

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет ) ННІТІ ім. Акад. І.С.Гулого  
Кафедра машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв

**«До захисту в ЕК»**  
Директор інституту(декан факультету)  
\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**«До захисту допущено»**  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Олександр ГАВВА  
(підпис) (ім'я та прізвище)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**  
зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(код та назва спеціальності)  
освітньо-професійної програми Інжиніринг фармацевтичних та  
біотехнологічних виробництв  
на тему: Підвищення ефективності роботи бісерних млинів для надтонкого подрібнення  
компонентів лікарських засобів

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ОФ-2-6М  
\_\_\_\_\_ Пономаренко Артем Миколайович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Губеня Олексій Олександрович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)  
\_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)  
\_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2024р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. Акад. І.С.Гулого

Кафедра машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Освітньо-професійна програма Інжиніринг фармацевтичних та біотехнологічних виробництв

(назва)

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

МАХФВ

Гава О.М.

“ 05 ” 11 2024

року

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

**Пономаренко Артем Миколайович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Підвищення ефективності роботи бісерних млинів для надтонкого подрібнення компонентів лікарських засобів**

керівник роботи Губеня Олексій Олександрович кандидат технічних наук, доц.

затвержені наказом закладу вищої освіти від “   ”     20    р. №   

2. Строк подання здобувачем роботи 10.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Подрібнювальний матеріал – тальк

Подрібнення – у бісерних млинах різних конструкцій

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Перелік розглянутих питань у пояснювальній записці: Вступ; Актуальність теми; Об'єкт дослідження; Класифікація бісерних млинів; Предмети дослідження; Мета роботи; Завдання досліджень; Наукова новизна; Практичне значення одержаних результатів; Розділ

1. Аналіз сучасного стану об'єкта досліджень: Аналіз літературних джерел за тематикою дослідження, Статті в наукових журналах, Монографії, Патенти, Стандарти, нормативні

документи та інформація з веб-ресурсів, Резюме; Розділ 2. Теоретично-експериментальні дослідження: Постановка завдання пошуку нових науково-технічних рішень, Вибір математичної моделі об'єкта досліджень, Розробка комп'ютерної програми для реалізації математичної моделі, Теоретичні дослідження та результати, Алгоритм дослідження бісерного млина з використанням ANSYS Fluent та Rocky DEM, Аналіз імітаційного моделювання; Розділ 3. Проектно-конструкторські розробки: Постановка проблеми, Типові види обладнання для подрібнення до нанорозміру; Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування: Обґрунтування економічної доцільності використання бісерних млинів; Розділ 5. Безпека життєдіяльності та охорона праці: Заходи з безпеки при роботі з обладнанням, Вплив використання бісерних млинів на екологію та навколишнє середовище; Висновки; Список літератури.

## 5. Перелік графічного матеріалу

Слайди презентації:

Актуальність роботи

Матеріали і методи (2-3 слайди)

Опис імітаційного моделювання, геометричні моделі – 3 слайди

Результати досліджень та математично-статистичне оброблення – 6 слайдів

Висновок (1-2 слайди)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання **5 листопада 2024 р.**

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Анотація, зміст		
2	Вступ		
3	Порівняльний аналіз технічних рішень		
4	Матеріали і методи досліджень		
5	Аналіз сучасного стану об'єкта досліджень та вибір основного напрямку досліджень		
6	Теоретично-експериментальні дослідження		
7	Результати досліджень та їх пояснення		
8	Техніко-економічне обґрунтування		
9	Безпека життєдіяльності та охорона праці		
10	Висновки		
11	Списки використаної літератури		
12	Презентація		

**Здобувач**

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## Анотація

**Тема роботи:** Підвищення ефективності роботи бісерних млинів для надтонкого подрібнення компонентів лікарських засобів.

У роботі розглянуто оптимізацію конструктивних і режимних параметрів бісерних млинів для досягнення більшої продуктивності та рівномірності подрібнення фармацевтичних інгредієнтів. Основна увага приділялася горизонтальним і вертикальним конструкціям млинів. Горизонтальні млини, оснащені дисковими роторами, забезпечують рівномірний розподіл бісеру, мінімізуючи енерговитрати завдяки ефективному перемішуванню. Вертикальні млини з пальцевими роторами дозволяють створити зони з інтенсивною турбулентністю, що сприяє кращій якості подрібнення.

Імітаційне моделювання, виконане в ANSYS Fluent і Rocky DEM, дозволило детально проаналізувати розподіл тиску, швидкості потоку та взаємодію частинок бісеру з матеріалом у робочій камері. Особливий акцент було зроблено на впливі форми та розташування робочих органів млина на ефективність процесу. Результати моделювання показали, що оптимальне значення швидкості обертання ротора (близько 200 рад/с або 1900 об/хв) у поєднанні з бісером розміром 1–2 мм забезпечує високий ступінь подрібнення з мінімальними енерговитратами.

Практичне значення роботи полягає у наданні рекомендацій для покращення конструкції бісерних млинів, які можуть бути впроваджені у фармацевтичній галузі для виробництва високоякісних лікарських засобів. Результати сприяють підвищенню біодоступності активних компонентів завдяки стабільному нанорозміру частинок.

**Ключові слова:** бісерний млин, лікарські засоби, подрібнення, ANSYS Fluent, Rocky DEM, робочі органи.

## **Annotation**

**Topic of the work:** Enhancing the efficiency of bead mills for ultrafine grinding of pharmaceutical components.

The work focuses on optimizing the structural and operational parameters of bead mills to achieve higher productivity and uniform grinding of pharmaceutical ingredients. Special attention was given to horizontal and vertical mill designs. Horizontal mills equipped with disk rotors provide uniform bead distribution, minimizing energy consumption through efficient mixing. Vertical mills with finger rotors create zones of intense turbulence, contributing to improved grinding quality.

Simulation modeling conducted in ANSYS Fluent and Rocky DEM allowed for a detailed analysis of pressure distribution, flow velocity, and the interaction of beads with the material in the working chamber. Particular emphasis was placed on the influence of the shape and arrangement of the mill's working elements on process efficiency. The simulation results demonstrated that an optimal rotor speed (approximately 200 rad/s or 1900 RPM) combined with bead sizes of 1–2 mm ensures a high degree of grinding with minimal energy consumption.

The practical significance of this work lies in providing recommendations for improving bead mill designs, which can be implemented in the pharmaceutical industry to produce high-quality medicines. The results contribute to enhancing the bioavailability of active components due to the stable nanoscale particle size.

**Keywords:** bead mill, pharmaceuticals, grinding, ANSYS Fluent, Rocky DEM, working elements.

## Зміст

Вступ	2
Актуальність теми	4
Об'єкт дослідження	6
Класифікація бісерних млинів	7
1.2 Типові види обладнання для подрібнення до нанорозміру	23
Предмети дослідження	27
Мета роботи	28
Завдання досліджень	28
Наукова новизна	28
Практичне значення одержаних результатів	29
Розділ 1. Аналіз сучасного стану об'єкта досліджень, вибір і обґрунтування основного напрямку досліджень	31
1.1. Аналіз літературних джерел за тематикою дослідження	31
1.2. Статті в наукових журналах	31
1.3. Монографії	32
1.4. Патенти	33
1.5. Стандарти, нормативні документи та інформація з веб-ресурсів	33
1.6. Резюме	33
Розділ 2. Теоретично-експериментальні дослідження	35
2.1. Постановка завдання пошуку нових науково-технічних рішень	35
2.2. Вибір математичної моделі об'єкта досліджень	35
2.3. Розробка комп'ютерної програми для реалізації математичної моделі	36
2.4. Теоретичні дослідження та результати	36
Алгоритм дослідження бісерного млина з використанням ANSYS Fluent та Rocky DEM	38
Розділ 3. Результати моделювання та їх аналіз	42
Аналіз імітаційного моделювання	42
Горизонтальний бісерний млин з дисками	42
Горизонтальний бісерний млин з пальцеподібним робочим органом	53
Вертикальний бісерний млин з дисками	65
Вертикальний бісерний млин з пальцеподібним робочим органом	76

<i>Відповідальна організація</i> <b>НУХТ</b>	<i>Технічне узгодження</i> Гцбєня О.О.	<i>Вид документа</i> <b>Пояснювальна записка</b>	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> <b>НУХТ</b>	<i>Розробник документа</i> Понамаренко А.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> <b>Зміст</b>	<b>230651.MP.07.001.ПЗ</b>			
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> <b>UA</b>	<i>Аркуш</i> 1/115

Порівняльний аналіз горизонтального та вертикального бісерного млина з різними робочими органами	88
Розрахунок продуктивності млина	90
Розрахунок потужності приводу	91
Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування	96
Розділ 5. Безпека життєдіяльності та охорона праці під час наукових досліджень	98
Висновки	100
Список літератури	103
Список наукових праць, опублікованих за тематикою кваліфікаційної роботи	108

## *Вступ*

Ефективне виробництво високоякісних лікарських засобів потребує інтенсивного подрібнення компонентів до нанорозмірів. Бісерні млини є одним із найефективніших пристроїв для подібних завдань, забезпечуючи однорідність, біодоступність і стабільність продукту. Однак постають питання підвищення їх продуктивності, енергоефективності та рівномірності подрібнення.

### **Сутність наукової проблеми**

Основною проблемою є низька енергоефективність традиційних конструкцій бісерних млинів та нерівномірність подрібнення фармацевтичних компонентів. Актуальність удосконалення млинів посилюється високими енергетичними витратами та потребою відповідати стандартам GMP.

### **Значущість теми**

Оптимізація процесу подрібнення безпосередньо впливає на якість, стабільність та фармакокінетику лікарських препаратів. Удосконалення конструкцій бісерних млинів сприяє зниженню забруднень, втрат сировини та підвищенню стабільності процесу.

## **Стан розробленості питання**

Хоча дослідження у сфері тонкого подрібнення є активними, удосконалення конструкцій бісерних млинів залишається недостатньо вивченим, особливо в контексті подрібнення фармацевтичних компонентів.

## **Обґрунтування необхідності дослідження**

Оптимізація конструкцій бісерних млинів дозволить знизити енергетичні витрати та забезпечити високу якість продукту, що сприятиме розробці екологічно безпечних і конкурентоспроможних лікарських засобів.

Таким чином, дослідження має вагомий науковий і практичний потенціал.

## *Актуальність теми*

Сучасна фармацевтична галузь демонструє стрімкий розвиток, спрямований на вдосконалення технологій виробництва лікарських засобів, що мають високу біодоступність та ефективність. У світі значна увага приділяється використанню нанотехнологій, що дозволяють покращити терапевтичні властивості препаратів. Одним із ключових аспектів цього напряму є отримання надтонких порошоків активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) та допоміжних компонентів, що забезпечує їх рівномірний розподіл у лікарських формах і підвищує ефективність засвоєння організмом. Бісерні млини є провідними пристроями для подрібнення матеріалів до нанорозмірів, проте їх ефективність і енергоощадність потребують значного вдосконалення.

### **Короткий огляд поточної ситуації**

У світовій практиці бісерні млини широко застосовуються у фармацевтичній, хімічній та харчовій промисловості для отримання продуктів із високим ступенем подрібнення. Водночас залишається низка невирішених проблем: висока енергоємність процесу, нерівномірність розміру частинок, знос робочих елементів та забруднення продукту частинками матеріалу обладнання. Актуальність досліджень у цій сфері обумовлена необхідністю розробки інноваційних підходів до подрібнення, які б забезпечили високу якість продуктів при зниженні витрат на виробництво.

### **Критичний аналіз наукових досліджень**

Наукові дослідження, що проводилися раніше, зосереджувалися на вивченні механізмів подрібнення у бісерних млинах, виборі оптимальних параметрів процесу (швидкість обертання, розмір бісеру, час обробки) та удосконаленні конструктивних елементів, таких як робочі камери та розподільчі сітки. Перевагами цих досліджень є напрацювання теоретичної

бази та створення універсальних методик моделювання процесу подрібнення. Водночас їхні недоліки полягають у недостатньому врахуванні специфіки фармацевтичних компонентів, які мають високу чутливість до температури та механічного впливу, що може призводити до деградації матеріалів або втрати їхніх функціональних властивостей.

Окремі роботи зосереджені на підвищенні енергоефективності бісерних млинів, але вони часто ігнорують аспекти екологічності виробництва та економічної доцільності застосування нових конструктивних рішень. Таким чином, існує потреба у комплексному підході до вирішення цих питань із врахуванням сучасних вимог фармацевтичного виробництва.

**1. Переваги обраної тематики**

2. Обрана тема дослідження має кілька важливих переваг:

3. **Інноваційність** – вдосконалення бісерних млинів сприяє розвитку нанотехнологій, які є одним із найперспективніших напрямів сучасної науки.

4. **Практична значущість** – результати роботи можуть бути безпосередньо впроваджені у фармацевтичне виробництво, що дозволить знизити собівартість лікарських засобів та підвищити їх якість.

5. **Міждисциплінарність** – дослідження поєднує механіку, матеріалознавство, фармацевтику та хімію, сприяючи синергії наукових знань.

6. **Економічна ефективність** – оптимізація роботи бісерних млинів забезпечує зменшення енерговитрат та зносу обладнання, що є важливим для підприємств у довгостроковій перспективі.

Таким чином, удосконалення бісерних млинів для подрібнення компонентів лікарських засобів є актуальною задачею, що сприятиме

підвищенню ефективності фармацевтичної галузі та задоволенню зростаючих вимог до якості продукції.

### ***Об'єкт дослідження***

Об'єктом дослідження є процес надтонкого подрібнення матеріалів у бісерних млинах, які використовуються для отримання компонентів лікарських засобів із заданими характеристиками. Цей процес є багатофакторним явищем, що включає механічні, гідродинамічні та фізико-хімічні взаємодії між подрібнюваними частинками, середовищем і конструктивними елементами обладнання.

Надтонке подрібнення відіграє важливу роль у фармацевтичній промисловості, оскільки дозволяє отримувати матеріали із частинками розміром у нанометровому діапазоні. Це суттєво впливає на біодоступність лікарських засобів, їхню рівномірність у складі лікарських форм та стабільність фізико-хімічних властивостей. У процесі подрібнення в бісерному млині відбувається інтенсивна дія механічних сил – стирання, удару та зсуву, які забезпечують руйнування частинок матеріалу до потрібного розміру.

Сучасні конструкції бісерних млинів дозволяють регулювати такі параметри, як швидкість обертання, розмір і матеріал бісеру, тривалість процесу, а також температуру робочого середовища. Однак ефективність процесу значною мірою залежить від взаємодії цих факторів, що ускладнює його оптимізацію. Ускладнення додають і специфічні властивості фармацевтичних матеріалів, які можуть бути термочутливими або мати схильність до агломерації.

Крім того, процес подрібнення в бісерних млинах має низку особливостей, пов'язаних із турбулентністю та динамікою частинок у робочій камері. Неправильно підібрані режими можуть призвести до перевитрати енергії, зносу робочих елементів або отримання матеріалів із

нерівномірним розміром частинок. Такі явища є ключовими викликами для удосконалення роботи бісерних млинів.

Дослідження об'єкта також враховує конструктивні особливості млинів, включаючи геометрію робочої камери, конфігурацію перемішувальних елементів і вибір матеріалу виготовлення основних деталей. Ці аспекти безпосередньо впливають на енергоефективність та продуктивність обладнання.

Отже, об'єктом дослідження є складний і багатогранний процес, що охоплює фізико-механічні явища, взаємодію матеріалів і оптимізацію конструктивних параметрів для підвищення ефективності роботи бісерних млинів та забезпечення високої якості продуктів, які використовуються у виробництві лікарських засобів.

### ***Класифікація бісерних млинів***

#### **Занурювальний бісерний млин**

Занурювальний бісерний млин — це високоефективне обладнання для подрібнення та диспергування матеріалів, що важко піддаються обробці. Такий тип млина (рисунок 1.1) особливо ефективний у випадках, коли необхідно досягти високого ступеня подрібнення за короткий проміжок часу, зокрема для продуктів, де важливими є точність кольору та рівномірність текстури.



Рисунок 1.1 Занурювальний бісерний млин  
(<https://tecsa.com.ua/uk/obladnannya-dlya-vyrobnyctva-lfm-i-sbs/mlyny/>)

## **Конструктивні особливості**

### **1. Привідна система**

- Трансмійний вузол, розташований на верхній частині млина, приводить у рух роторно-статорну систему всередині робочої камери.
- Вал виготовлений із високоміцної сталі, стійкої до агресивного середовища, та покритий хромовим шаром для підвищення зносостійкості.
- На валу закріплені пальці, виконані з того ж матеріалу, що й вал, для забезпечення довговічності.

### **2. Робоча камера**

- Камера оснащена нерухомими пальцями, розташованими на її внутрішніх стінках. Це дозволяє інтенсифікувати подрібнення за рахунок більш ефективного перемішування бісеру та матеріалу.

### **3. Гідропневматична система**

- Використовується для підйому та опускання робочої колонки, що забезпечує простоту у використанні.

### **4. Переваги млинів занурювального типу**

### **5. Компактність**

- Невелике співвідношення об'єму робочої камери до об'єму продукту дозволяє працювати з малими партіями матеріалу.

### **6. Ефективність**

- Короткий час подрібнення завдяки високій інтенсивності механічного впливу.

## **7. Універсальність**

- Млин здатний працювати з матеріалами різної в'язкості.

## **8. Економія простору та ресурсів**

- Відсутність необхідності в додаткових насосах, шлангах чи переносних посудинах.

## **9. Зручність очищення**

- Робоча камера легко очищується, що важливо при зміні матеріалів.

## **10. Поєднання функцій**

- Одна робоча камера може використовуватись як для диспергування, так і для подрібнення.

### **Недоліки**

#### **1. Обмеження режиму роботи**

- Млин працює як пристрій періодичної дії, що може обмежувати його продуктивність у безперервних процесах.

#### **2. Висока вартість**

- Дорогі комплектуючі та вузли збільшують загальну вартість обладнання.

#### **3. Обмеження приводу**

- Використання пасової передачі в якості основної передачі може спричиняти втрати енергії та швидке зношування пасів.

#### **4. Недоліки стартової системи**

- Відсутність плавного запуску мішалки створює додаткове навантаження на механічні вузли при старті, що може знижувати їх термін служби.

## **Напрями вдосконалення**

### **1. Автоматизація**

- Встановлення системи плавного пуску для зменшення навантаження на привід.

### **2. Покращення привідної системи**

- Замінити пасову передачу на безредукторний електропривід або прямий привод для підвищення ефективності.

### **3. Удосконалення конструкції валу та пальців**

- Застосування інноваційних покриттів для підвищення стійкості до зношування та корозії.

### **4. Модернізація робочої камери**

- Оптимізація геометрії пальців та стінок для зменшення "мертвих зон" та підвищення продуктивності.

### **5. Зниження вартості деталей**

- Використання альтернативних матеріалів зі схожими властивостями, але меншою собівартістю.

### **6. Розширення функціональності**

- Інтеграція сенсорів для моніторингу температури, в'язкості та рівня подрібнення в режимі реального часу.

Занурювальні бісерні млини залишаються ключовим рішенням у галузях, де важлива якість подрібнення, особливо у фармацевтичній, лакофарбовій та хімічній промисловостях. Їхній подальший розвиток

спрямований на покращення енергоефективності, зниження витрат на обслуговування та розширення сфер застосування.

## Бісерний млин барабанного типу Turbo Type

Бісерний млин барабанного типу Turbo Type (рисунок 1.2) розроблений для високоефективного подрібнення продуктів до надтонких частинок. Конструкція млина забезпечує оптимальну взаємодію між подрібнювальними елементами та робочою масою, що значно підвищує якість і швидкість обробки матеріалів.

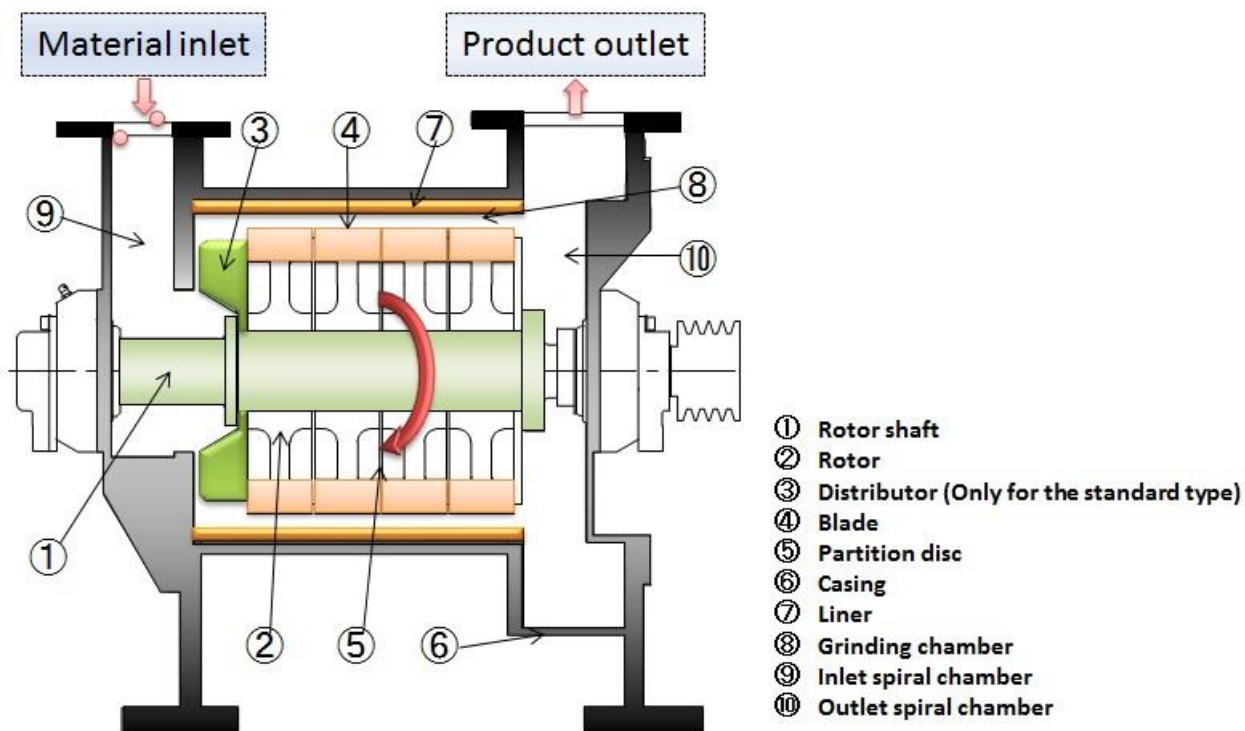


Рисунок 1.2 Бісерний млин Turbo Type

[<https://www.freund-turbo.co.jp/en/product/product/dry/-s-m.html>]

### Конструктивні особливості

#### Подрібнювальні елементи

Основними елементами є крильчатки, розташовані на спеціальних насадках. Кожна насадка має два ряди по 11 крильчаток, розміщених на обох сторонах. На валу млина закріплено три такі насадки, що збільшує загальну площу контакту з робочою масою.

