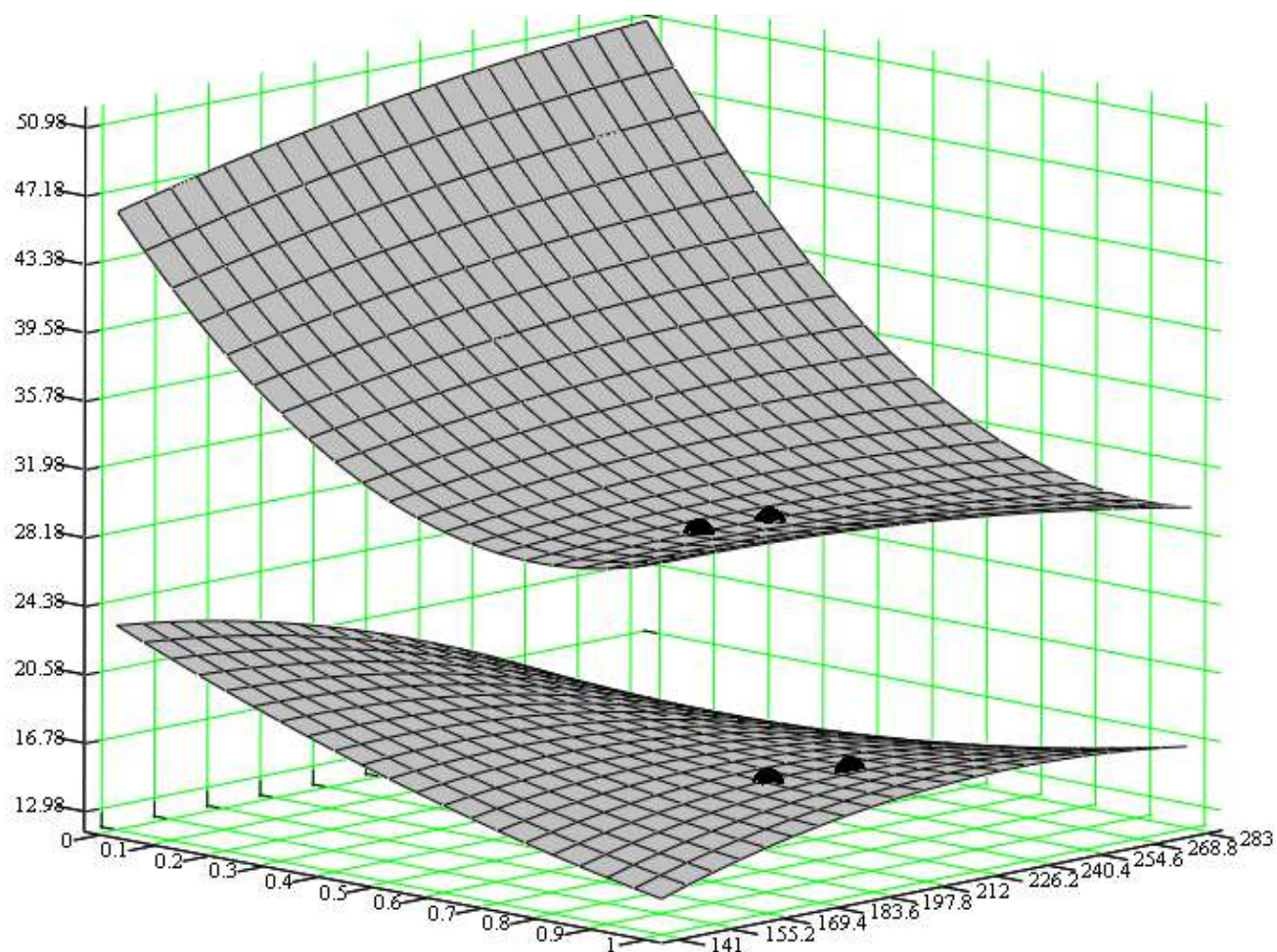


Рис 2.17 – Визначення середньозваженого арифметичного

У результаті отримано значення параметрів ліфтерів, що забезпечують мінімальну кількість обертів при максимальній потужності зіткнень.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено загальну методику подальшого дослідження, що дозволяє досягти поставленої мети роботи;
2. Розроблено спрощену математичну модель роботи кульового млина, що дозволяє визначити основні геометричні розміри та режимні параметри
3. Проведено аналіз розробленої математичної моделі на основі порівняння параметрів відомих конструкцій млинів, що випускаються серійно. Встановлена загальна адекватність моделі, але деякі параметри вимагають уточнення.
4. Встановлено, що рекомендоване співвідношення довжини до діаметру млина відрізняються для млинів з центральним розвантаженням та розвантаженням через ґрати;
5. Встановлено, що реальні млини мають дещо збільшену кількість обертів, ніж розрахункова за математичною моделлю. Різниця складає 8,7%..9,8%.
6. Встановлено, що реальні млини мають дещо збільшену потужність млина, ніж розрахункова за математичною моделлю, причому при збільшенні типорозміру ця різниця експоненційно збільшується.
7. Сплановано та проведено дослідження впливу вистои та кількості ліфтерів на робочу кількість обертів млина та потужність співударінь куль.
8. Встановлено значення параметрів ліфтерів, що забезпечують мінімальну кількість обертів при максимальній потужності зіткнень. Відносна висота має дорівнювати 0,82175, а відносний крок встановлення - 197,53

3. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МЛИНА

Грунтуючись на результатах проведених досліджень та аналізу розробленої математичної моделі, проаналізуємо вплив рекомендованої конструкції на зниження потрібної потужності млина.