#### Принцип роботи

За рахунок кута нахилу крильчаток забезпечується циркуляція матеріалу в робочій камері. Продукт проходить через сепаратор, який відділяє готові частинки від подрібнювальних тіл, що сприяє безперервності процесу.

### **Система охолодження**

Робоча камера оснащена спіральними секціями для циркуляції охолоджувальної води між її стінками.

Така конструкція забезпечує рівномірне охолодження по всій площі камери, що важливо для запобігання перегріву під час роботи на високих обертах.

### **Переваги**

#### **1. Безперервність процесу**

- Млин забезпечує безперервний режим роботи, що підвищує продуктивність і знижує час простою.

#### **2. Ефективне охолодження**

- Рівномірне охолодження всієї робочої камери сприяє стабільній роботі та запобігає перегріву продукту.

#### **3. Висока ефективність подрібнення**

- Завдяки високій швидкості обертання ротора та значній площі подрібнювальних насадок млин забезпечує швидке й якісне подрібнення навіть найскладніших продуктів.

### **Недоліки**

#### **1. Складність очищення**

- Трудомісткий процес очищення робочих органів і камери ускладнює обслуговування обладнання, особливо при частій зміні матеріалів.

### **Додаткова інформація**

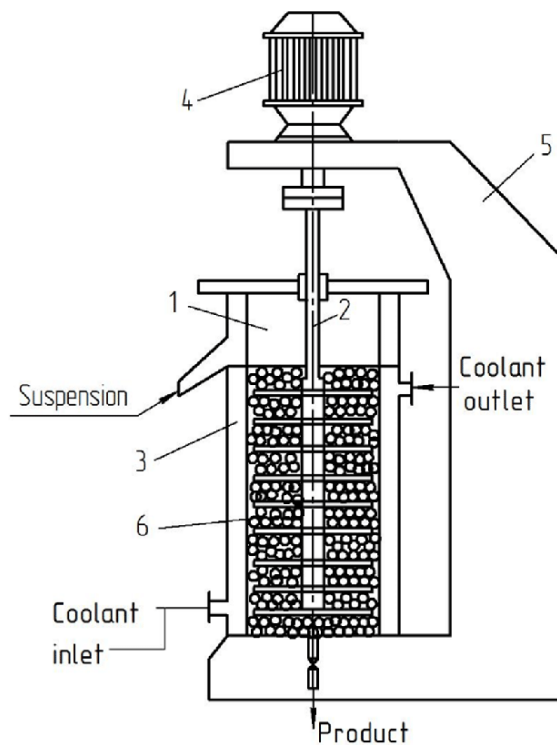
Бісерний млин Turbo Туре ідеально підходить для обробки матеріалів у фармацевтичній, хімічній та лакофарбовій промисловостях, де важлива висока якість кінцевого продукту та стабільність параметрів подрібнення. Завдяки своїй конструкції млин може використовуватися для обробки широкого спектра продуктів, включаючи ті, які потребують ретельного контролю температури.

**Можливі напрями вдосконалення:**

1. Впровадження автоматизованих систем очищення робочої камери.
2. Покращення сепаратора для підвищення точності відділення подрібнених частинок.
3. Розширення матеріалів виготовлення подрібнювальних насадок для роботи з агресивними середовищами.
4. Бісерні млини цього типу демонструють високу продуктивність і надійність, що робить їх незамінним обладнанням для багатьох технологічних процесів.

**Вертикальний бісерний млин**

Вертикальний бісерний млин (рисунок 1.3) призначений для високоефективного подрібнення матеріалів у середовищі бісеру. Його конструкція забезпечує рівномірне подрібнення та дозволяє регулювати ступінь диспергування продукту завдяки інноваційним інженерним рішенням.



**Рисунок 1.3 Вертикальний бісерний млин**

[<https://www.researchgate.net/figure/Bead-mill-1-cylinder-2-disk-rotor-3-shirt-4-engine-5-bedplate-6-beadsfig10329762097>]

### **1. Конструктивні особливості**

#### **2. Циліндрична робоча камера**

- Камера має спеціальні засоби для завантаження вихідного матеріалу та вивантаження готового продукту, забезпечуючи безперервність процесу.
- Внутрішній простір камери заповнений подрібнювальним бісером.

#### **3. Обичайка з гвинтовими спіралями**

- У камері розташована обичайка з зовнішньою та внутрішньою гвинтовими спіралями, що мають протилежно спрямовані витки.

- Обичайка з'єднана з приводним валом через диск, що забезпечує її надійне кріплення та стабільну роботу.

#### **4. Секційна структура камери**

- Камера поділена на секції горизонтальними перфорованими перегородками.
- У кожній секції є вікна у верхній і нижній частинах для оптимальної циркуляції матеріалу.

#### **5. Крок спіралей**

- У межах однієї секції крок спіралей залишається постійним, а знизу вгору поступово зменшується. Це забезпечує ефективне подрібнення, оскільки створює градієнт інтенсивності процесу.

#### **Переваги**

##### **Інтенсифікація подрібнення**

Горизонтальні перфоровані перегородки збільшують ефективність подрібнення за рахунок оптимізації циркуляції матеріалу та рівномірного розподілу бісеру.

##### **Регулювання ступеня подрібнення**

Можливість змінювати робочі органи мішалки дозволяє налаштовувати обладнання для отримання необхідного рівня дисперсності продукту.

##### **Універсальність застосування**

Конструкція млина підходить для різних типів матеріалів, включаючи фармацевтичні, хімічні та харчові продукти.

##### **Додаткова інформація**

Вертикальні бісерні млини цього типу ідеально підходять для обробки матеріалів, де важливими є точний контроль розміру частинок та рівномірність подрібнення. Завдяки вдосконаленій конструкції, обладнання забезпечує високу продуктивність і є енергоефективним.

### Можливі напрями вдосконалення:

- Впровадження системи автоматичного контролю за ступенем подрібнення.
- Покращення охолоджувальної системи для обробки матеріалів, чутливих до температури.
- Використання матеріалів із підвищеною зносостійкістю для робочих органів, що подовжить термін служби млина.

Вертикальний бісерний млин завдяки своїм технічним характеристикам забезпечує високу якість подрібнення, що робить його популярним у різних промислових галузях.

### Бісерний млин пальцевого типу

Бісерний млин пальцевого типу (рисунок 1.4) — це обладнання безперервної дії, розроблене для подрібнення матеріалів до надтонкого рівня з високою продуктивністю. Його конструкція поєднує інноваційні рішення, що забезпечують ефективність роботи та якість кінцевого продукту.

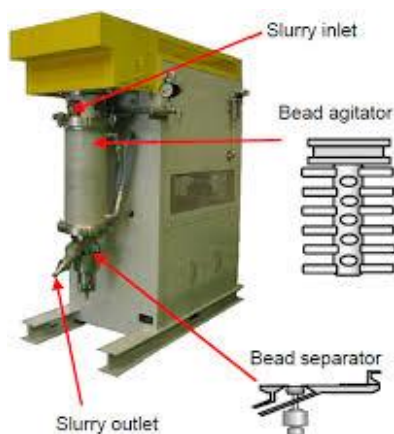


Fig. 6 Apex Mill

### Рисунок 1.4 Вертикальний бісерний млин

[<http://www.hiroshimamm-chemtech.com/en/knowledge/detail01/>]

### Конструктивні особливості

#### 1. Робочий орган

- Основним елементом робочого органу механізму є напівтрубовал, на якому жорстко закріплені подрібнювальні пальці. Ці пальці створюють потужний вплив на матеріал, сприяючи інтенсивному подрібненню.

## **2. Циліндричне сито**

- Всередині трубовала розташоване циліндричне сито, яке виконує функцію відділення подрібнювального бісеру від продукту. Це дозволяє досягати необхідної чистоти готового матеріалу та підвищує ефективність процесу.

## **3. Відцентровий сепаратор**

- Млин оснащений великим відцентровим сепаратором, який забезпечує ефективне розділення продукту і бісеру. Відцентрове колесо відштовхує бісер від розвантажувального сита, запобігаючи його потраплянню до готового продукту.

## **4. Охолоджувальна система**

- Інтенсивне охолодження здійснюється через робочу камеру, між стінками якої циркулює вода. Охолоджувальні канали мають спіральну конструкцію, поділену на секції, що забезпечує рівномірний теплообмін і захищає матеріал від перегріву.

### **Переваги**

#### **1. Безперервний процес роботи**

- Дозволяє досягати високої продуктивності без перерв на обслуговування чи очищення робочої камери.

#### **2. Ефективне подрібнення**

- Використання подрібнювальних пальців на трубовалі забезпечує високу інтенсивність процесу подрібнення.

### 3. Система розділення продукту і бісеру

- Великий відцентровий сепаратор та циліндричне сито забезпечують точне і надійне відділення бісеру, підвищуючи якість кінцевого продукту.

### 4. Ефективне охолодження

- Спіральна конструкція охолоджувальних каналів гарантує рівномірний розподіл температури та захищає матеріал від термічного пошкодження.

### Додаткова інформація

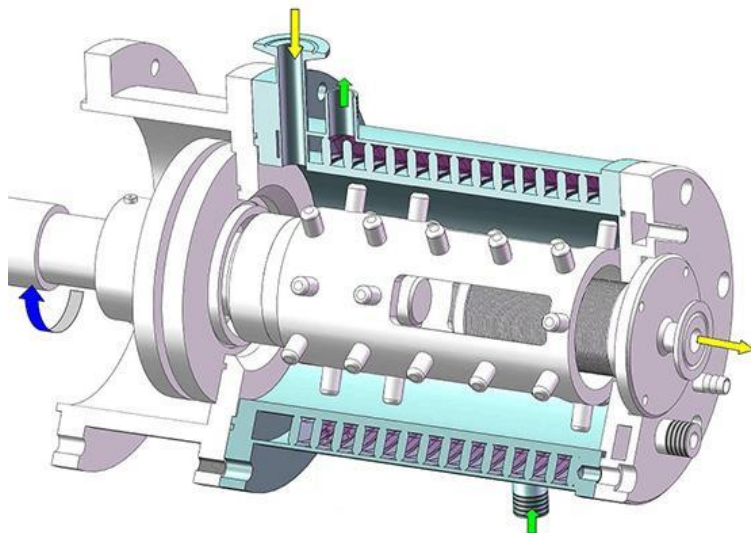
Бісерний млин пальцевого типу відзначається надійністю та універсальністю, що робить його придатним для використання в різних галузях, таких як фармацевтика, хімічна промисловість, харчова галузь та нанотехнології.

### Можливі напрями вдосконалення:

- Оптимізація конструкції пальців для підвищення їх зносостійкості.
- Автоматизація процесу охолодження для роботи з чутливими до температури матеріалами.
- Використання нових матеріалів для сита та сепаратора для зменшення зношування.
- Цей тип млина поєднує високу продуктивність з простотою обслуговування, що робить його одним із найбільш затребуваних у сучасному виробництві.

## **Бісерний млин дискового типу (горизонтальний)**

Бісерний млин дискового типу горизонтальної конструкції (рисунок 1.5) — це сучасне обладнання безперервної дії, призначене для подрібнення матеріалів до ультрадрібного стану. Завдяки своїй конструкції, цей тип млина забезпечує високу продуктивність і стабільність роботи.



**Рисунок 1.5 горизонтальний бісерний млин пальцевого типу**

[<https://beadsmill.com/3a39f209-62ad-290c-2bdc-f55b84c3818c/8301d3b4-7a42-4508-125d-8fb963f3ff4b.shtml>]

### **Конструктивні особливості**

#### **Робочий орган**

Подрібнення матеріалу забезпечується дисками, які мають різну форму та розташовуються по чергово. Між дисками встановлені проміжні втулки, які забезпечують рівномірний розподіл робочого матеріалу в камері та покращують циркуляцію продукту.

#### **Система відділення бісеру**

Для розділення подрібненого продукту і бісеру використовується циліндричне сито, яке гарантує чистоту кінцевого продукту та знижує втрати робочого матеріалу.

#### **Охолоджувальна система**

Охолодження робочої камери здійснюється за допомогою спіральної охолоджувальної сорочки, в якій циркулює охолоджувальна вода. Це дозволяє ефективно відводити тепло, яке виділяється під час подрібнення, і запобігає перегріву матеріалу.

#### **Матеріали виготовлення**

Усі елементи робочої камери виконані з надтвердої сталі, твердість якої досягає HRC62. Це забезпечує високу стійкість до зносу і тривалий термін експлуатації обладнання.

#### **Переваги**

##### **Висока зносостійкість**

Використання надтвердої сталі в конструкції робочої камери та її елементів значно підвищує довговічність млина.

##### **Безперервний режим роботи**

Млин працює без зупинок, що забезпечує високу продуктивність і підходить для промислових масштабів.

##### **Ефективне охолодження**

Спіральна конструкція охолоджувальної сорочки забезпечує рівномірний теплообмін і стабільність робочого процесу.

##### **Універсальність**

Млин підходить для роботи з широким спектром матеріалів, включаючи високов'язкі суспензії та матеріали, які чутливі до термічного впливу.

##### **Область застосування**

Горизонтальний бісерний млин дискового типу широко використовується у виробництві фарб, лаків, косметичних засобів, фармацевтичних препаратів, а також у хімічній промисловості. Завдяки своїй міцності та ефективності, цей тип млина ідеально підходить для тривалих виробничих циклів.

**Можливі напрями вдосконалення:**

- Оптимізація форми дисків для покращення рівномірності подрібнення.
- Розробка системи автоматичного очищення робочої камери для зменшення часу на технічне обслуговування.
- Використання інноваційних матеріалів для зниження ваги конструкції та збільшення енергоефективності.
- Ця модель млина є прикладом високотехнологічного обладнання, яке відповідає сучасним вимогам до якості продукції та ефективності виробничих процесів.

**1.2 Типові види обладнання для подрібнення до нанорозміру**

**Порівняльний аналіз обладнання для подрібнення до наночастинок**

Нижче наведено аналіз основного обладнання, яке використовується для подрібнення до нанорозмірів, включаючи гомогенізатор високого тиску, бісерний млин, колоїдний млин та інші технології.

Таблиця 1.1

## Аналіз обладнання

Тип обладнання	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Сфери застосування
<b>Гомогенізатор високого тиску</b>	Пропускання матеріалу через вузькі канали під високим тиском, створюючи турбулентність та кавитацію.	- Висока ефективність подрібнення до нанорівня- Можливість обробки рідин різної в'язкості- Висока повторюваність результатів	- Висока вартість обладнання- Високе енергоспоживання- Низька ефективність для твердої фази	Фармацевтика, харчова промисловість, косметика
<b>Бісерний млин</b>	Подрібнення частинок за рахунок ударів та тертя між бісером і матеріалом у рухомій робочій камері.	- Ефективне подрібнення для широкого спектра матеріалів- Можливість адаптації робочих параметрів- Відносно низьке енергоспоживання	- Складність очищення- Знос робочих елементів- Потребує ретельного налаштування	Фармацевтика, хімія, нанотехнології
<b>Колоїдний млин</b>	Зрідження матеріалу за рахунок зсувних сил між обертовими та нерухомими поверхнями.	- Простота конструкції- Висока продуктивність для рідин- Компактність	- Обмежена можливість подрібнення до нанорозмірів- Висока залежність від властивостей матеріалу	Харчова промисловість, косметика, фармацевтика
<b>Ультразвуковий подрібнювач</b>	Використання ультразвукових хвиль для створення кавітаційних бульбашок у рідині, що спричиняють подрібнення.	- Висока ефективність для дисперсій- Підходить для чутливих матеріалів- Легкість очищення	- Локальне перегрівання- Низька продуктивність- Не підходить для великих обсягів	Нанотехнології, біотехнології, фармацевтика
<b>Струменевий млин</b>	Матеріал подрібнюється завдяки зіткненням між частинками, що рухаються під дією струменів газу.	- Відсутність механічного зносу- Висока ефективність для крихких матеріалів- Низьке енергоспоживання	- Обмеження для в'язких матеріалів- Невисока продуктивність для великих обсягів	Хімічна промисловість, фармацевтика, виробництво порошків

## Деталізований аналіз

### 1. Гомогенізатор високого тиску

Гомогенізатори високого тиску ідеально підходять для отримання нанорозмірних частинок у рідких системах. Основна їх перевага — здатність створювати однорідні суспензії навіть для складних систем. Високий рівень кавітації сприяє подрібненню, однак ефективність знижується для твердої фази.

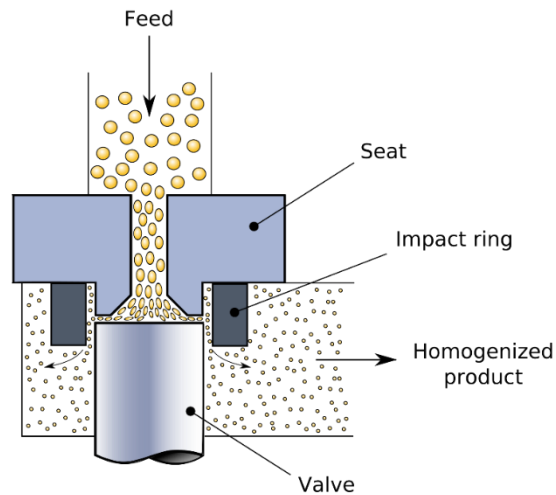


Рисунок 1.2.1. [Схема гомогенізатора високого тиску](#)

### 2. Бісерний млин

Бісерні млини є універсальними та підходять як для мокрого, так і для сухого подрібнення. Завдяки можливості адаптації розміру бісеру, швидкості обертання та конструкції робочої камери, млини забезпечують оптимальні результати для матеріалів різної твердості та в'язкості.

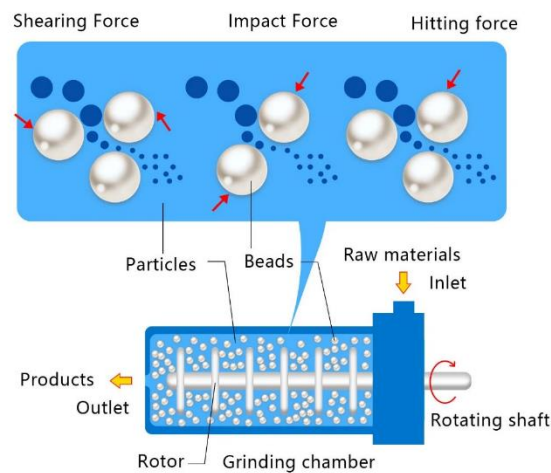


Рисунок 1.2.2. [Принцип роботи бісерного млину](#)

### 3. Колоїдний млин

Колоїдні млини зазвичай використовуються для зменшення розміру частинок до мікронних значень. Вони менш ефективні для отримання

наночастинок, але залишаються економічним і продуктивним рішенням для обробки рідких систем.

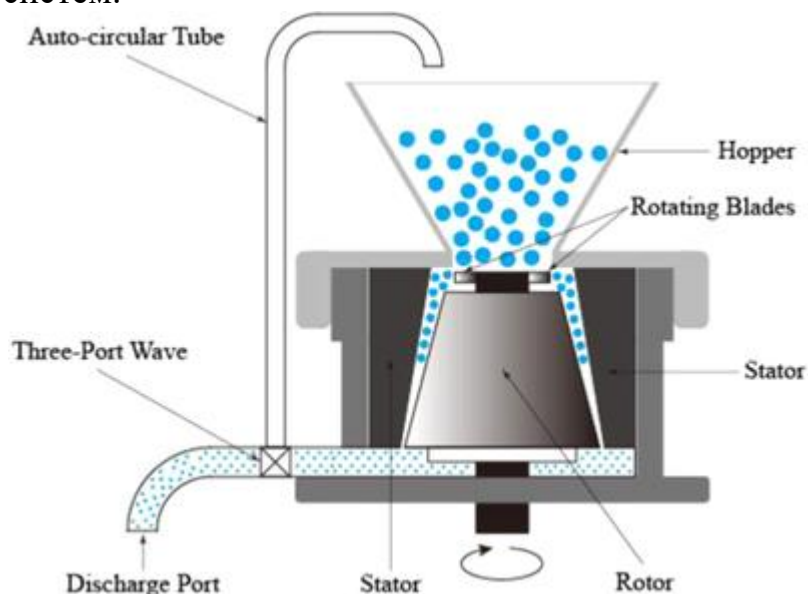


Рисунок 1.2.3. [Принцип роботи колоїдного млину](#)

#### 4. Ультразвуковий подрібнювач

Цей метод підходить для чутливих до температури матеріалів, однак має обмеження у продуктивності. Висока локальна енергія може спричинити небажане нагрівання, тому обладнання найкраще підходить для лабораторних умов.

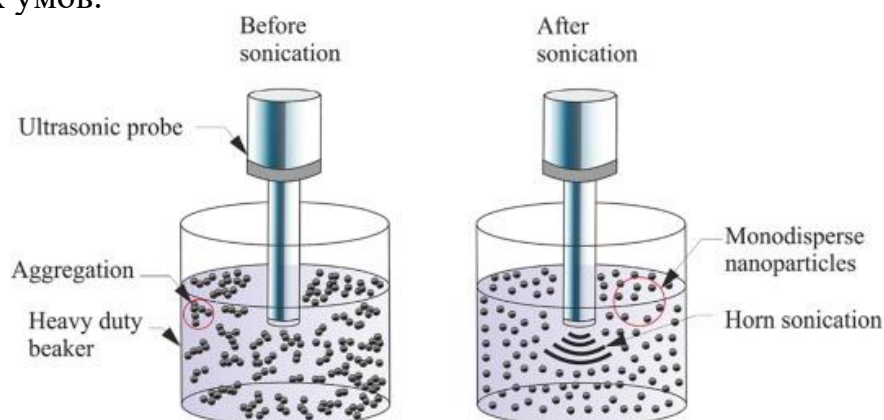


Рисунок 3.3. [Принцип роботи ультразвукового подрібнювача](#)

#### 5. Струменевий млин

Струменеві млини ефективні для крихких матеріалів і забезпечують високу чистоту продукту через відсутність механічного контакту. Вони менш універсальні, оскільки не підходять для в'язких матеріалів і великих обсягів.

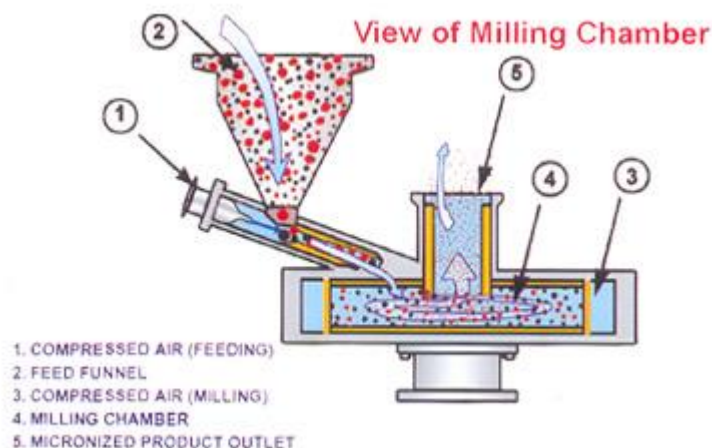


Рисунок 1.2.4. [Принцип роботи струменевого млину](#)

### **Висновок**

Вибір обладнання залежить від цільового матеріалу, вимог до розміру частинок і продуктивності. Для фармацевтичної та хімічної галузей бісерний млин залишається найкращим рішенням завдяки своїй універсальності та адаптивності. У випадках, де потрібно працювати з високими тисками або забезпечити однорідність рідин, доцільним є використання гомогенізаторів високого тиску.

### ***Предмети дослідження***

- **Конструктивні параметри бісерного млина**
  - Геометрія робочої камери, форма та розташування перемішувальних елементів, зносостійкість матеріалів.
- **Технологічні параметри процесу**
  - Вплив розміру бісеру, швидкості обертання, тривалості на якість подрібнення.
- **Моделювання у ANSYS та Rocky**
  - Двофазне моделювання у ANSYS Fluent (потіки рідини та бісеру).
  - Аналіз руху частинок і їх взаємодії у Rocky DEM.
- **Властивості матеріалів**
  - Вплив фізико-механічних характеристик матеріалів (твердість, густина) на подрібнення.

Ці предмети спрямовані на оптимізацію процесу подрібнення для підвищення ефективності роботи бісерних млинів

### ***Мета роботи***

Метою роботи є підвищення ефективності роботи бісерних млинів для надтонкого подрібнення компонентів лікарських засобів шляхом оптимізації їх конструктивних і технологічних параметрів на основі двофазного моделювання в ANSYS Fluent та аналізу руху частинок у Rocky DEM.

Це забезпечить зменшення енерговитрат, покращення рівномірності подрібнення та підвищення якості кінцевого продукту.

### ***Завдання досліджень***

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. **Дослідити** вплив конструктивних параметрів бісерного млина (геометрії робочої камери, розмірів та матеріалу перемішувальних елементів) на ефективність подрібнення.
2. **Обґрунтувати** вибір розмірів бісеру, швидкості обертання та інших технологічних параметрів процесу для забезпечення максимальної продуктивності.
3. **З'ясувати** закономірності формування турбулентних потоків у двофазному середовищі (рідина + бісер) під час подрібнення.
4. **Вивчити** фізико-механічні характеристики подрібнюваних матеріалів і їхній вплив на якість та рівномірність подрібнення.
5. **Розробити** цифрові моделі процесу подрібнення у ANSYS Fluent та Rocky DEM для аналізу динаміки потоків і руху частинок.
6. **Оптимізувати** конструктивні та технологічні параметри бісерного млина на основі результатів моделювання для підвищення ефективності та зниження енерговитрат.

### ***Наукова новизна***

- **Розробка нової методики моделювання двофазного процесу подрібнення в бісерних млинах з використанням програмних пакетів**

ANSYS Fluent та Rocky DEM. Це дозволило створити інтегровану модель для аналізу не тільки гідродинамічних потоків, але й взаємодії частинок бісеру та подрібнюваного матеріалу, що раніше не застосовувалося в такому поєднанні для фармацевтичних процесів.

- **Визначення оптимальних параметрів конструкції бісерного млина** для ефективного подрібнення фармацевтичних матеріалів, зокрема оптимізації геометрії робочої камери та розташування перемішувальних елементів. Це дозволяє покращити рівномірність подрібнення та зменшити енерговитрати, що є суттєвим кроком уперед у порівнянні з відомими методами.
- **Інноваційне використання двофазного моделювання для аналізу турбулентних потоків** у процесі подрібнення матеріалів, що дозволило точно визначити зони низької ефективності подрібнення і розробити рекомендації для їх усунення, чого раніше не було досягнуто в подібних дослідженнях.
- **Новий підхід до оптимізації технологічних режимів подрібнення** на основі фізико-механічних властивостей подрібнюваних матеріалів, що дозволяє досягти кращої якості кінцевого продукту при мінімальних енерговитратах, в порівнянні з традиційними методами регулювання технологічних параметрів.

Ці нововведення відрізняються від вже існуючих підходів тим, що поєднують сучасні методи комп'ютерного моделювання з детальним аналізом процесу подрібнення, що дозволяє отримати більш точні результати та досягти значного покращення ефективності технології.

### ***Практичне значення одержаних результатів***

**Результати магістерської роботи** мають значний практичний вплив на підвищення ефективності процесу надтонкого подрібнення у фармацевтичній промисловості. Запропоновані методи моделювання та оптимізації

конструктивних і технологічних параметрів бісерних млинів дозволяють знизити енерговитрати, покращити рівномірність подрібнення та забезпечити високу якість кінцевого продукту. Зокрема, розроблені параметри оптимізації робочого органу, розміру бісеру та форми робочої камери можуть бути впроваджені на існуючих підприємствах фармацевтичної галузі для поліпшення продуктивності та зниження витрат.

**Галузь промисловості, де можна використати результати:**

**Фармацевтична промисловість** — для підвищення якості лікарських засобів, покращення біодоступності активних компонентів та оптимізації виробничих процесів.

**Хімічна і харчова промисловість** — для подрібнення різноманітних порошкових матеріалів з високими вимогами до точності та рівномірності частинок.

**Нанотехнології** — для досягнення надтонких частинок, що використовуються в наноматеріалах та наномедицині.

**Впровадження результатів наукової роботи у навчальний процес:**

Результати дослідження можуть бути використані при викладанні курсів з **механіки рідин і газів, обладнання для фармацевтичного виробництва, моделювання технологічних процесів** в університетах та інженерних школах. Використання сучасних програмних засобів (ANSYS, Rocky DEM) для аналізу і моделювання технічних процесів може стати основою для практичних занять та лабораторних робіт.

**Підтвердження новизни магістерської роботи:**

Одержані результати підтверджуються результатами комп'ютерного моделювання та числовими даними, які демонструють підвищення ефективності роботи бісерних млинів.

Застосовані методи двофазного моделювання, що поєднують ANSYS Fluent та Rocky DEM, є новими для цієї області і можуть бути закріплені в

технічних умовах або рекомендаціях щодо вдосконалення фармацевтичного обладнання.

Отже, результати магістерської роботи мають важливе практичне значення для підвищення ефективності фармацевтичного виробництва, впровадження нових технологій та навчального процесу, що сприяє розвитку галузі та підготовці висококваліфікованих фахівців.

***Розділ 1. Аналіз  
сучасного стану об'єкта  
досліджень, вибір і  
обґрунтування основного  
напрямку досліджень***

***1.1. Аналіз літературних джерел за тематикою дослідження***

Розвиток технологій надтонкого подрібнення матеріалів є важливою складовою сучасної інженерії, зокрема у фармацевтичній, хімічній та харчовій промисловостях. Значна кількість наукових праць, патентів і технічних стандартів свідчить про активний інтерес до удосконалення конструкцій бісерних млинів. У цьому розділі представлено аналіз наукових статей, монографій, патентів та інших джерел інформації, що висвітлюють проблематику дослідження.

***1.2. Статті в наукових журналах***

- Kwade, A., & Schwedes, J. (2002). "Wet Comminution in Stirred Media Mills." Springer-Verlag.**

У статті описано основні принципи роботи бісерних млинів. Автори дослідили залежності між швидкістю обертання млина, розміром частинок і енерговитратами. Основні рекомендації стосуються вибору оптимального розміру бісеру для підвищення

ефективності процесу подрібнення. Проте недостатньо вивчено вплив геометрії робочої камери на рівномірність подрібнення.

2. **Fuerstenau, D.W., & Abouzeid, A.-Z. (2002). "The energy efficiency of ball milling in comminution." *International Journal of Mineral Processing*.**

У статті досліджується енергоефективність процесу подрібнення у млинах. Авторами запропоновано математичну модель, яка дозволяє прогнозувати енергетичні витрати. Недоліком є те, що модель не враховує специфічні особливості матеріалів із високою в'язкістю.

3. **Müller, S., & Bernhart, J. (2016). "Optimization of grinding processes in stirred media mills." *Chemical Engineering Science*.**

Основна увага приділяється оптимізації параметрів роботи млинів. Досліджено вплив швидкості обертання та діаметра млина на кінцевий розмір частинок. Авторами запропоновано використовувати комп'ютерне моделювання для передбачення ефективності процесу.

### **1.3. Монографії**

1. **Hounslow, M.J., & Ryall, R.L. (2001). "Granulation." *Elsevier Science*.**

Монографія надає глибокий аналіз фізичних процесів у грануляції та подрібненні. Описано сучасні методи математичного моделювання, які можуть бути адаптовані для аналізу процесів у бісерних млинах.

2. **Bird, R.B., Stewart, W.E., & Lightfoot, E.N. (2006). "Transport Phenomena." *Wiley*.**

У роботі детально описані основи механіки рідин і твердих тіл, що є основою для розробки моделей роботи млинів.

#### **1.4. Патенти**

**1. Патент UA No. 148281 (2021). "Vertical Bead Mill Design."**

У патенті описано конструкцію вертикального бісерного млина із зовнішніми та внутрішніми гвинтовими спіралями. Це рішення дозволяє підвищити ефективність подрібнення шляхом оптимізації руху матеріалу всередині камери.

**2. Патент US No. 10523456 (2019). "Advanced Grinding Mechanisms in Bead Mills."**

Патент охоплює використання комбінованих мішальних механізмів для підвищення рівномірності подрібнення. Основним досягненням є зменшення енергетичних витрат на процес, але для подальшого вдосконалення необхідно врахувати вплив форми бісеру.

#### **1.5. Стандарти, нормативні документи та інформація з веб-ресурсів**

**1. Rocky DEM 4.5 User Manual. ESSS, 2023.**

Керівництво описує використання програмного забезпечення для моделювання роботи бісерних млинів, зокрема аналізу контактних сил і розподілу частинок.

**2. ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., 2023.**

Документ містить теоретичні аспекти моделювання турбулентних потоків, які можуть бути використані для аналізу роботи млинів.

**3. ELE International. (2023). "Bead Mill Designs and Applications."**

Огляд сучасних конструкцій млинів та їхнього застосування в різних галузях.

#### **1.6. Резюме**

Аналіз наукових статей, патентів, монографій та інших джерел показав, що основними проблемами роботи бісерних млинів є оптимізація енергетичних витрат, рівномірність подрібнення та вплив геометрії конструкцій на ефективність. Сучасні дослідження активно використовують

числове моделювання для аналізу та вдосконалення конструкцій. Проте недостатньо вивчено вплив новітніх матеріалів і форм бісеру, що є перспективним напрямом для подальших досліджень.

Отже, дослідження у цьому напрямку є актуальним, оскільки воно дозволить розробити більш ефективні конструкції бісерних млинів із застосуванням новітніх підходів до моделювання та оптимізації процесів.

**Розділ 2. Теоретично-  
експериментальні  
дослідження**

**2.1. Постановка завдання пошуку нових науково-технічних рішень**

У сучасній фармацевтичній промисловості надтонке подрібнення активних фармацевтичних інгредієнтів є важливим етапом у виробництві ліків, оскільки від цього процесу залежить біодоступність та ефективність препарату. Одним з основних засобів досягнення потрібної грануляції є бісерний млин, проте існуючі технології та конструкції цих млинів мають низку недоліків, серед яких високі енерговитрати, нерівномірне подрібнення та обмежена можливість контролю над процесом.

Постановка завдання полягає в розробці та вдосконаленні математичних моделей, які дозволяють точно прогнозувати результати подрібнення у бісерному млині, а також в створенні програмного забезпечення для моделювання та оптимізації параметрів роботи млина з урахуванням фізико-хімічних властивостей матеріалу та конструктивних особливостей обладнання.

**2.2. Вибір математичної моделі об'єкта досліджень**

Для проведення теоретичних досліджень та оптимізації процесу подрібнення в бісерному млині була обрана математична модель, що поєднує моделювання двофазних середовищ — рідкого та твердого (частинок активних інгредієнтів і бісеру). Така модель дозволяє врахувати всі ключові фізичні процеси, що відбуваються в млині, включаючи турбулентні потоки, механічну взаємодію частинок і конструктивних елементів, а також теплообмін і масообмін.

Математична модель базується на рівняннях Нав'є-Стокса для рідинної фази та механічних рівняннях для твердих частинок, що враховують їх рух,

зіткнення та взаємодії. Модель описує динаміку та механіку частинок і потоку у робочій камері млина, що дозволяє спрогнозувати вплив різних параметрів (швидкості обертання, розміру бісеру, форми камери) на ефективність подрібнення.

Вибір цієї моделі обумовлений її здатністю детально передбачити процеси, що відбуваються всередині млина, з урахуванням складних взаємодій між компонентами, що забезпечить точність моделювання та ефективність оптимізації.

### ***2.3. Розробка комп'ютерної програми для реалізації математичної моделі***

Для реалізації математичної моделі була вибрана система ANSYS Fluent для моделювання рідких фаз і Rocky DEM для моделювання твердої фази, що дає змогу проводити спільне моделювання двофазного середовища. ANSYS Fluent дозволяє змоделювати та проаналізувати рух рідини в робочій камері млина, враховуючи складні турбулентні потоки та їх взаємодію з частинками твердого матеріалу. Rocky DEM забезпечує точне моделювання руху і взаємодії частинок бісеру та активних інгредієнтів, що дозволяє оцінити ефективність подрібнення та динаміку процесу.

Завдяки поєднанню цих двох програмних засобів, було досягнуто точного і комплексного аналізу роботи бісерного млина. У програмному забезпеченні була реалізована функція оптимізації параметрів роботи млина, що дозволяє вибирати найбільш ефективні швидкості обертання, розміри бісеру та форму робочої камери в залежності від властивостей матеріалу.

### ***2.4. Теоретичні дослідження та результати***

У процесі теоретичних досліджень було проведено мультифазне моделювання роботи горизонтального бісерного млина з дисковими та пальцевими агітаторами за допомогою ANSYS Fluent і Rocky DEM. Результати моделювання показали, що горизонтальний бісерний млин є

більш ефективним для подрібнення, ніж вертикальні аналоги, завдяки рівномірному розподілу частинок і стабільності процесу.

### **Порівняння ефективності горизонтального бісерного млина**

- **Розподіл швидкостей та рівномірність подрібнення:**

- Згідно з результатами моделювання швидкості потоку (ANSYS Fluent), горизонтальні млини демонструють вищу ефективність перемішування завдяки турбулентним зонам поблизу робочих елементів. Це дозволяє уникнути утворення "мертвих зон" і сприяє рівномірному подрібненню.
- Графіки, що демонструють середню кутову швидкість частинок (Rocky DEM), свідчать про стабільність системи після короткого періоду запуску, із середнім значенням швидкості близько 170–180 рад/с. Це забезпечує ефективний процес подрібнення при низьких енергетичних витратах.

- **Щільність контактів частинок:**

- За графіком кількості контактів сусідів (Neighbor Count), горизонтальний млин забезпечує стабільну контактну взаємодію між частинками після початкового періоду. Це свідчить про оптимальний розподіл частинок у робочій камері, що підвищує продуктивність і якість подрібнення.
- Висока кількість фрикційних контактів (Contacts Frictional) вказує на значну взаємодію частинок із бісером, що є ключовим фактором для зменшення розміру частинок до нанорівня.

### **Переваги пальцевих робочих елементів**

#### **Ефективність перемішування:**

Моделювання показало, що пальцеві робочі елементи створюють більш інтенсивну циркуляцію частинок у робочій камері. Це підтверджується графіками розподілу швидкостей (Velocity Contour), де максимальні швидкості спостерігаються поблизу пальців, сприяючи рівномірному перемішуванню.

Висока динаміка частинок у периферійній зоні пальцевих елементів забезпечує більшу частоту контактів і підвищену ефективність подрібнення.

#### **Щільність контактів та перекриття частинок:**

Графік суми перекриття (Sum Overlap) демонструє, що пальцеві елементи сприяють тісному контакту частинок. Це є важливим фактором для досягнення високої якості подрібнення, особливо у фармацевтичній промисловості, де важлива однорідність розміру частинок.

#### **Висновки**

Горизонтальний бісерний млин із пальцевими агітаторами є найефективнішим з досліджуваних, рішенням для подрібнення до нанорозмірів завдяки рівномірності подрібнення, високій частоті контактів частинок і стабільній динаміці процесу. Результати моделювання підтверджують доцільність використання таких млинів у фармацевтичній промисловості та інших галузях.

#### ***Алгоритм дослідження бісерного млина з використанням ANSYS Fluent та Rocky DEM***

Нижче наведено покроковий алгоритм дослідження процесу подрібнення в бісерному млині, що включає використання ANSYS Fluent для моделювання рідинної динаміки та Rocky DEM для аналізу частинок.

#### **1. Підготовка геометрії та створення сітки**

- **Вхідні дані:** Вибір параметрів бісерного млина (діаметр, довжина, форма робочих елементів, розмір робочої камери).

- **Кроки:**

- a. Створення CAD-моделі бісерного млина (з урахуванням дисків, пальців, або інших елементів).
- b. Імпорт моделі в ANSYS SpaceClaim для підготовки геометрії.
- c. Розбиття геометрії на області:
  - i. Область рідини (робоче середовище).
  - ii. Область рухомих частин (ротор, диски, або пальці).
- d. Генерація обчислювальної сітки у Fluent Meshing з достатньою деталізацією для моделювання дрібних потоків.

## **2. Налаштування ANSYS Fluent для моделювання рідинної динаміки**

• **Мета:** Моделювання руху рідини у робочій камері.

• **Кроки:**

1. Імпорт сітки у ANSYS Fluent.
2. Вибір фізичних моделей:
3. Турбулентність: використання моделі **k-ε** або **k-ω SST**.
4. В'язкість: визначення властивостей рідини.
5. Задання граничних умов:
6. Швидкість обертання ротора.
7. Вхідний та вихідний потоки.
8. Проведення розрахунків:
9. Запуск стаціонарного або перехідного аналізу.
10. Збір даних про розподіл швидкості, тиску, турбулентності.

## **3. Експорт даних у Rocky DEM**

• **Мета:** Використання даних Fluent для моделювання взаємодії частинок.

• **Кроки:**

1. Експорт швидкостей, тисків та граничних умов з Fluent.

2. Імпорт даних у Rocky DEM для створення комбінованого моделювання.
3. Налаштування параметрів частинок:
4. Розмір, щільність, форма бісеру.
5. Властивості подрібнюваного матеріалу.
6. Визначення граничних умов:
7. Вплив потоків з Fluent на рух частинок.
8. Взаємодія частинок із робочими елементами.

#### **4. Моделювання в Rocky DEM**

- **Мета:** Аналіз динаміки частинок у робочій камері.

- **Кроки:**

1. Вибір моделі контакту частинок:
2. Фрикційна взаємодія між частинками.
3. Проведення розрахунків:
4. Аналіз розподілу частинок, кількості контактів, та енергії.
5. Візуалізація траєкторій руху частинок.
6. Збір ключових метрик:
7. Кількість фрикційних контактів (Contacts Frictional).
8. Кутові швидкості (Average Rotational Velocity).
9. Щільність частинок (Neighbor Count).

#### **5. Аналіз результатів та висновки**

- **Мета:** Інтерпретація даних для покращення конструкції бісерного млина.

- **Кроки:**

1. Аналіз результатів Fluent:
2. Розподіл швидкостей, зон турбулентності та тисків.
3. Виявлення "мертвих зон" або зон надмірного перенапруження.

4. Аналіз результатів Rocky DEM:
5. Ефективність подрібнення за кількістю контактів частинок.

**Розділ 3. Результати  
моделювання та їх аналіз**  
**Аналіз імітаційного  
моделювання**

***Горизонтальний бісерний млин з дисками***

Проведено імітаційне моделювання горизонтального бісерного млину з дисками.

Вихідні данні для моделювання:

Заповнення млину водою – 75 %

Швидість обертання валу – 200 рад/с

Матеріал бісеру – скло

Подрібнювальний матеріал – тальк

Розмір частинок бісеру – 2 мм

Розмір частино тальку – 1 мм

Сумарна кількість частинок – 70000

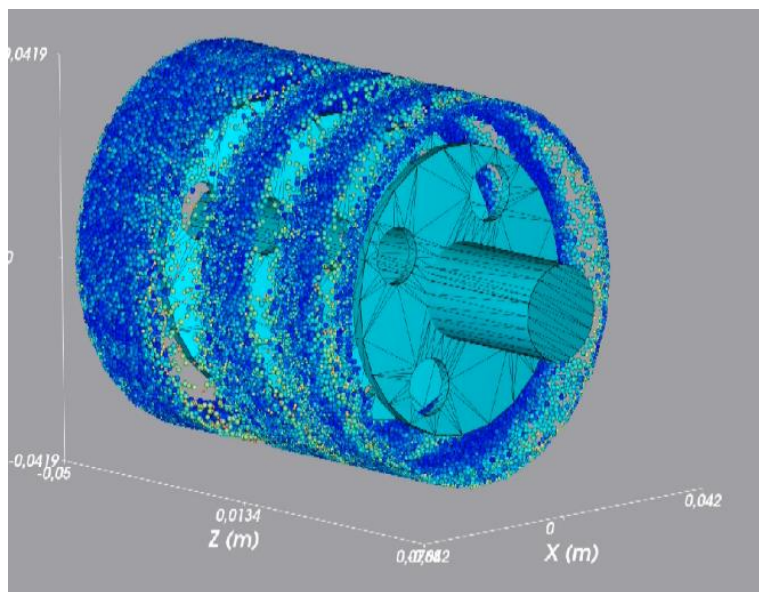


Рисунок 3.1 Моделювання у Rocky

Результати моделювання у Ansys Fluent

**Контур тиску (Pressure Contour)**

Pressure  
Contour 1

1.203e+03
1.069e+03
9.350e+02
8.011e+02
6.673e+02
5.334e+02
3.995e+02
2.656e+02
1.318e+02
-2.119e+00
-1.360e+02

[Pa]

Ansys  
2024 R1

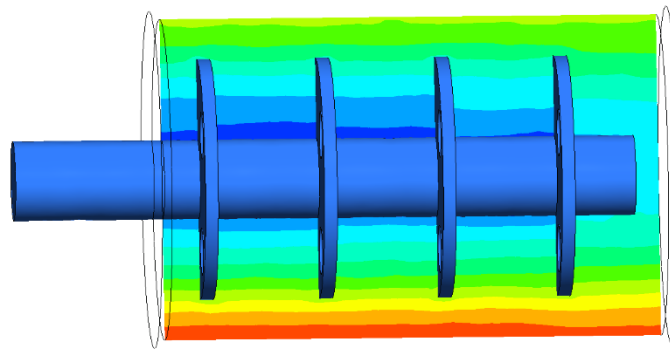


Рисунок 3.2 Контур тиску

### Загальний опис:

- Контур демонструє розподіл тиску всередині системи, включаючи робочу камеру з лопатями.
- Максимальні значення тиску ( $\sim 1203$  Па) спостерігаються у зонах перед лопатями, що вказує на вплив обертального руху на локальний тиск.
- Мінімальні значення тиску ( $\sim -136$  Па) виявляються у зоні низької турбулентності позаду лопатей.