Для млина, на якому проводилось віртуальне дослідження з діаметром барабану 900 мм робоча частота обертання є 33,4 об/хв.

А частота обертання при визначених оптимальних параметрах ліфтерів становить 31.254 об/хв. Таким чином, можна зазначити, що застосування оптимальних ліфтерів знижує частоту обертання млина і потрібну потужність приводного двигуна у 1,06 разів.

Визначимо параметри ліфтерів для млинів, що випускаються серійно, та наведені у табл. 2.1, 2.2. Причому треба зазначити, що у млини може бути завантажено кулі різних діаметрів, залежно від величини шматків вихідної сировини, наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Рекомендована висота ліфтерів

Діаметр кулі, мм	Рекомендована висота ліфтера, мм
15	12.326
20	16.435
25	20.544
30	24.652
40	32.87
50	41.087
60	49.305
70	57.523
80	65.74
90	73.957
100	82.175
110	90.392
120	98.61

Таблиця 3.2 - Рекомендована кількість ліфтерів

Внутрішній діаметр млина (включно з футеруванням), мм	Рекомендована кількість ліфтерів
823	13
1113	18
1405	22
1992	32
2582	41
3075	49
3471	55
4362	69

Скоригована робоча швидкість обертання, з урахуванням використання ліфтерів, об/хв

$$n = 0.7 \cdot n_{кр} \quad (3.1)$$

Скоригована потрібна потужність, Вт

$$N = \frac{0.42 \cdot M_{кз} \cdot D \cdot n}{\eta} \quad (3.2)$$

Рекомендована висота ліфтерів

$$h = 0.82175 \cdot d_{к} \quad (3.3)$$

Рекомендована кількість ліфтерів

$$n_{л} = \left\lceil \frac{\pi \cdot D}{197.53} \right\rceil \quad (3.4)$$

де D – внутрішній діаметр млина, враховучі футерування, мм

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що застосування ліфтерів з оптимальними параметрами знижує робочу частоту обертання млина і потрібну потужність приводного двигуна у 1,06 разів.
2. Визначено, що для куль діаметром від 15 мм до 120 мм рекомендована ширина ліфтерів становить від 12 мм до 98 мм;
3. Визначено, що для барабанів млинів діаметром від 823 мм до 4362 мм рекомендована кількість ліфтерів становить від 13 мм до 69 мм;
4. Скориговані робочі формули з визначення швидкості обертання та потрібної потужності млина з урахуванням використання ліфтерів;

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає в є покращення режиму роботи кульових барабанних млинів за рахунок обґрунтування раціональних параметрів млина .

1. Розроблено спрощену математичну модель роботи кульового млина, до дозволяє визначити основні геометричні розміри та режимні параметри
2. Проведено аналіз розробленої математичної моделі на основі порівняння параметрів відомих конструкцій млинів, що випускаються серійно. Встановлена загальна адекватність моделі, але деякі параметри вимагають уточнення.
3. Встановлено, що рекомендоване співвідношення довжини до діаметру млина відрізняються для млинів з центральним розвантаженням та розвантаженням через ґрати;
4. Встановлено, що реальні млини мають дещо збільшену кількість обертів, ніж розрахункова за математичною моделлю. Різниця складає 8,7%..9,8%.
5. Встановлено, що реальні млини мають дещо збільшену потужність млина, ніж розрахункова за математичною моделлю, причому при збільшенні типорозміру ця різниця експоненційно збільшується.
6. Встановлено значення параметрів ліфтерів, що забезпечують мінімальну кількість обертів при максимальній потужності зіткнень. Відносна висота має дорівнювати 0,82175, а відносний крок встановлення - 197,53
7. Встановлено, що застосування ліфтерів з оптимальними параметрами знижує робочу частоту обертання млина і потрібну потужність приводного двигуна у 1,06 разів.
8. Визначено, що для куль діаметром від 15 мм до 120 мм рекомендована ширина ліфтерів становить від 12 мм до 98 мм;
9. Визначено, що для барабанів млинів діаметром від 823 мм до 4362 мм рекомендована кількість ліфтерів становить від 13 мм до 69 мм;

10. Скориговані робочі формули з визначення швидкості обертання та потрібної потужності млина з урахуванням використання ліфтерів.