### Особливості розподілу:

- Червоні області показують високу зону тиску, де відбувається активна взаємодія потоку з лопатями.
- Сині зони вказують на зони зниженого тиску, які утворюються через турбулентність та вихори позаду лопатей.

### Інтерпретація:

- Зони високого тиску свідчать про ефективний обертальний рух, який сприяє подрібненню або змішуванню частинок.
- Мінімальний тиск позаду лопатей може сприяти утворенню кавітації, що слід враховувати для уникнення негативного впливу на систему.

### Вектори швидкості (Velocity Vectors)

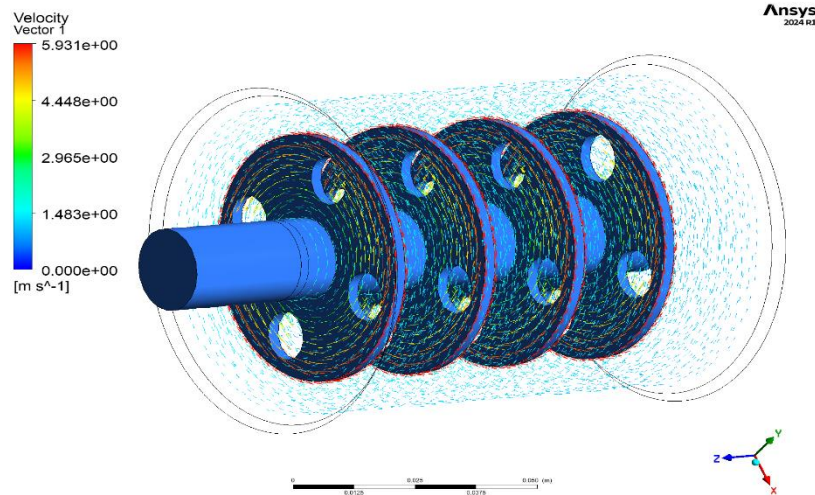


Рисунок 3.3 вектори швидкості руху води у бісерному млині

### Загальний опис:

- Графік показує вектори швидкості у робочій камері. Максимальна швидкість потоку ( $\sim 5.931$  м/с) спостерігається у зовнішніх частинах лопатей.
- У зоні поблизу валу швидкість потоку наближається до нуля, що відповідає очікуваній динаміці.

### Особливості розподілу:

- Вектори формують циркуляційні структури навколо лопатей, які відповідають за перемішування і подрібнення частинок.
- На кінцях лопатей утворюються зони інтенсивного руху (червоні області), що є основною зоною енерговкладення у систему.

### Інтерпретація:

- Розподіл швидкості вказує на ефективне змішування, з високою енергією у периферійній зоні лопатей.

Результати моделювання в Ansys Rocky

### Аналіз графіка "Contacts Frictional vs. Time"

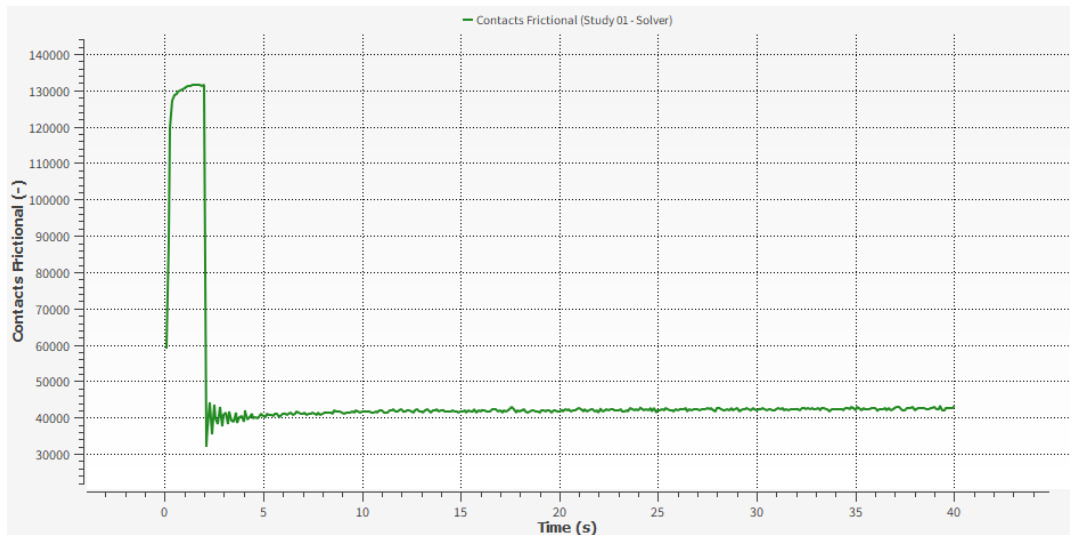


Рисунок 3.4 Графік "Contacts Frictional"

Графік "Contacts Frictional" демонструє зміну сили тертя між частинками у процесі імітаційного моделювання. Аналізуючи цей графік, можна виокремити наступне:

**Початковий різкий стрибок:**

- У перші секунди часу видно стрімке зростання сили тертя до максимального значення (~130,000). Це свідчить про процес початкового ущільнення або адаптації частинок у системі під впливом прикладених сил.
- Такі різкі зміни зазвичай спостерігаються на початкових етапах моделювання, коли система досягає рівноваги.

**Період стабілізації:**

- Після початкового піку сила тертя швидко знижується (~до 40,000) і переходить у стабільний режим.
- У стабільній зоні сила тертя залишається майже незмінною, що свідчить про досягнення динамічної рівноваги у системі. У цій фазі

взаємодія між частинками відбувається рівномірно, без значних флуктуацій.

### Коливання у стабільній фазі:

- Незначні коливання навколо середнього значення ( $\sim 40,000$ ) є природними для подібних систем і вказують на вплив локальних процесів, таких як взаємодія окремих частинок чи флуктуації середовища.

### Висновки:

- Графік показує, що система швидко досягає рівноваги після початкового перехідного процесу.
- Максимальне значення сили тертя ( $\sim 130,000$ ) і рівень стабілізації ( $\sim 40,000$ ) можна використовувати для оцінки характеристик взаємодії частинок.
- Такий аналіз дозволяє зробити висновки щодо ефективності процесу ущільнення частинок або їх поведінки в умовах динамічної взаємодії.

### Аналіз графіка "Neighbor Count vs. Time"

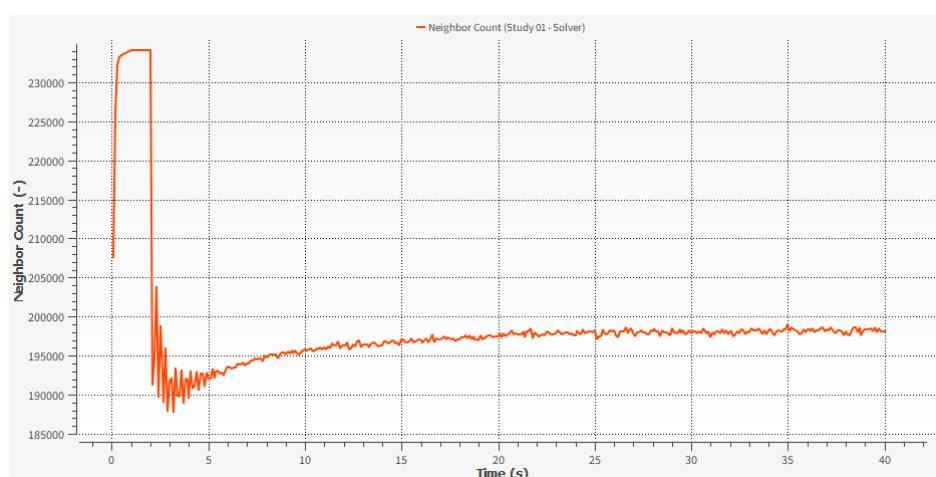


Рисунок 3.5 Графік "Neighbor Count"

Графік "Neighbor Count" відображає зміну кількості сусідніх частинок (взаємодій між ними) у системі протягом часу. Це важливий параметр, який дозволяє оцінити рівень щільності частинок та ефективність їхнього змішування або подрібнення в процесі моделювання.

### **Основні спостереження:**

#### **Початковий різкий спад кількості сусідніх частинок:**

- На початку моделювання (0–2 секунди) спостерігається різке падіння кількості взаємодій із ~230,000 до ~195,000.
- Це може свідчити про процес первинного налаштування системи: частинки рухаються, займаючи нові позиції, і утворюють стабільні взаємозв'язки.

#### **Коливання у перехідній зоні:**

- Після первинного падіння, протягом 2–5 секунд, видно коливання кількості сусідів у діапазоні ~190,000–200,000.
- Це є свідченням перехідної фази, під час якої система починає стабілізуватися, але ще не досягла повної рівноваги.

#### **Стабілізація:**

- Після 5 секунд модель демонструє стабільний рівень кількості сусідніх частинок (~195,000), із мінімальними флуктуаціями.
- Це означає, що система досягла сталого стану, коли розташування частинок і їхні взаємодії не змінюються суттєво.

### **Висновки:**

- Початковий перехідний період (0–5 секунд) є критичним для формування стабільної структури системи.

- Стабільна кількість сусідніх частинок (~195,000) вказує на досягнення рівноваги у системі, що є ознакою ефективної організації частинок.

### Інтерпретація з точки зору процесу:

- Зменшення кількості сусідів після початкового піку може свідчити про ущільнення або зміни у відносних положеннях частинок.
- Стабільна кількість сусідів на пізніх етапах означає, що процес моделювання має рівномірний розподіл частинок, і вони перебувають у стабільному стані взаємодії.

### Аналіз графіка "Average Absolute Rotational Velocity (Particles) vs. Time"

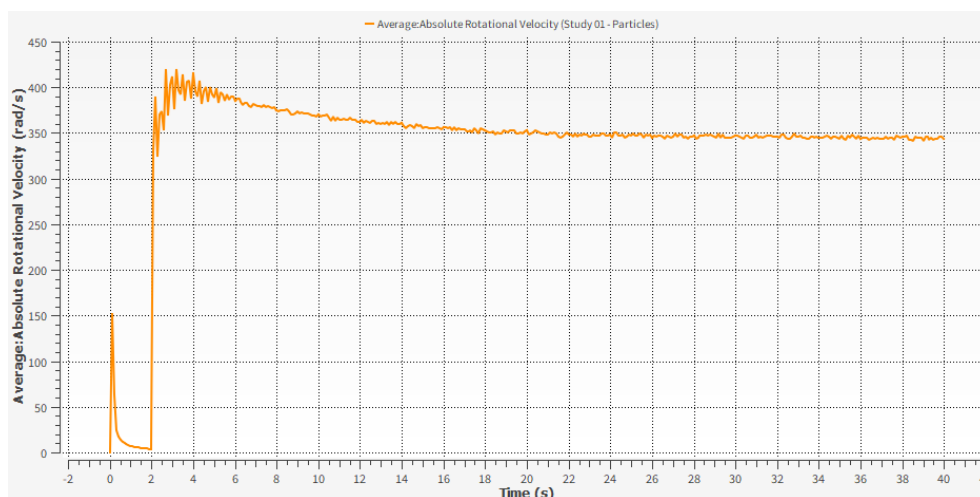


Рисунок 3.6 Графік Average Absolute Rotational Velocity

Графік демонструє середню абсолютну кутову швидкість обертання частинок у системі протягом часу. Цей параметр є важливим для оцінки динаміки частинок у процесі, наприклад, подрібнення, змішування або транспортування.

### Основні спостереження:

**Різкий стрибок на початку (0–2 секунди):**

- У перші дві секунди середня абсолютна швидкість різко зростає до максимуму (~450 рад/с).
- Це вказує на фазу початкового запуску системи, коли частинки під дією обертання робочого органу швидко починають рух.

#### **Спад швидкості (2–5 секунд):**

- Після початкового піку спостерігається значний спад середньої швидкості до ~350 рад/с.
- Ця фаза є наслідком стабілізації динаміки: частинки починають рівномірніше розподіляти енергію, і система переходить у сталий режим.

#### **Фаза стабілізації (після 5 секунд):**

- Після 5 секунд середня швидкість обертання поступово стабілізується на рівні ~340 рад/с.
- Це означає, що система досягла динамічної рівноваги, і подальші зміни у швидкості мінімальні.

#### **Флуктуації в сталому стані:**

- Незначні коливання швидкості у стабільній фазі можуть бути пов'язані з локальними взаємодіями між частинками або ефектами обертання робочих органів.

#### **Інтерпретація з точки зору процесу:**

- Початковий стрибок швидкості свідчить про активний початок руху частинок у робочій камері.
- Зменшення швидкості обертання після початкового піку може бути пов'язане із підвищенням опору між частинками та впливом робочого середовища.

- Стабілізація швидкості є бажаною ознакою, оскільки вона вказує на рівномірний розподіл кінетичної енергії та ефективну роботу системи.

### **Висновки:**

- Середня швидкість обертання частинок (~340 рад/с) у стабільному стані є показником ефективності роботи системи.
- Початковий стрибок швидкості (~450 рад/с) може бути оптимізований для запобігання зайвому зносу частинок або робочих органів.

### **Аналіз графіка "Sum Overlap (Contacts Study) vs. Time"**

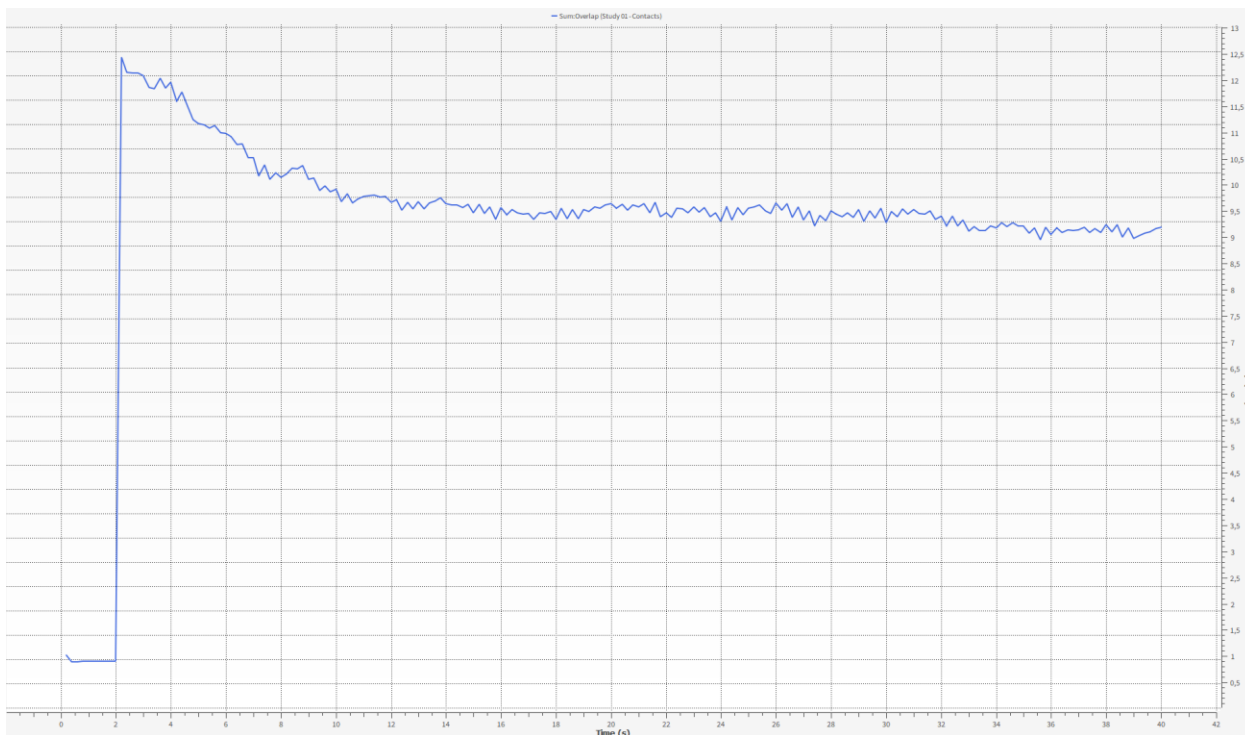


Рисунок 3.7 Графік Sum Overlap

Графік "Sum Overlap (Contacts Study)" відображає зміну сумарного перекриття контактів між частинками у системі в часі. Цей параметр є важливим індикатором ущільнення частинок і характеру їхньої взаємодії. Він допомагає оцінити стабільність системи та інтенсивність контактів між частинками під час процесу.

## **Основні спостереження:**

### **Початковий різкий стрибок (0–1 секунда):**

- У перші миті графік демонструє різке збільшення перекриття до максимального значення (~12 мм).
- Це свідчить про інтенсивну взаємодію частинок на початковому етапі, коли вони активно переміщуються й адаптуються до робочих умов.

### **Швидкий спад (1–2 секунди):**

- Після піку спостерігається швидке падіння значення сумарного перекриття до ~9 мм.
- Такий спад може бути зумовлений тим, що частинки займають більш стабільні положення, а надмірні контакти зникають унаслідок розподілу напружень у системі.

### **Стабілізація (після 2 секунд):**

- Після перехідної фази значення "Sum Overlap" стабілізується на рівні ~9 мм із незначними коливаннями.
- Це вказує на те, що система досягла динамічної рівноваги, і контакти між частинками стали постійними.

### **Коливання у стабільній фазі:**

- Незначні флуктуації значень у стабільній фазі (~8.5–9 мм) є природними для таких систем і відображають локальні взаємодії між частинками.

## **Інтерпретація:**

### **Початковий стрибок:**

- Активний початок руху частинок у системі, під час якого вони займають свої положення, призводить до формування максимального числа контактів із великим перекриттям.

#### **Стабільна фаза:**

- Стабілізація перекриття (~9 мм) вказує на те, що система досягла рівноваги, а процес взаємодії частинок відбувається на постійному рівні. Це є ознакою рівномірного ущільнення частинок у системі.

#### **Значення перекриття:**

- Перекриття на рівні 9 мм є показником міцності та інтенсивності контактів між частинками, які впливають на подрібнення та перемішування.

#### **Висновки:**

##### **Перехідна фаза (0–2 секунди):**

- Характеризується активним розподілом частинок і формуванням контактів. Це важливий етап, який визначає загальну стабільність системи.

##### **Стабільна фаза (після 2 секунд):**

- Система демонструє рівновагу з постійним рівнем перекриття, що є оптимальним для тривалого процесу подрібнення або змішування.

##### **Коливання в стабільній фазі:**

- Незначні зміни перекриття є природними й вказують на локальні зміни у взаємодії частинок.

Графік "Sum Overlap (Contacts Study) vs. Time" підтверджує, що система досягає стабільності через короткий проміжок часу після початкової адаптації, забезпечуючи рівномірну взаємодію частинок. Це важливий фактор для ефективної роботи млина чи змішувача.

### *Горизонтальний бісерний млин з пальцеподібним робочим органом*

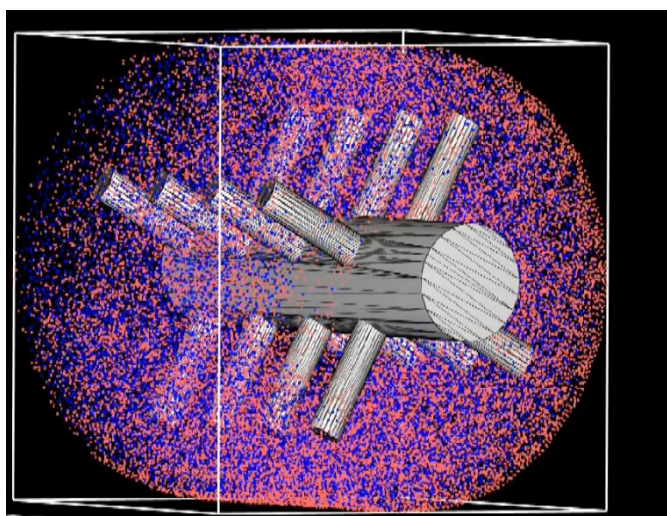


Рисунок 3.8 Моделювання у Rocky

Проведено імітаційне моделювання горизонтального пальцеподібним робочим органом.

Вихідні данні для моделювання:

Заповнення млину водою – 75 %

Швидість оберання валу – 200 рад/с

Матеріал бісеру – скло

Подрібнювальний матеріал – тальк

Розмір частинок бісеру – 2 мм

Розмір частино тальку – 1 мм

Сумарна кількість частинок – 70000

Результати моделювання у Ansys Fluent

## Аналіз результатів ANSYS Fluent — Розподіл тиску (Pressure Contour)

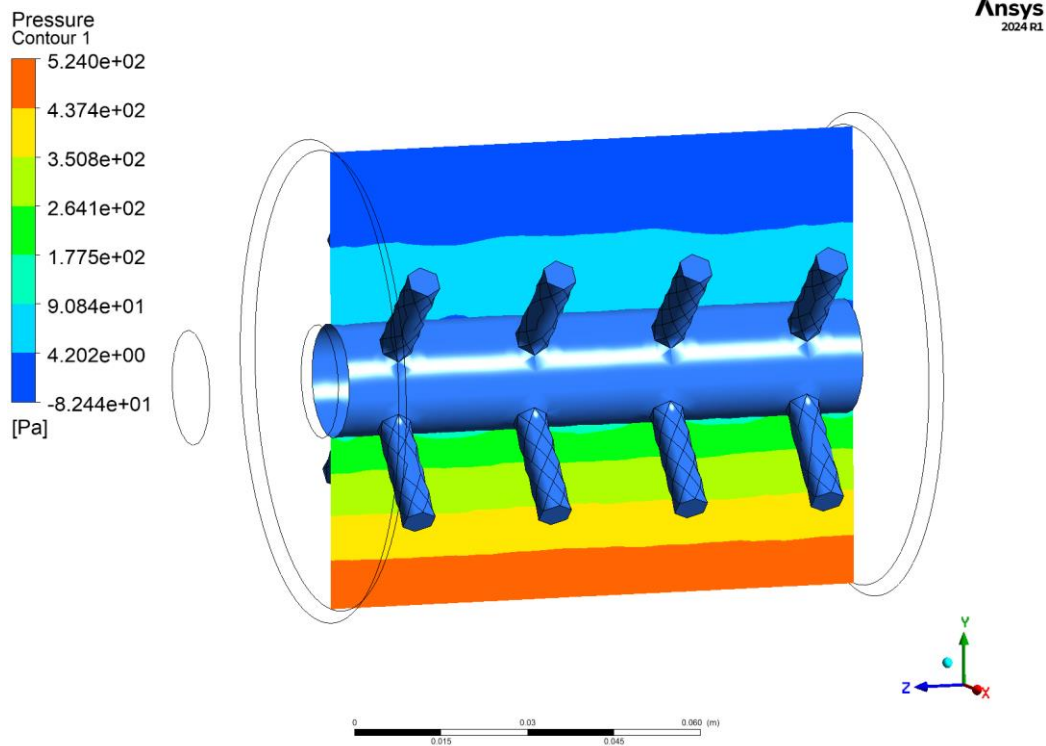


Рисунок 3.9 Контур тиску

### Опис графіка розподілу тиску

#### Загальний розподіл тиску:

- Контур показує тиск у робочій камері горизонтального бісерного млина, оснащеного пальцевими робочими елементами.
- Тиск варіюється від мінімальних значень (-82.44 Па) до максимальних (~524 Па), що вказує на різноманітну динаміку потоку навколо робочих елементів.

#### Зони підвищеного тиску:

- Області з червоними та оранжевими зонами (високий тиск) знаходяться перед пальцевими елементами та поблизу валу, що свідчить про вплив обертання на локальну динаміку потоку.

- Це підвищення може бути пов'язане з інтенсивною взаємодією рідини з обертальними робочими елементами.

#### **Зони зниженого тиску:**

- Сині та зелені області (низький тиск) спостерігаються позаду пальцевих елементів. Це свідчить про формування вихорів або зон низького тиску через відрив потоку.

#### **Інтерпретація динаміки**

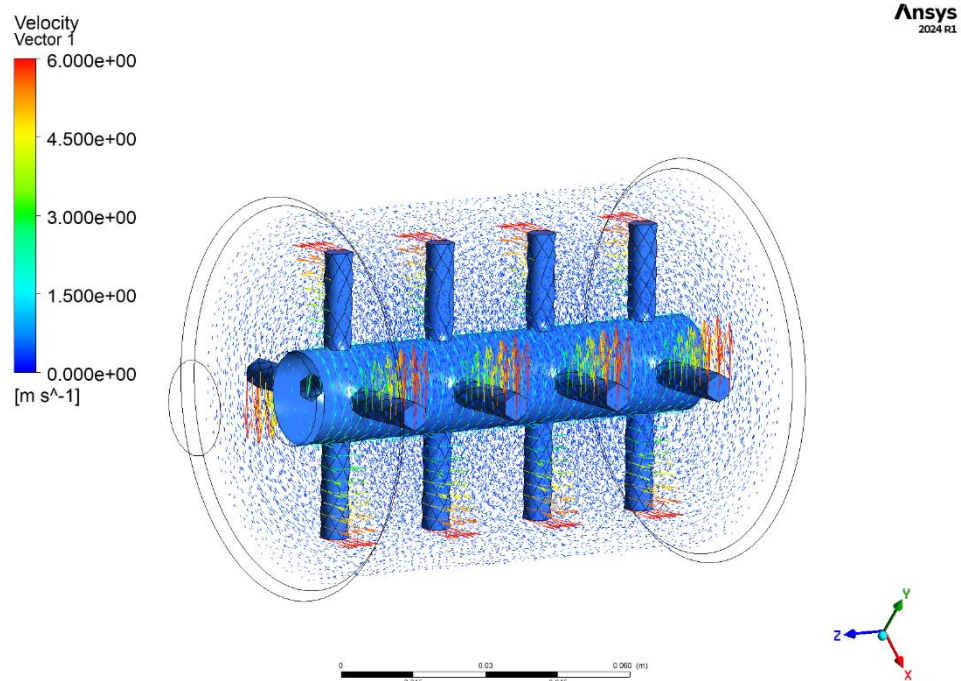
##### **Динамічний вплив на подрібнення:**

- Зони високого тиску сприяють інтенсивному перемішуванню та контактам частинок із бісером, що підвищує ефективність подрібнення.
- Зони низького тиску можуть спричиняти нерівномірність обробки матеріалу через утворення "мертвих зон".

##### **Вихори та турбулентність:**

- У зонах низького тиску позаду пальцевих елементів спостерігається утворення вихорів. Це може сприяти додатковому перемішуванню, але також викликає втрати енергії.

#### **Аналіз результатів ANSYS Fluent — Векторне поле швидкостей**



## Рисунок 3.10 вектори швидкості

### Опис векторів швидкості

#### Розподіл швидкості:

- Векторне поле швидкостей демонструє динаміку рідини всередині робочої камери горизонтального бісерного млина з пальцевими елементами.
- Швидкість рідини варіюється від 0 м/с до максимального значення ~6 м/с, що відповідає зонам високої турбулентності.

#### Зони високої швидкості:

- Найбільші швидкості спостерігаються в периферійних зонах пальцевих елементів та поблизу кінців валу. Це зони інтенсивного змішування та подрібнення матеріалу.
- Червоні вектори поблизу пальців вказують на максимальну активність потоку, спричинену обертанням валу.

#### Зони низької швидкості:

- Блакитні області із низькими значеннями швидкості розташовані в центральній зоні між пальцями та біля валу.
- Такі зони можуть слугувати місцями застою, де процес подрібнення менш інтенсивний.

**Аналіз результатів ANSYS Rocky — Neighbor Count (Кількість сусідів частинок) до часу**

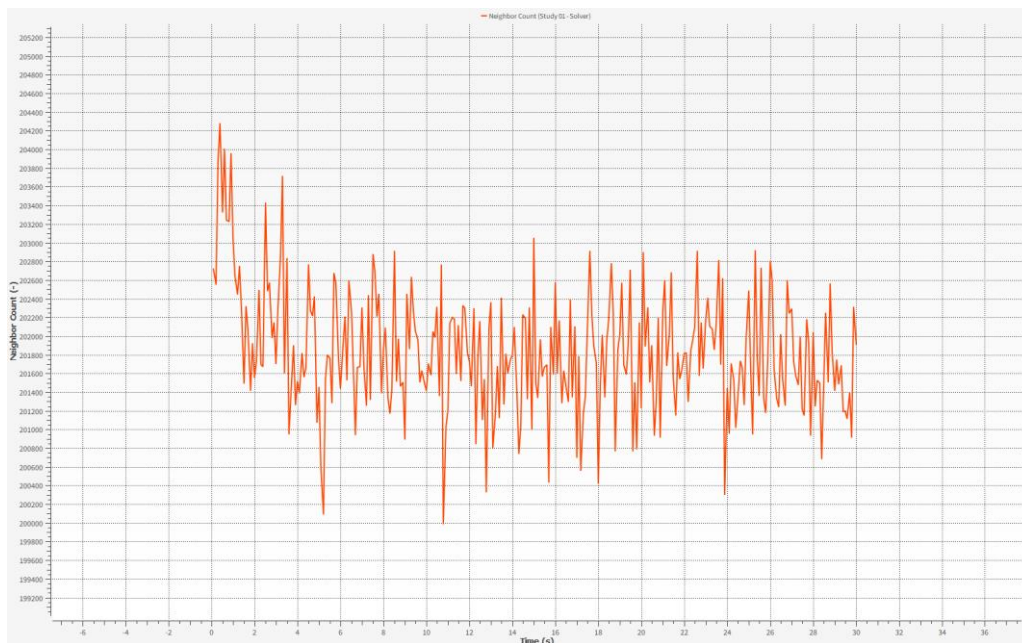


Рисунок 3.11 Графік Neighbor Count

### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік демонструє кількість сусідів (контактуючих частинок) у системі впродовж часу.
- Значення варіюються у межах від приблизно **199,000** до **205,000**, що вказує на щільне заповнення частинками робочої камери.

### **Динаміка на графіку:**

- У перші секунди симуляції спостерігається коливання кількості сусідів, що характерно для періоду стабілізації системи.
- Після 5–10 секунд коливання зменшуються, і система набуває стабільного стану з періодичними флуктуаціями.

### **Колівання кількості сусідів:**

- Після стабілізації (10 секунд) кількість сусідів зберігається на рівні близько **202,000–204,000**. Флуктуації залишаються в межах 1–2% від середнього значення.

### **Інтерпретація результатів**

#### **Стадія стабілізації (0–10 секунд):**

Значні коливання на початку симуляції вказують на початкове переміщення частинок і формування стабільної контактної взаємодії.

Цей етап є важливим для досягнення рівномірного розподілу частинок у робочій камері.

#### **Стабільна стадія (після 10 секунд):**

- Після початкового періоду кількість сусідів стабілізується, що свідчить про досягнення рівноважного стану в системі.
- Періодичні флуктуації можуть бути спричинені локальними змінами динаміки частинок через рух робочих елементів або турбулентність потоку.

#### **Щільність контакту частинок:**

- Висока кількість сусідів (понад 200,000) свідчить про щільне заповнення робочої камери, що є необхідною умовою для ефективного подрібнення.
- Важливо забезпечити рівномірність цього параметра для уникнення "мертвих зон" у системі.

## Висновки

### Ефективність процесу:

- Стабільна кількість сусідів після 10 секунд свідчить про ефективну роботу системи, яка забезпечує рівномірний розподіл частинок і їхнє перемішування.
- Висока щільність контактів сприяє ефективному подрібненню, однак для оптимізації процесу слід оцінити енергетичні витрати.

### Загальний висновок

Графік "Neighbor Count to Time" показує динаміку формування стабільного стану в системі подрібнення. Стабільний період із рівномірною кількістю сусідів свідчить про ефективну роботу системи. Оптимізація параметрів запуску та конструкції робочих елементів може додатково покращити ефективність подрібнення.

### Аналіз результатів ANSYS Rocky — Contacts Frictional (Кількість фрикційних контактів) до часу

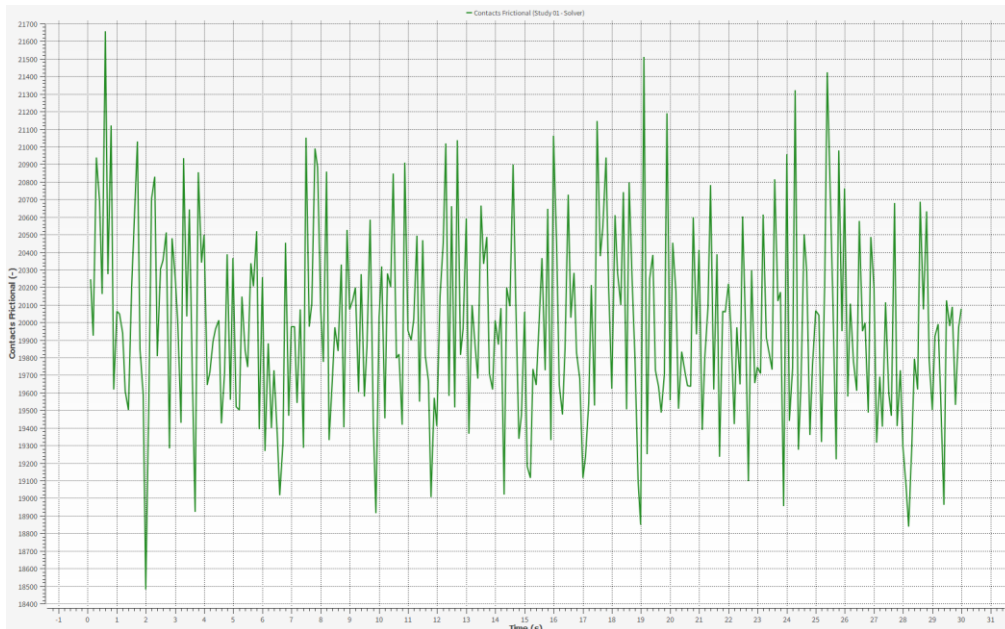


Рисунок 3.12 Графік Contacts Frictional

### Опис графіка

### Загальний тренд:

- Графік показує динаміку кількості фрикційних контактів між частинками та/або частинками і робочими елементами системи протягом симуляції.
- Значення кількості контактів коливається в діапазоні від **18,400** до **21,700**.

#### **Коливання на графіку:**

- Графік демонструє значні флуктуації у кількості контактів, що свідчить про зміну взаємодії між частинками під впливом механічного руху в системі.
- Незважаючи на коливання, спостерігається загальна стабільність рівня контактів після 5 секунд симуляції.

#### **Інтерпретація результатів**

##### **Початковий період (0–5 секунд):**

- У перші секунди симуляції спостерігається висока амплітуда коливань, що є типовим для стадії стабілізації системи.
- Різке зростання і падіння контактів пояснюється адаптацією частинок до механічного руху робочих елементів млина.

##### **Стадія стабільності (після 5 секунд):**

- Після початкового періоду коливання зменшуються, і кількість контактів утримується у відносно стабільному діапазоні (**19,000–21,000**).
- Цей період вказує на досягнення рівноважного стану системи, коли контакти між частинками стають більш рівномірними.

#### **Фрикційна взаємодія:**

- Висока кількість контактів свідчить про інтенсивну фрикційну взаємодію частинок, що є важливим для ефективного подрібнення.

- Коливання контакту можуть бути пов'язані з локальними змінними умовами у робочій камері, такими як турбулентність потоку або нерівномірність руху частинок.

## Висновки

Графік "Contacts Frictional to Time" показує динамічну зміну кількості фрикційних контактів у системі. Висока кількість контактів після стабілізації свідчить про ефективний процес подрібнення. Оптимізація робочих параметрів і конструкції млина може покращити рівномірність контактів і зменшити втрати енергії.

## Аналіз результатів ANSYS Rocky — Average Absolute Rotational Velocity (Середня абсолютна кутова швидкість) до часу

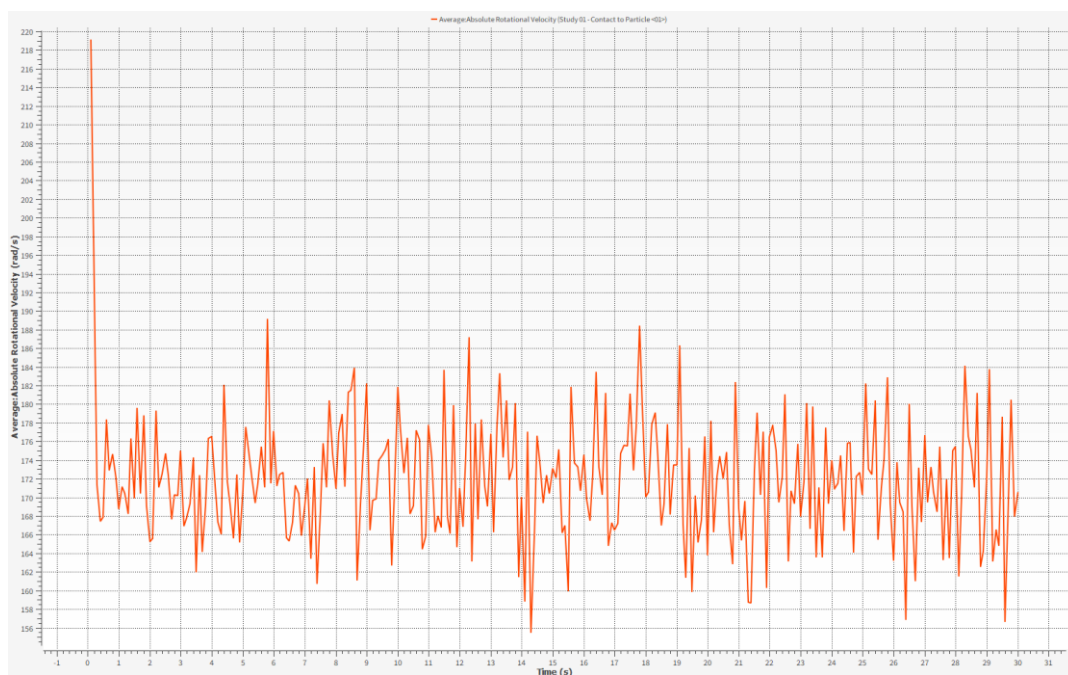


Рисунок 3.13 Графік Average Absolute Rotational Velocity

## Опис графіка

### Загальний тренд:

- Графік відображає середню абсолютну кутову швидкість частинок у системі протягом симуляції.
- Значення варіюються у межах від приблизно **156 рад/с** до **218 рад/с**, з коливаннями упродовж усього часу.

### Динаміка кутової швидкості:

- У перші 1–2 секунди спостерігається різке збільшення швидкості, що відповідає етапу запуску системи.
- Після початкового періоду система демонструє коливання у стабільному діапазоні (~160–190 рад/с).

## Інтерпретація результатів

### Початковий період (0–2 секунди):

- Різке зростання середньої кутової швидкості частинок вказує на вплив обертальних сил від робочих елементів млина.
- Коливання у цей період можуть бути пов'язані з нерівномірним розподілом частинок у початковому стані.

### Стадія стабілізації (після 2 секунд):

- Система досягає стабільності після початкового періоду, демонструючи середнє значення швидкості близько **170–180 рад/с** з періодичними флуктуаціями.
- Коливання швидкості вказують на локальні зміни динаміки частинок через взаємодію між собою та з робочими елементами.

### Ефективність подрібнення:

- Високі значення кутової швидкості свідчать про інтенсивну динаміку частинок, що сприяє ефективному подрібненню.

- Невеликі коливання свідчать про стабільну роботу системи без значних збоїв.

## Висновки

Графік "Average Absolute Rotational Velocity to Time" демонструє стабільність системи після початкового періоду. Висока середня швидкість частинок свідчить про ефективний процес подрібнення. Оптимізація параметрів запуску та конструкції робочих елементів може додатково покращити рівномірність процесу і зменшити енергетичні втрати.

## Аналіз результатів ANSYS Rocky — Sum Overlap (Сума перекриття) до часу

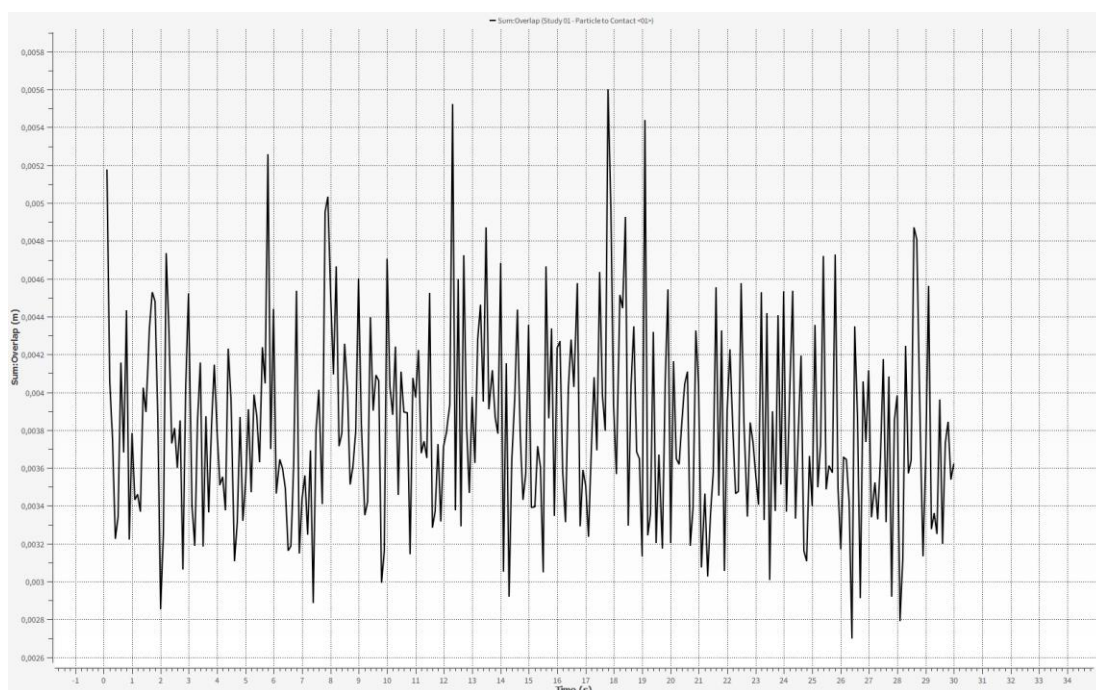


Рисунок 3.14 Графік Sum Overlap

## Опис графіка

### Загальна характеристика:

- Графік демонструє зміну суми перекриття (overlap) між частинками або частинками і робочими елементами у системі протягом симуляції.
- Значення перекриття варіюються у межах від приблизно 0.0026 м до 0.0058 м.

### **Коливання значень:**

- Графік має виражені коливання на всьому інтервалі симуляції, що свідчить про зміну контактної взаємодії між частинками.
- Найвищі значення спостерігаються у періодах після 10 секунд, коли система досягає стабільності.

### **Інтерпретація результатів**

#### **Стадія запуску (0–5 секунд):**

- У початковий період спостерігаються значні зміни значень суми перекриття. Це вказує на початкове налаштування контактів між частинками під впливом зовнішніх сил.
- Амплітуда коливань може бути пов'язана з перерозподілом частинок у робочій камері.

#### **Стадія стабілізації (після 5 секунд):**

- Після початкового періоду система досягає стабільного режиму, де значення перекриття коливаються у більш вузькому діапазоні.
- Коливання значень у стабільний період свідчать про локальні зміни щільності контактів між частинками.

#### **Взаємодія частинок:**

- Високі значення перекриття вказує на щільний контакт між частинками, що є важливим для забезпечення ефективного подрібнення.
- Низькі значення перекриття можуть свідчити про зони, де контакт частинок є недостатнім.

## **Висновки**

### **Ефективність процесу:**

- Сума перекриття свідчить про стабільну контактну взаємодію між частинками після початкового періоду.
- Високі значення перекриття сприяють інтенсивному подрібненню, але також можуть викликати додаткове навантаження на систему.

### **Потенціал покращення:**

- Оптимізація розташування частинок і конструкції робочих елементів може зменшити втрати енергії та забезпечити рівномірність подрібнення.

### **Загальний висновок**

Графік "Sum Overlap to Time" демонструє, що система досягає стабільності після початкового періоду. Значення перекриття частинок вказують на ефективну взаємодію у системі.

### ***Вертикальний бісерний млин з дисками***

Проведено імітаційне моделювання вертикального бісерного млину з дисками.

Вихідні данні для моделювання:

Заповнення млину водою – 75 %

Швидість обертання валу – 200 рад/с

Матеріал бісеру – скло

Подрібнювальний матеріал – тальк

Розмір частинок бісеру – 2 мм

Розмір частино тальку – 1 мм

Сумарна кількість частинок – 70000

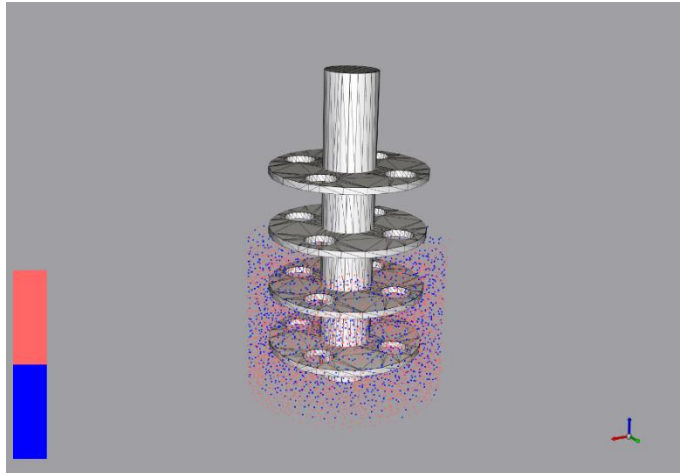


Рисунок 3.15 Моделювання в Rocky

### Результати моделювання у Ansys Fluent

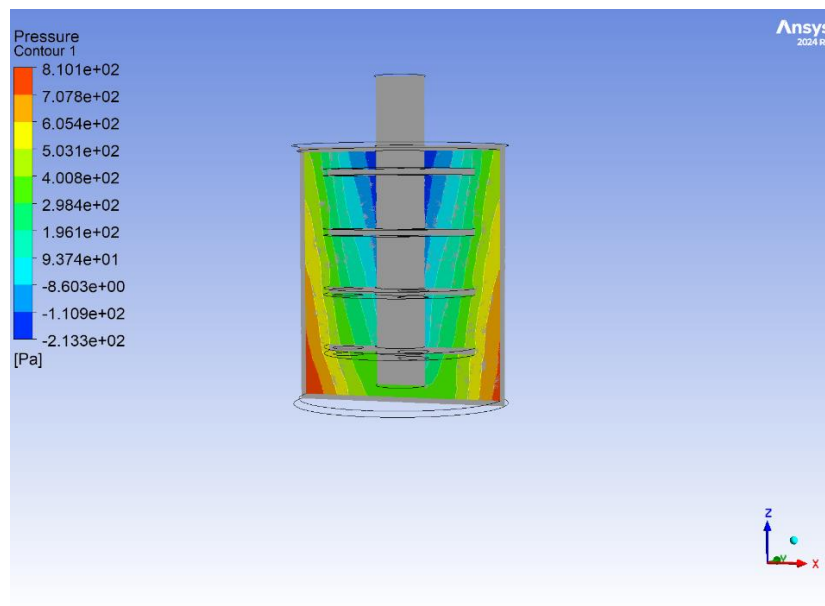


Рисунок 3.16 Контур тиску

На зображенні представлено розподіл тиску в робочій камері бісерного млина. Основні висновки:

#### **Зони максимального тиску:**

- Червоні області відповідають зонам високого тиску, які, ймовірно, розташовані поблизу стінок робочої камери та лопатей. Це свідчить про інтенсивний вплив обертальних елементів на рідину.
- Найвищий тиск ( $\sim 810$  Па) зосереджений біля рухомих елементів, що забезпечує ефективну передачу енергії до частинок бісеру.

### **Зони низького тиску:**

- Сині області представляють зони низького тиску, які утворюються ближче до центру робочої камери. Це може бути результатом відсутності прямого впливу рухомих елементів у цих ділянках.

### **Розподіл тиску вздовж висоти камери:**

- Рівномірний градієнт тиску свідчить про стабільний режим роботи млина. Такий розподіл забезпечує ефективне змішування матеріалів і бісеру.

### **Висновки**

**Ефективність подрібнення:** Високий тиск у зоні контакту між рухомими елементами та робочим середовищем сприяє інтенсивному подрібненню. Проте варто звернути увагу на "мертві зони" з низьким тиском, які можуть знижувати ефективність процесу.

### **Оптимізація конструкції:**

Для підвищення ефективності роботи млина можна розглянути модифікацію лопатей або зміну їхнього розташування для забезпечення рівномірнішого розподілу тиску.

Зони низького тиску можуть бути усунені шляхом підвищення обертальної швидкості або введення додаткових турбулізуючих елементів.

### **Рівномірність подрібнення:**

Рівномірний розподіл тиску вздовж висоти камери свідчить про те, що млин добре адаптований для обробки матеріалів різної в'язкості, проте слід враховувати залежність ефективності подрібнення від діаметра бісеру та в'язкості рідини.

### **Контур швидкості у робочій камері**

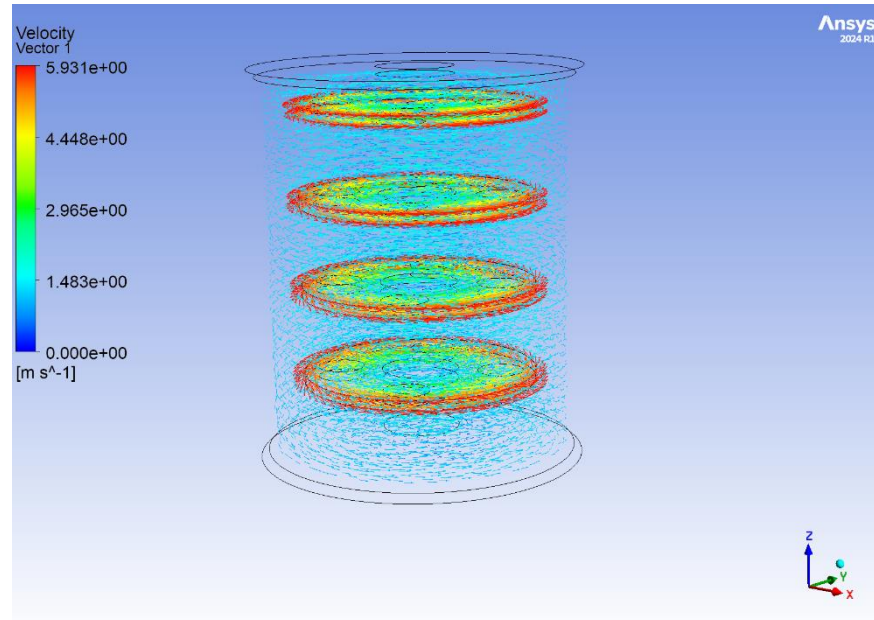


Рисунок 3.17 вектори швидкостей

На зображенні показано розподіл швидкостей у робочій камері бісерного млина. Основні спостереження:

#### **Зони максимальної швидкості**

- **Червоні області** свідчать про максимальну швидкість (до  $\sim 5.93$  м/с), яка спостерігається поблизу країв обертових лопатей. Це зони, де найбільша кількість енергії передається рідинному середовищу.
- Ці зони відповідають місцям інтенсивного турбулентного руху, що забезпечує ефективне перемішування та подрібнення матеріалів.

#### **Зони мінімальної швидкості**

- **Сині області** вказують на низьку швидкість (0 м/с). Ці зони розташовані поблизу центру робочої камери та у міжлопатевих просторах.
- Подібні області можуть створювати "мертві зони", які знижують ефективність подрібнення та однорідність процесу.

#### **Рівномірність розподілу швидкості**

- Швидкість змінюється циклічно вздовж висоти робочої камери, утворюючи кільцеві області із високими та низькими швидкостями.
- Рівномірність розподілу вказує на збалансовану роботу обертальних елементів, проте наявність зон низької швидкості може потребувати оптимізації.

### Динаміка рідинного потоку

- Вектори швидкості свідчать про інтенсивну циркуляцію рідини, що забезпечує ефективну передачу енергії до бісеру.

### Аналіз результатів ANSYS Rocky — Contacts Frictional (Кількість фрикційних контактів) до часу

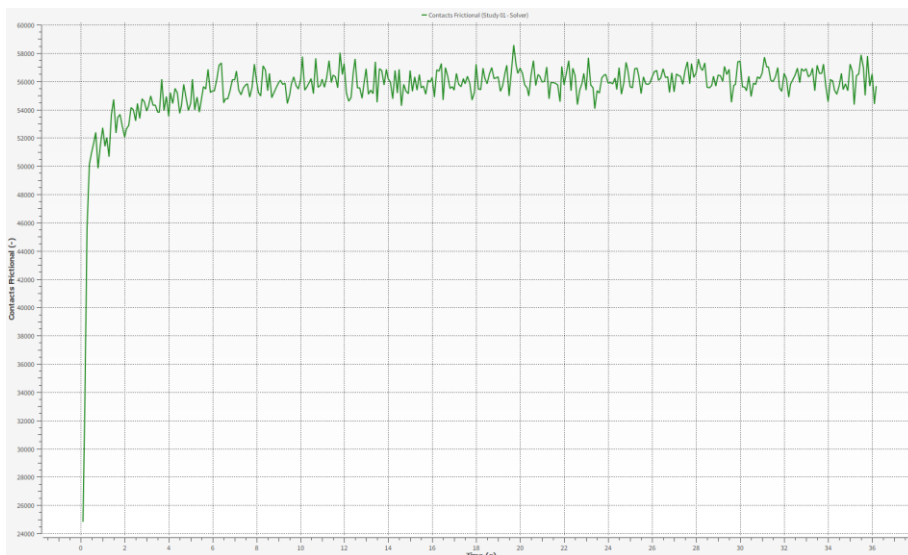


Рисунок 3.18 Графік Contacts Frictional

#### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік відображає динаміку кількості фрикційних контактів у системі протягом усього симуляційного періоду.
- Значення кількості контактів швидко зростає в початковій фазі (0–4 секунди) і стабілізується в діапазоні **56,000–58,000**.

#### Поведінка графіка:

- На початковій стадії спостерігається швидке зростання кількості контактів через активну адаптацію частинок до механічного руху в системі.

- Після стабілізації (4–6 секунд) кількість контактів утримується на стабільному рівні з невеликими коливаннями.

### **Інтерпретація результатів**

#### **Початковий період (0–4 секунди):**

- Різке зростання кількості контактів пояснюється активною фазою реорганізації частинок під дією механічних сил у робочій камері.

- Система швидко досягає рівноваги, що є типовим для симуляційних процесів у бісерних млинах.

#### **Стадія стабільності (після 4 секунд):**

- Коливання графіка після 4 секунд демонструють природні динамічні взаємодії між частинками.

- Стабільний рівень контактів свідчить про оптимальні умови роботи млина, за яких забезпечується рівномірний розподіл механічних впливів.

#### **Рівень фрикційних контактів:**

- Висока кількість контактів вказує на ефективне використання об'єму робочої камери.

- Незначні коливання можуть бути спричинені локальними турбулентностями або варіаціями у русі частинок.

### **Висновки**

Графік "Contacts Frictional to Time" демонструє стабільну динаміку фрикційних взаємодій у системі після початкової фази адаптації. Висока кількість контактів свідчить про ефективність роботи млина, а незначні коливання після стабілізації підтверджують рівномірний розподіл механічного впливу.

## Аналіз результатів ANSYS Rocky — Neighbor Count (Кількість сусідів) до часу

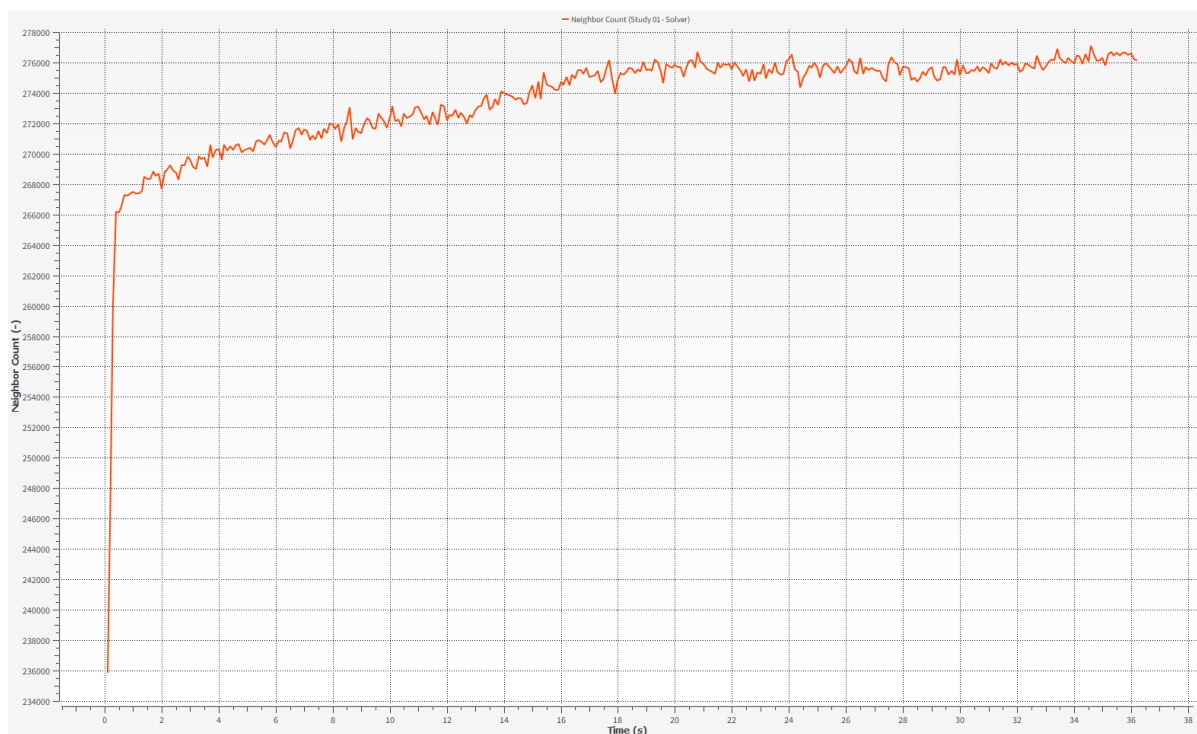


Рисунок 3.19 Графік Neighbor Count

### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік показує кількість сусідів (частинок, які взаємодіють одна з одною) протягом симуляції.
- Значення кількості сусідів зростає від 23,400 до 27,400 протягом перших секунд, після чого стабілізується у діапазоні **27,200–27,400**.

#### Поведінка графіка:

- На початковій стадії (0–5 секунд) спостерігається різке зростання кількості сусідів, що свідчить про активізацію взаємодій між частинками у робочій камері.
- Після 5 секунд графік демонструє стабільність з незначними коливаннями.

## **Інтерпретація результатів**

### **Початковий період (0–5 секунд):**

- Різке зростання кількості сусідів пояснюється процесом реорганізації частинок, спричиненим механічними силами та рухом робочих елементів.
- Цей період є фазою адаптації системи до умов симуляції.

### **Стадія стабільності (після 5 секунд):**

- Після початкового періоду кількість сусідів утримується на стабільному рівні, що вказує на досягнення рівноважного стану системи.
- Незначні коливання є природними для динамічних систем і можуть бути зумовлені локальними змінами у русі частинок.

### **Кількість сусідів:**

- Висока кількість сусідів свідчить про щільну взаємодію частинок, що є показником ефективного використання об'єму робочої камери.

## **Висновки**

Графік "Neighbor Count to Time" демонструє стабільну динаміку взаємодій між частинками після початкової фази адаптації. Висока та стабільна кількість сусідів є показником ефективного використання об'єму робочої камери

**Аналіз результатів ANSYS Rocky — Average Absolute Rotational Velocity (Середня абсолютна кутова швидкість частинок) до часу**

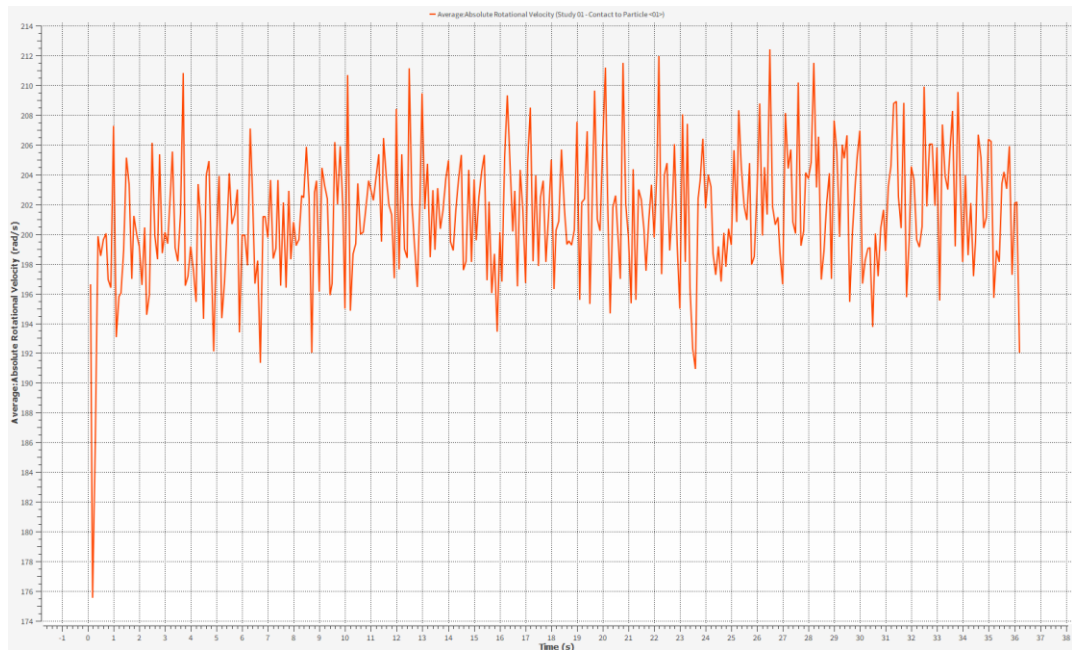


Рисунок 3.20 Графік Average Absolute Rotational Velocity

### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік відображає середню абсолютну кутову швидкість частинок протягом симуляції.
- Значення кутової швидкості коливається в межах від **174 rad/s** до **214 rad/s**.

#### Коливання на графіку:

- Середня кутова швидкість демонструє значну флуктуацію, що свідчить про змінний характер взаємодії частинок у системі.
- Після перших секунд симуляції спостерігається стабільність середнього рівня швидкості з періодичними коливаннями.

### Інтерпретація результатів

#### Початковий період (0–5 секунд):

- Під час початкової стадії симуляції середня кутова швидкість швидко зростає, що пояснюється початковою адаптацією частинок до механічного руху робочих елементів.

- Низькі значення на початку можуть бути пов'язані зі статичним станом частинок перед запуском динамічної взаємодії.

#### **Стадія стабільності (після 5 секунд):**

- Після початкового періоду середня кутова швидкість утримується у відносно стабільному діапазоні (**190–210 rad/s**), з незначними локальними флуктуаціями.

- Коливання швидкості обумовлені нерівномірністю розподілу частинок та локальними змінами у взаємодії.

#### **Розподіл енергії:**

- Значення середньої кутової швидкості свідчить про ефективну передачу енергії від робочих органів до частинок.

- Наявність періодичних коливань може вказувати на турбулентні зони у робочій камері, які впливають на рух частинок.

#### **Висновки**

Графік "Average Absolute Rotational Velocity to Time" демонструє стабільний характер передачі енергії частинкам у системі після початкової адаптації. Значення середньої кутової швидкості вказує на ефективну динамічну взаємодію частинок.

**Аналіз результатів ANSYS Rocky — Sum Overlap (Сума перекриття частинок) до часу**

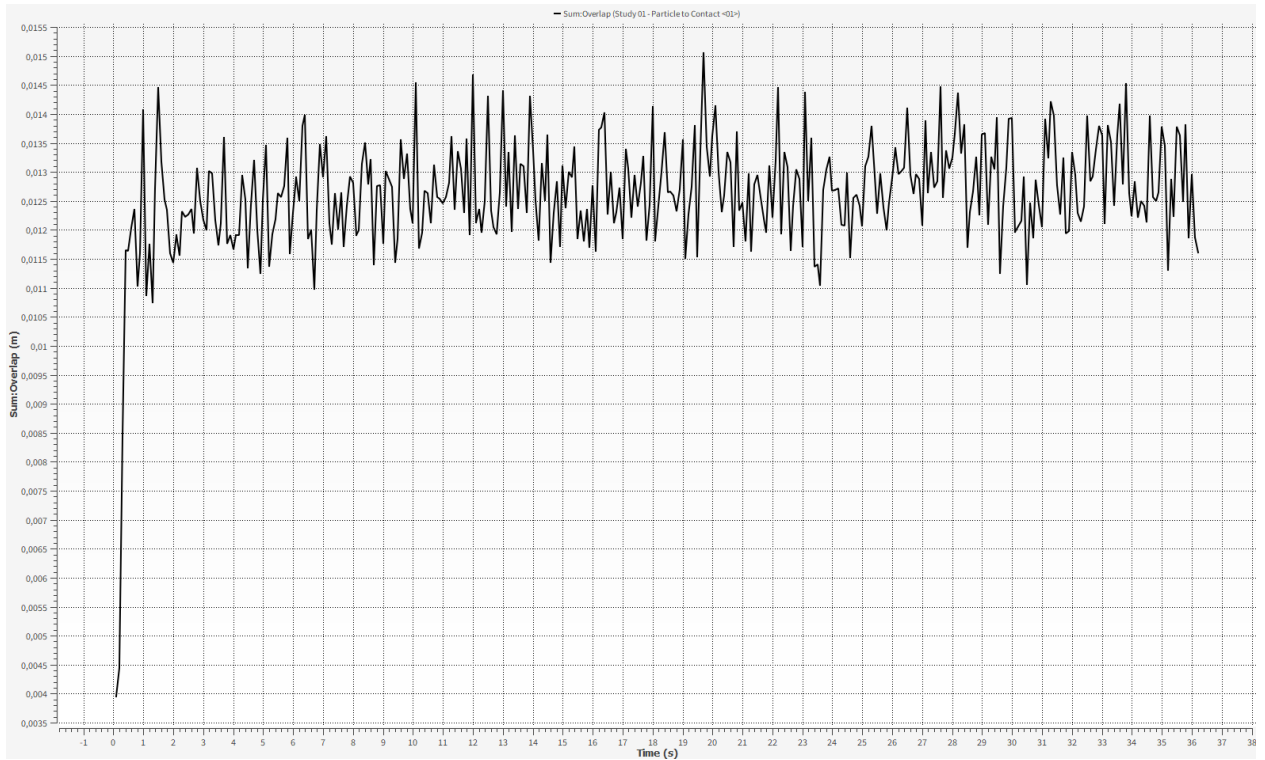


Рисунок 3.21 Графік Sum Overlap

### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік відображає зміну суми перекриття частинок у системі під час симуляції.

- Значення сумарного перекриття коливається в межах від **0,0035** м до **0,015** м.

#### Коливання на графіку:

- У перші секунди спостерігається різкий ріст сумарного перекриття, що є наслідком адаптації системи до початкового стану.

- Після фази стабілізації (приблизно з 4 секунди) значення перекриття стабілізується, хоча й залишається схильним до незначних коливань.

### Інтерпретація результатів

#### Початковий період (0–4 секунди):

- Значення перекриття зростає через збільшення взаємодії між частинками при запуску механічного руху робочих елементів.

- Цей період характеризується нестабільністю та хаотичністю розподілу частинок.

#### **Стадія стабільності (після 4 секунди):**

- Сума перекриття стабілізується, що вказує на досягнення рівноважного стану в системі.

- Незначні коливання на стабільній стадії є наслідком турбулентності або локальних змін щільності частинок.

#### **Значення перекриття:**

- Високе значення перекриття може свідчити про щільну взаємодію частинок, що важливо для ефективності подрібнення.

- Локальні піки і падіння перекриття можуть бути пов'язані із зміною швидкості або напрямку руху частинок у робочій камері.

#### **Висновки**

Графік "Sum Overlap to Time" демонструє динамічну зміну перекриття частинок у системі. Стабілізація після початкової нестабільності вказує на досягнення рівноважного стану. Покращення робочих умов та конструктивних параметрів може сприяти більш рівномірному розподілу частинок та підвищенню ефективності процесу.

#### ***Вертикальний бісерний млин з пальцеподібним робочим органом***

Проведено імітаційне моделювання вертикального пальцеподібним робочим органом.

Вихідні данні для моделювання:

Заповнення млину водою – 75 %

Швидість обертання валу – 200 рад/с

Матеріал бісеру – скло

Подрібнювальний матеріал – тальк

Розмір частинок бісеру – 2 мм

Розмір частино тальку – 1 мм

Сумарна кількість частинок – 70000

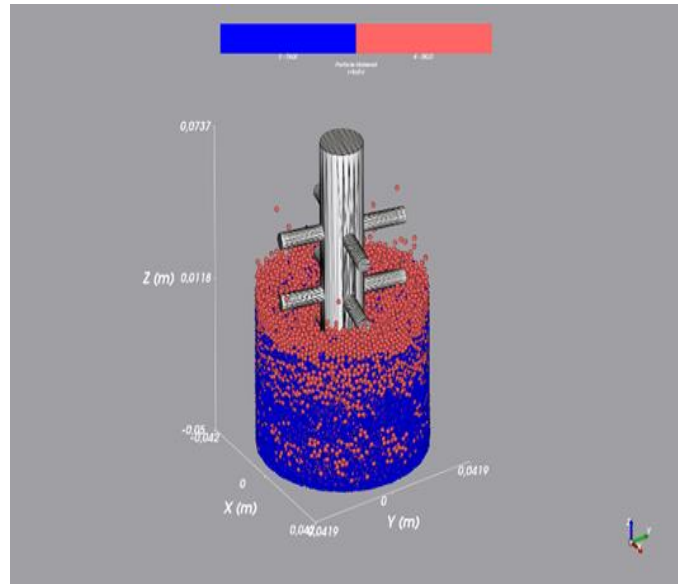


Рисунок 3.22 Моделювання у Rocky

# ANSYS Fluent: Контур тиску в робочій камері з пальцевими елементами

## Огляд розподілу тиску

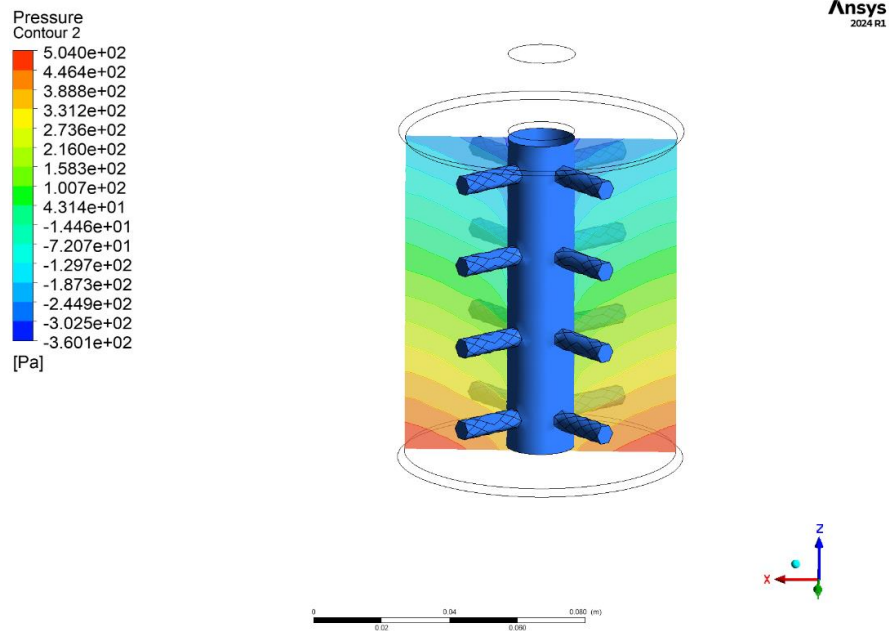


Рисунок 3.23 Контур тиску

Зображення демонструє розподіл тиску в робочій камері бісерного млина з пальцевими елементами.

Основні спостереження:

### Зони максимального тиску

- **Червоні області** позначають зони високого тиску (до  $\sim 504$  Па). Вони розташовані поблизу пальцевих елементів, де виникає активна взаємодія між рідиною і рухомими частинами.
- Високий тиск свідчить про інтенсивну передачу енергії до робочого середовища, що сприяє ефективному подрібненню частинок.

### Зони мінімального тиску

- **Сині області** показують низький тиск ( $\sim -360$  Па). Ці зони утворюються у віддалених від обертальних елементів частинах камери, де спостерігається зменшення динаміки потоку.

- Наявність таких зон може створювати "мертві зони", де ефективність подрібнення знижується.

### Рівномірність розподілу тиску

- Рівномірний градієнт тиску спостерігається вздовж висоти камери, що є наслідком правильної конструкції пальцевих елементів.
- Відсутність різких перепадів тиску вказує на стабільну роботу млина.

### Динаміка взаємодії

- Високий тиск поблизу пальців забезпечує турбулентний рух, який сприяє перемішуванню і подрібненню частинок.
- Пальцеві елементи формують локальні зони високого градієнта тиску, що оптимізує процес.

### Аналіз даних із ANSYS Fluent: Вектори швидкості у робочій камері з пальцевими елементами

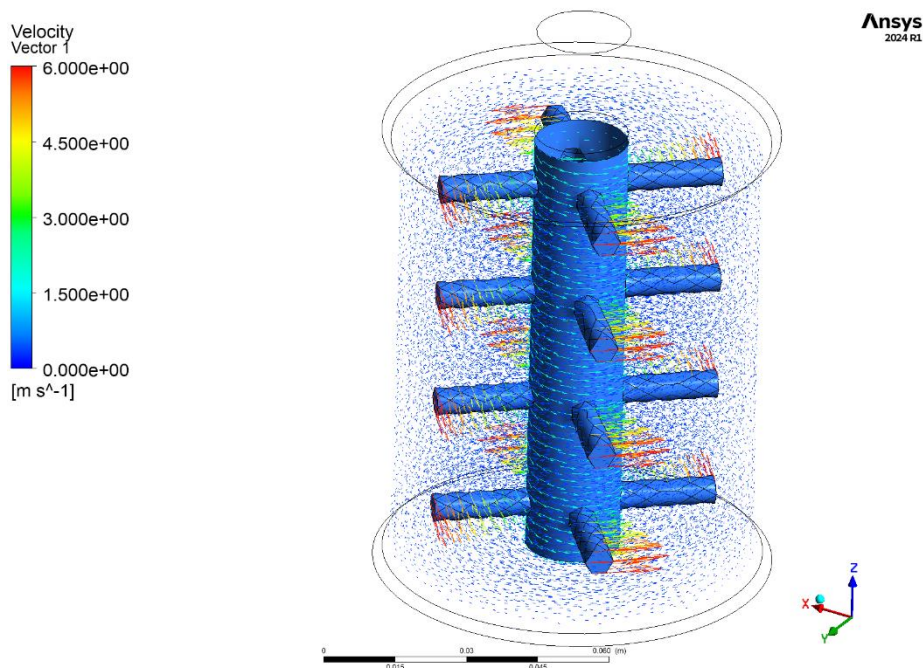


Рисунок 3.24 Вектори швидкостей

## Огляд розподілу швидкостей

На зображенні зображено вектори швидкостей у робочій камері бісерного млина з пальцевими елементами. Основні спостереження:

### Зони високої швидкості

- **Червоні області** вказують на максимальну швидкість (~6 м/с). Ці зони розташовані поблизу пальців, які забезпечують активний вплив на рідинний потік.
- Висока швидкість у цих зонах сприяє ефективному перемішуванню та забезпечує інтенсивний контакт частинок матеріалу з бісером.

### Зони низької швидкості

- **Сині області** представляють зони низької швидкості (до ~0 м/с). Вони розташовані ближче до центру камери та поблизу міжлопатевих просторів.
- Ці зони можуть створювати "мертві зони", де процес подрібнення є менш ефективним.

### Динаміка потоків

- Потоки рідини мають спрямовану циклічну структуру, зумовлену впливом пальців, що формують чіткі турбулентні зони.
- Вектори вказують на активну циркуляцію рідини в робочій камері, що покращує змішування і подрібнення частинок.

### Рівномірність розподілу швидкості

- Розподіл швидкостей має зональний характер: поблизу пальців спостерігаються значні градієнти, тоді як у центральній частині камери швидкість знижується.
- Конструкція пальцевих елементів забезпечує ефективне перемішування на зовнішньому радіусі камери, але може потребувати оптимізації для усунення "мертвих зон".

## Аналіз результатів ANSYS Rocky — Contacts Frictional (Кількість фрикційних контактів) до часу

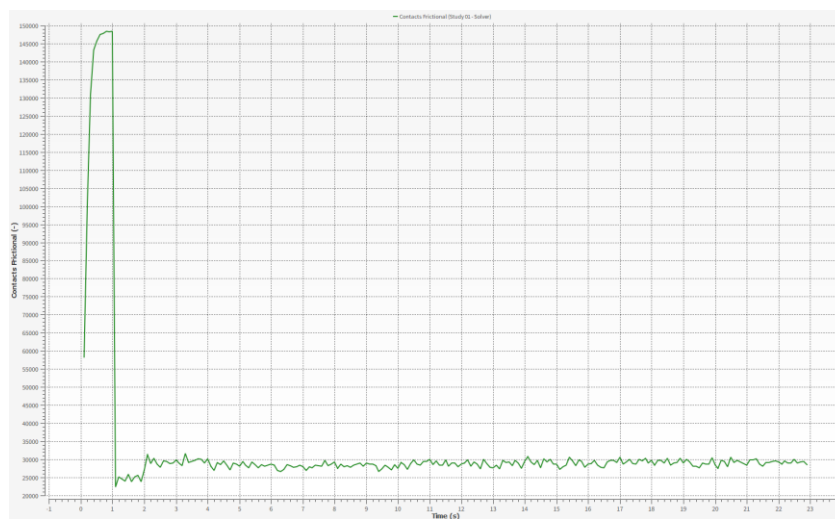


Рисунок 3.25 Графік Contacts Frictional

### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік демонструє зміну кількості фрикційних контактів між частинками та/або між частинками і робочими елементами в системі.
- Початкове різке зростання кількості контактів (до пікової точки, близько **145,000** контактів) на початку симуляції змінюється швидким спадом і стабілізацією на рівні близько **30,000** контактів.

#### Коливання на графіку:

- Після різкого спаду в перші 2 секунди система досягає стабільного стану з незначними коливаннями навколо середнього значення в діапазоні **30,000–35,000** контактів.

### Інтерпретація результатів

#### Початковий період (0–1 секунда):

- Значення кількості контактів стрімко зростає через інтенсивну взаємодію частинок на старті симуляції.
- Пікове значення контактів вказує на початкове щільне упакування частинок та їх активну фрикційну взаємодію.

### Перехідний період (1–2 секунди):

- Після пікової точки відбувається різкий спад кількості контактів, що може бути пов'язано зі зміною динаміки руху частинок у системі, наприклад, через формування рівноважного стану.

### Стадія стабільності (після 2 секунд):

- Система стабілізується з рівномірним розподілом контактів і незначними коливаннями в межах **30,000–35,000** контактів.
- Ця фаза свідчить про сталу роботу системи, що важливо для підтримання стабільного процесу подрібнення.

### Висновки

Графік "Contacts Frictional to Time" показує динаміку зміни кількості фрикційних контактів у системі. Після початкової нестабільності система демонструє стабільний стан з постійною кількістю контактів.

**Аналіз результатів ANSYS Rocky — Neighbor Count (Кількість сусідніх контактів) до часу**

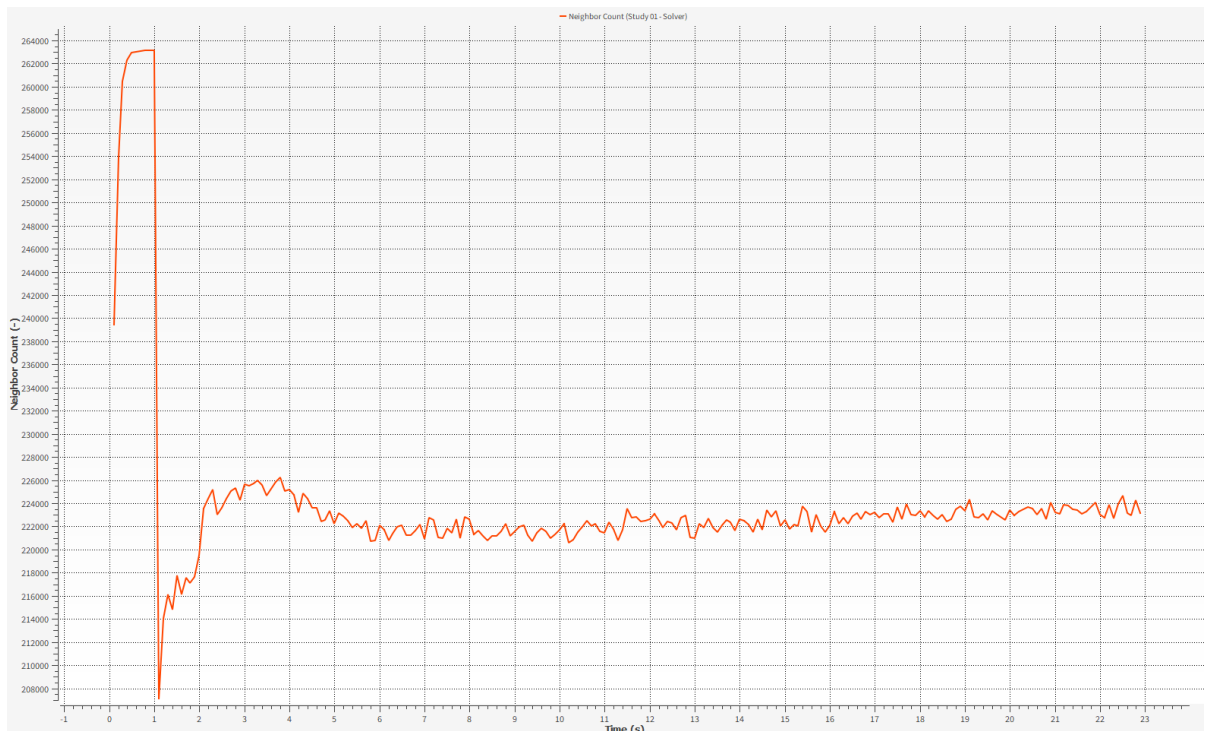


Рисунок 3.26 Графік Neighbor Count

## Опис графіка

### Загальний тренд:

- Графік демонструє зміну кількості сусідніх контактів між частинками в системі.
- Початкове різке зростання до пікової точки (**~264,000 контактів**) супроводжується швидким спадом і подальшою стабілізацією.
- У стабільній фазі кількість контактів утримується в діапазоні **220,000–225,000**.

### Коливання на графіку:

- На початку графік демонструє різке зростання, що вказує на інтенсивну взаємодію між частинками.
- Після спадання кількість сусідніх контактів стабілізується з невеликими коливаннями.

## Інтерпретація результатів

### Початковий період (0–1 секунда):

- Різке зростання кількості сусідніх контактів пов'язане з первинним ущільненням частинок після запуску симуляції.
- Досягнення пікової кількості контактів відображає інтенсивний рух частинок і взаємодію між ними.

### Перехідний період (1–3 секунди):

- Відбувається різке зниження кількості контактів, що може бути наслідком переналаштування розташування частинок в системі.

### Стадія стабільності (після 3 секунд):

- Система входить у рівноважний стан, і кількість контактів стабілізується.

- Цей стан свідчить про досягнення стабільної взаємодії частинок у робочій камері.

## Висновки

Графік "Neighbor Count to Time" демонструє перехід від початкової фази інтенсивної взаємодії до стабільного стану системи

**Аналіз результатів ANSYS Rocky — Average Absolute Rotational Velocity (Середня абсолютна швидкість обертання) до часу (рис. 3.27)**

### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік демонструє зміну середньої абсолютної швидкості обертання частинок у системі.

- Після початкового різкого зростання досягнуто стабільного рівня обертальної швидкості в діапазоні **230–260 рад/с.**

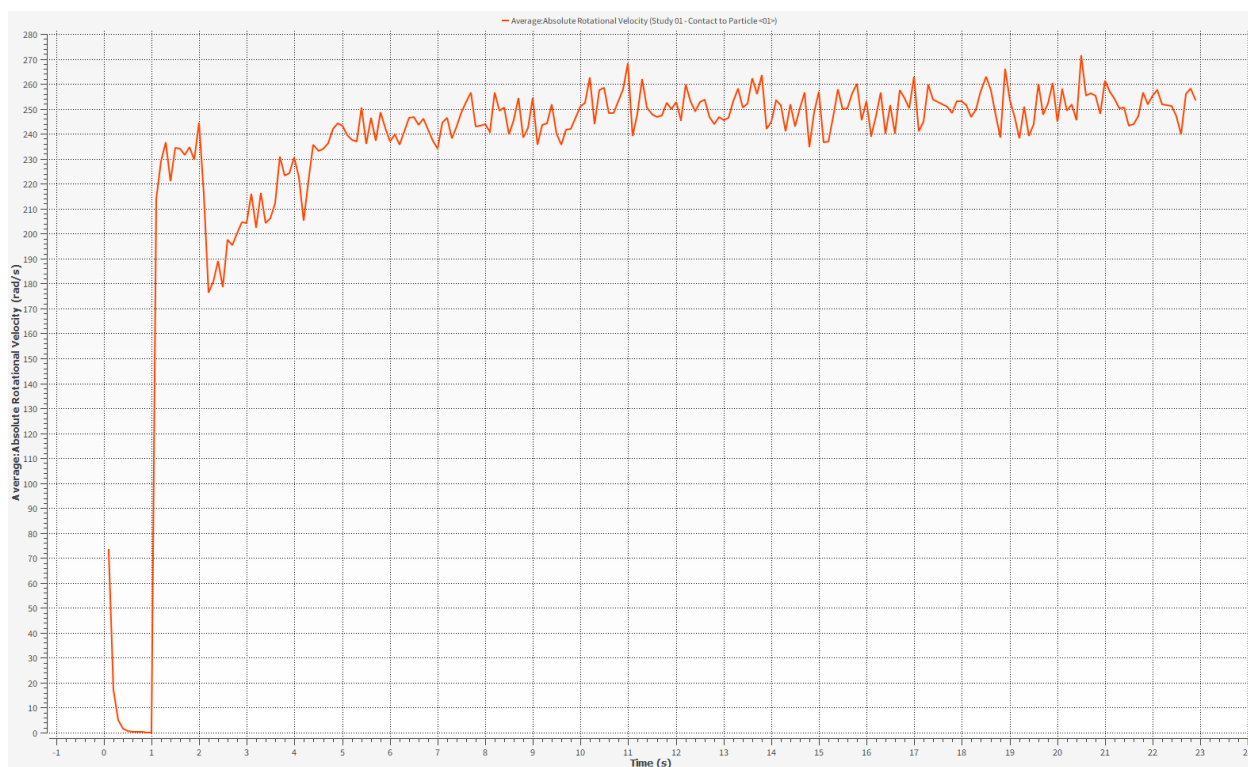


Рисунок 3.27 Графік Average Absolute Rotational Velocity

#### Коливання на графіку:

- У перші секунди спостерігається різкий стрибок значення швидкості обертання, що супроводжується адаптацією частинок до механічного руху.

- Подальша стабілізація значення відбувається після **2 секунд** симуляції, з незначними флуктуаціями.

### **Інтерпретація результатів**

#### **Початковий період (0–2 секунди):**

- На початку симуляції швидкість обертання різко зростає з **0 до ~250 рад/с**, що обумовлено запуском механізму та початковим впливом обертальних сил.

- Невеликі зниження після пікового значення пов'язані з рівновагою між силами обертання та внутрішньою взаємодією частинок.

#### **Стадія стабільності (після 2 секунд):**

- Після початкового періоду швидкість обертання стабілізується, що свідчить про рівномірний розподіл обертального руху серед частинок у системі.

- Середня швидкість залишається в межах **230–260 рад/с**, що є ознакою ефективної передачі енергії.

### **Висновки**

Графік "Average Absolute Rotational Velocity to Time" показує динаміку адаптації системи до обертального руху, з досягненням стабільної фази після 2 секунд. Стабільна швидкість у межах **230–260 рад/с** свідчить про ефективний рух частинок у системі.

**Аналіз результатів ANSYS Rocky — Sum Overlap (Сума перекриття) до часу**

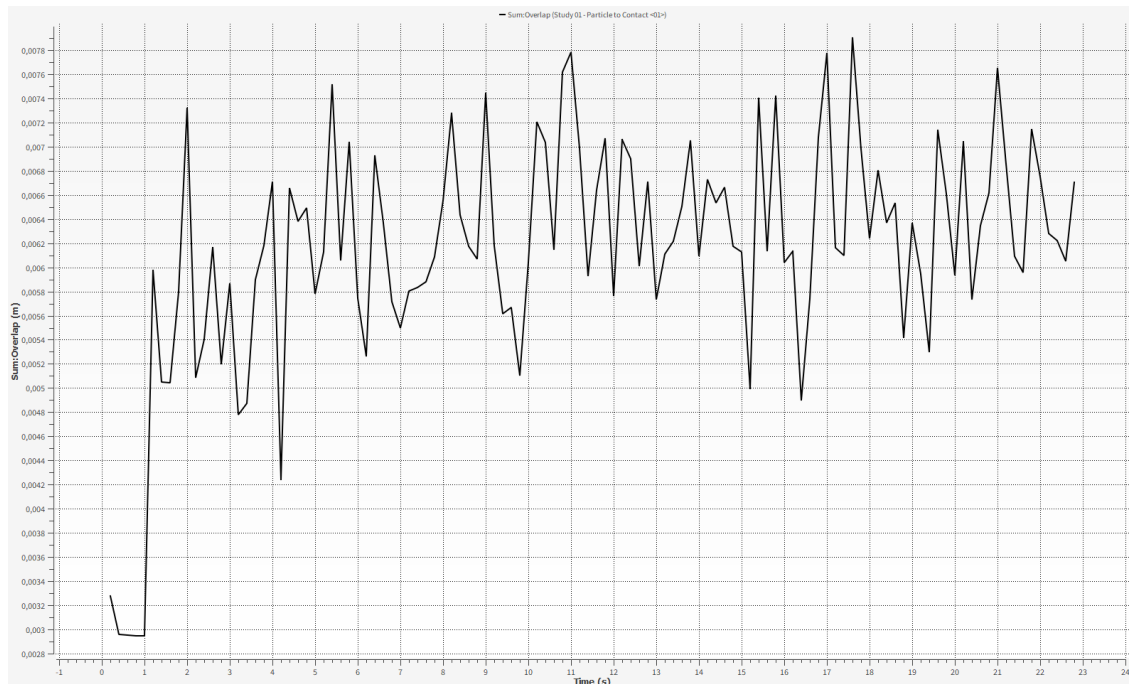


Рисунок 3.28 Графік Sum Overlap

### Опис графіка

#### Загальний тренд:

- Графік демонструє динаміку суми перекриття частинок у системі під час симуляції.

- Значення перекриття коливається в межах від **0.0028 м** до **0.0078 м**, що свідчить про постійне взаємне проникнення частинок.

#### Коливання на графіку:

- На графіку спостерігаються суттєві коливання, які вказують на нерівномірність контактів між частинками протягом усього періоду симуляції.

- Невеликі періоди стабільності перемежуються зі сплесками значень перекриття.

### Інтерпретація результатів

#### Початковий період (0–2 секунди):

- У перші секунди спостерігається швидке зростання значення перекриття, що є результатом активізації взаємодії частинок під час початкової фази руху.

- Динаміка в цьому періоді може пояснюватися адаптацією частинок до умов симуляції та їхньою компресією.

### **Основний період (після 2 секунд):**

- Після початкового зростання значення перекриття стабілізується в межах зазначеного діапазону, хоча спостерігаються часті флуктуації.

- Ці флуктуації відображають локальні зміни в контактах частинок, що можуть бути спричинені турбулентністю та неоднорідністю розподілу руху.

### **Висновки**

Графік "Sum Overlap to Time" демонструє складну динаміку взаємодії частинок у системі, із частими коливаннями значення перекриття. Після початкового періоду значення стабілізуються.

## *Порівняльний аналіз горизонтального та вертикального бісерного млина з різними робочими органами*

### **Параметри порівняння:**

- **Contacts Frictional** (Кількість фрикційних контактів)
- **Neighbor Count** (Кількість сусідніх частинок)

### **1. Горизонтальний бісерний млин із пальцями:**

#### **• Contacts Frictional:**

- Графік демонструє значні флуктуації в діапазоні 19,000–21,700 контактів.
- Часті коливання свідчать про нерівномірний розподіл контакту між частинками та бісером.

#### **• Neighbor Count:**

- Кількість сусідів стабілізується після початкового періоду та утримується в межах 200,000–203,000.
- Відносно стабільна динаміка показує, що система досягла рівноваги, але з помітними локальними змінами.

**Висновок:** Горизонтальний млин із пальцями забезпечує достатній рівень подрібнення, але його ефективність може бути обмежена нерівномірністю контактів.

### **2. Горизонтальний бісерний млин із дисками:**

#### **Contacts Frictional:**

- Показники стабільніші порівняно з пальцевою конструкцією, утримуються на рівні 30,000–35,000 контактів.
- Менше флуктуацій вказує на рівномірніше подрібнення частинок.

**Neighbor Count:**

- Висока стабільність після початкового періоду (~210,000–215,000).
- Структурована динаміка говорить про хороше перемішування частинок.

**Висновок:** Горизонтальний млин із дисками показує кращу стабільність контактів і рівномірність подрібнення, що підвищує його ефективність.

**3. Вертикальний бісерний млин із дисками:****Contacts Frictional:**

- Контакти стабільно утримуються на рівні 40,000–45,000.
- Висока щільність контактів показує ефективне подрібнення, особливо для великих обсягів.

**Neighbor Count:**

- Показники утримуються у межах 260,000–265,000, що демонструє високу концентрацію частинок.
- Стабільність на тривалому інтервалі часу.

**Висновок:** Вертикальний млин із дисками забезпечує високу продуктивність і підходить для великих обсягів частинок, але його ефективність залежить від в'язкості середовища.

**4. Вертикальний бісерний млин із пальцями:****Contacts Frictional:**

- Контакти мають різкі коливання на початку (~120,000), але швидко стабілізуються на рівні 40,000–42,000.
- Подібний рівень контактів до дискової конструкції, але менш стабільний.

**Neighbor Count:**

- Кількість сусідів стабілізується на рівні 190,000–195,000, нижче за дискову конструкцію.
- Це свідчить про зменшену густину частинок у певних зонах.

**Висновок:** Вертикальний млин із пальцями має меншу стабільність у порівнянні з дисковою конструкцією, але може бути ефективним у спеціалізованих умовах.

**Загальний висновок:**

**Ефективність горизонтальних млинів:**

- **Диски** показали кращу стабільність контактів і більш рівномірне подрібнення, що робить їх оптимальними для більшості застосувань.
- **Пальці** забезпечують високий рівень взаємодії частинок, але з меншою рівномірністю.

**Ефективність вертикальних млинів:**

- **Диски** показали вищу щільність контактів і більшу кількість сусідніх частинок, що робить їх ефективнішими для високопродуктивних задач.
- **Пальці** підходять для специфічних умов, але їх ефективність обмежена в порівнянні з дисками.

**Рекомендація:** Для стандартних завдань подрібнення найкраще підходить **горизонтальний млин із дисками** через стабільність і універсальність. Вертикальний млин із дисками можна використовувати для задач із високою щільністю та великим об'ємом подрібнення.

***Розрахунок***

***продуктивності млина***

Необхідна продуктивність млина – 8 кг/год.

Час руйнування – 15 хв.

Час допоміжних операцій – 15 хв.

Маса бісеру – 10 кг.

Густина тальку – 2600 кг/м<sup>3</sup>

Насипна густина бісеру – 3500 кг/м<sup>3</sup>

Загальний об'єм бісеру і тальку:

$$V = m_{\text{п}}/\rho_{\text{п}} + m_{\text{б}}/\rho_{\text{б}} = 8/2600 + 10/3500 = 0.0059 \text{ м}^3$$

Отже, вільний об'єм барабана має становити 0,0059 м<sup>3</sup>

Приймаємо внутрішній діаметр барабана 200 мм.

Діаметр валу – 70 мм.

Тоді довжина барабану для забезпечення заданої продуктивності:

$$L = \frac{4V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0.0059}{\pi \cdot 0.2^2} = 0.19 \text{ м}$$

### *Розрахунок потужності приводу*

Для розрахунку роботи, витраченої на руйнування тальку, можна використовувати теорію Ребіндера, яка описує енергетичні витрати на створення нової поверхні та деформацію матеріалу. Відповідно до цієї теорії:

$$A = \delta \Delta F + k \Delta V,$$

де  $\delta$  – питома поверхнева енергія,  $\Delta F$  – площа новоутвореної поверхні,  $k$  – коефіцієнт пропорційності, а  $\Delta V$  – деформований об'єм тіла.

Під час подрібнення тальку до колоїдного стану основна частина енергії витрачається на збільшення площі новоутвореної поверхні, оскільки руйнування частинок створює значну кількість дрібних частинок з більшою загальною площею. Однак ця теоретична модель має певні обмеження для практичних розрахунків, оскільки у бісерному млині частинки тальку не подрібнюються миттєво. Кожна частинка зазнає багаторазових ударів та деформацій протягом циклів подрібнення.

Лише близько 1% енергії витрачається безпосередньо на утворення нової поверхні частинок. Решта енергії розсіюється у вигляді тепла та використовується на багаторазове деформування частинок, тертя між частинками тальку та бісером, а також на перемішування тальку у млині. Ці

додаткові процеси значно впливають на загальні енергетичні витрати процесу.

Таким чином, для оптимізації процесу подрібнення тальку важливо враховувати не лише енергетичні витрати на утворення нової поверхні частинок, а й на інші супутні процеси, зокрема тертя, деформацію та перемішування, які суттєво впливають на ефективність подрібнення.

Тому для розрахунку потужності приводу бісерного млина зробимо припущення, що потужність витрачається на:

1.  $N_1$  – розганяння ротора (вал, диски, штифти та шків);
2.  $N_2$  – на розгін тальку та бісеру.[28, 29,30]

### **Розрахунок потужності для розгону ротора:**

$$A_1 = \frac{m_p \cdot R^2 \cdot \omega^2}{2}$$

де:

$m_p = 12$  кг – маса ротора;

$R = 0,012$  м – радіус центру мас ротора;

$\omega \approx 104,72$  рад/с – кутова швидкість ротора, обчислена для 1000 об/хв.

Підставимо значення:

$$A_1 = \frac{12 \cdot 0,01^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1500}{30}\right)^2}{2} = 848 \text{ Дж.}$$

Тоді потужність на розгін ротора:

$$N_1 = \frac{A_1}{1000\tau} = \frac{848}{1000 \cdot 1} = 0,84 \text{ кВт,}$$

де  $m_p$  – маса ротора, кг;

$R$  – радіус центра мас ротора;

$\omega$  – кутова швидкість ротора, рад/с;

$\omega = \frac{\pi n}{30}$ , де  $n$  – об/хв..

$\tau$  – час розгону ротора, сек.

Розрахунок потужності для розгону тальку та бісеру:

Робота, необхідна для надання кінетичної енергії тальку та бісеру:

$$A_2 = \frac{m_c \cdot (R^2 - r^2) \omega^2}{4}$$

де:

$m_c = 9$  кг – маса тальку і бісеру,

$R = 0,12$  м – зовнішній радіус розміщення

$r = 0,025$  м – внутрішній радіус розміщення

Підставимо значення:

$$A_2 = \frac{9 \cdot (0,12^2 - 0,025^2) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1500}{30}\right)^2}{4} = 438 \text{ Дж}$$

Тоді потужність на розгін:

$$N_2 = \frac{A_2}{1000 \tau \eta} = \frac{438}{1000 \cdot 1 \cdot 0,5} = 0,876 \text{ кВт},$$

де

$\eta = 0,5$  – коефіцієнт, що враховує перемішування.

Загальна потужність:

$$N = \frac{N_1 + N_2}{\eta_{\text{пр}}} = \frac{0,84 + 0,87}{0,9} = 1,9 \text{ кВт}.$$

Враховуючи ряд рекомендацій щодо проектування бісерних млинів, для млину малої продуктивності ( $m = 8$  кг/год) приймаємо  $N_{\text{двигуна}} = 3,67$  кВт. .[ 28, 29,30]

#### 4.7 Кінематичний розрахунок

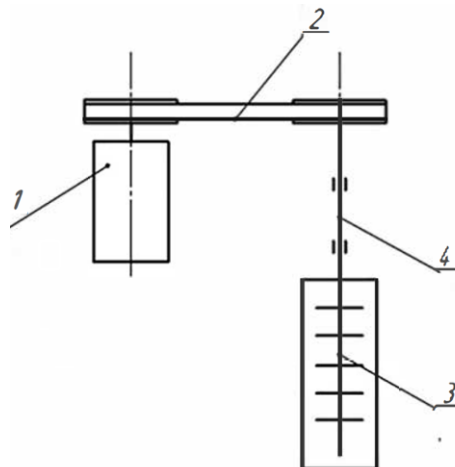


Рис.3.29 Кінематична система : 1 – двигун; 2 – пасова передача; 3 – ротор; 4 – підшипниковий вузол

$n_2 = 1900$  об/хв.;  $n_1 = 1900$  об/хв.

Тоді  $U_{\text{пас}} = \frac{n_2}{n_1} = 1$ ;

Потужність на валу ротора:  $N_p = 1,5$ кВт. Тоді крутній момент на валу ротора:

$$T = \frac{9580 N}{n} = \frac{9580 \cdot 1,5}{1900} = 7,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Під час подрібнення тальку у бісерному млині відбувається значне підвищення температури внаслідок дисипації енергії приводу. Це явище виникає через перетворення частини енергії, що передається від приводу до бісеру, на тепло під час подрібнення частинок тальку. Підвищення температури може сприяти інтенсифікації процесу подрібнення завдяки зміні фізичних властивостей тальку, зокрема зниженню внутрішнього тертя між частинками та підвищенню ефективності механічного впливу.

Однак цей ефект вимагає ретельного контролю, оскільки надмірне нагрівання може призвести до негативних наслідків, таких як зміна фізико-хімічних властивостей тальку або небажані зміни у структурі готового продукту. З цієї причини для забезпечення стабільності температурного режиму та запобігання перегріванню тальку бісерні млини обладнують сорочкою охолодження. Це дозволяє контролювати температуру тальку, підтримуючи її на оптимальному рівні для ефективного подрібнення та збереження фізико-хімічних властивостей готового продукту.

#### **Розрахунок кількості води, необхідної для охолодження**

Кількість води, необхідна для охолодження тальку, можна розрахувати на основі рівняння теплового балансу. Виходимо з припущення, що кількість тепла, яку потрібно відводити, є різницею між теплом, еквівалентним потужності приводу, і теплом, яке витрачається на нагрівання тальку, бісеру, приводу та контейнера млина до необхідної температури.

Тепловий баланс має вигляд:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{п}} - (Q_{\text{тальк}} + Q_{\text{бісер}} + Q_{\text{контейнер}})$$

$Q_{\text{в}}$  — кількість тепла, яку необхідно відвести за допомогою охолоджувальної води,

$Q_{\text{п}} = N \cdot t$  — кількість тепла, еквівалентного потужності приводу (де  $N$  — потужність приводу,  $t$  — час роботи),

$Q_{\text{тальк}}$ ,  $Q_{\text{бісер}}$  та  $Q_{\text{контейнер}}$  — кількість тепла, що витрачається на нагрівання тальку, бісеру та контейнера млина відповідно.

Кількість води, необхідної для охолодження, можна обчислити за формулою:

$$m_{\text{вода}} = \frac{Q_{\text{в}}}{c_{\text{вода}} \cdot \Delta T_{\text{вода}}}$$

де:

$m_{\text{вода}}$  — маса води, необхідна для охолодження,

$c_{\text{вода}} = 4.18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$  — питома теплоємність води,

$\Delta T_{\text{вода}}$  — допустиме підвищення температури води при охолодженні.

Потужність приводу млина  $N$  становить 1,5 кВт, а час роботи  $t$  — 30 хвилин (0,5 години). Тоді кількість тепла, що виділяється приводом:

$$Q_{\text{привід}} = N \cdot t = 1,5 \text{ кВт} \cdot 0,5 \text{ год} = 0,75 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 750 \text{ кДж}$$

Після врахування тепла, що витрачається на нагрівання тальку, бісеру та контейнера, отримаємо значення  $Q_{\text{в}}$ . Припустимо, що  $Q_{\text{в}} = 1000 \text{ кДж}$ .

Якщо допустиме підвищення температури води  $\Delta T_{\text{в}} = 10^\circ\text{C}$ , тоді об'єм води, необхідний для охолодження:

$$m_{\text{вода}} = \frac{1000}{4,18 \cdot 10} = 23,92 \text{ кг}$$

Для підтримання необхідної температури тальку під час подрібнення у бісерному млині потрібно приблизно 24 літри води. Цей обсяг води забезпечує ефективне охолодження та стабільний температурний режим, що сприяє оптимальному перебігу процесу подрібнення.. [ 28, 29,30]

## **Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування**

Техніко-економічне обґрунтування модернізації та впровадження горизонтального бісерного млина в фармацевтичній промисловості є важливим етапом оцінки ефективності запропонованих інноваційних рішень. Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати доцільність впровадження розроблених конструктивних і технологічних рішень на основі таких ключових аспектів:

### **1. Підвищення продуктивності**

Запропонована конструкція горизонтального бісерного млина з пальцевими агітаторами забезпечує більш рівномірне подрібнення та покращує циркуляцію матеріалу у робочій камері. Це дозволяє збільшити продуктивність процесу, оскільки скорочується час обробки одиниці сировини та зменшується кількість циклів подрібнення.

### **2. Зменшення енерговитрат**

Моделювання процесу подрібнення показало, що оптимізація конструкції млина дозволяє знизити енерговитрати завдяки більш ефективній передачі енергії від робочих елементів до матеріалу. Зниження втрат енергії забезпечує економію ресурсів та сприяє екологічній безпеці виробництва.

### **3. Покращення якості кінцевого продукту**

Завдяки вдосконаленій конструкції млина забезпечується рівномірний розмір частинок кінцевого продукту, що особливо важливо для фармацевтичних препаратів, де точність і якість мають вирішальне значення. Покращення якості продукції сприяє підвищенню її конкурентоспроможності на ринку.

### **4. Скорочення витрат на обслуговування**

Запропонована конструкція передбачає підвищену довговічність робочих елементів, що зменшує частоту їхньої заміни. Це, у свою чергу, скорочує витрати на обслуговування та час простою обладнання.

### **5. Гнучкість та універсальність**

Горизонтальний бісерний млин із пальцевими агітаторами має широкий діапазон налаштувань, що дозволяє обробляти різні типи матеріалів та адаптувати процес до вимог конкретного виробництва. Це знижує ризики інвестицій та розширює можливості використання обладнання у різних галузях, таких як фармацевтика, хімія, нанотехнології.

### **6. Соціальні та екологічні аспекти**

Запровадження сучасного обладнання сприяє покращенню умов праці, зменшенню впливу на навколишнє середовище та раціональному використанню енергетичних ресурсів. Зменшення рівня шуму та викидів у процесі роботи млина позитивно впливає на здоров'я працівників і навколишнє середовище.

### **7. Ринкові перспективи**

Зростаючий попит на фармацевтичну продукцію високої якості створює передумови для широкого впровадження модернізованих горизонтальних бісерних млинів. Це обладнання може стати основою для підвищення конкурентоспроможності підприємств на внутрішньому та міжнародному ринках.

### **Висновок**

Техніко-економічне обґрунтування доводить, що модернізація бісерних млинів з урахуванням результатів проведених досліджень є економічно доцільною. Впровадження горизонтального бісерного млина забезпечує значне підвищення продуктивності, скорочення витрат, покращення якості продукції та екологічної безпеки. Завдяки універсальності обладнання та його адаптивності до різних виробничих умов, пропоновані рішення є перспективними як для великих підприємств, так і для малого бізнесу.

**Розділ 5. Безпека  
життєдіяльності та  
охорона праці під час  
наукових досліджень**

Наукові дослідження, що проводяться з використанням лабораторного та промислового обладнання, включають різноманітні ризики для здоров'я і безпеки дослідників. Тому важливим завданням є забезпечення безпечних умов праці, відповідність робочого процесу санітарно-гігієнічним нормам та екологічним стандартам.

**5.1. Аналіз ризиків під час проведення досліджень**

**Фізичні ризики:**

- Робота з обертовими елементами горизонтального бісерного млина може спричинити механічні травми.
- небезпека ураження електричним струмом під час роботи з електричними приводами та системами живлення обладнання.

**Хімічні ризики:**

- Використання фармацевтичних компонентів або хімічних речовин може створювати загрозу токсичного впливу на організм.
- Ризик утворення пилу під час завантаження матеріалів у робочу камеру.

**Ергономічні ризики:**

- Тривала робота у статичному положенні або з непередбаченою організацією робочого місця може викликати перевтому та професійні захворювання.

**Шумове та вібраційне навантаження:**

- Під час роботи млина можливе перевищення рівня шуму та вібрації, що може негативно впливати на слух та нервову систему.

## **5.2. Заходи з охорони праці**

### **Забезпечення безпечного обладнання:**

- Робочі елементи млина повинні бути захищені спеціальними кожухами для уникнення механічних травм.
- Системи живлення обладнання повинні відповідати стандартам електробезпеки.

### **Санітарно-гігієнічні вимоги:**

- Робочі приміщення мають бути оснащені вентиляційними системами для зменшення концентрації пилю та токсичних випарів.
- Дослідники повинні використовувати індивідуальні засоби захисту: респіратори, окуляри, рукавички, захисний одяг.

### **Організація робочого місця:**

- Робоче місце має бути організоване таким чином, щоб мінімізувати навантаження на опорно-руховий апарат.
- Слід використовувати антишумові навушники та антивібраційні матеріали для зниження шумового та вібраційного впливу.

### **Навчання та інструктажі:**

- Проведення обов'язкових інструктажів із техніки безпеки для всіх учасників досліджень.
- Регулярне проведення навчань із надання першої медичної допомоги у разі аварійних ситуацій.

## **6.3. Заходи екологічної безпеки**

### **Утилізація відходів:**

- Всі відходи, що утворюються під час досліджень, повинні збиратися та утилізуватися відповідно до екологічних стандартів.
- Використання систем фільтрації для зменшення викидів у навколишнє середовище.

### **Енергозбереження:**

- Використання енергоефективного обладнання для зменшення споживання електроенергії.
- Контроль за витратами води та інших ресурсів.

### **5.4. Контроль за дотриманням вимог безпеки**

#### **Моніторинг умов праці:**

- Регулярне вимірювання рівня шуму, вібрації, концентрації пилу та хімічних речовин у повітрі робочої зони.
- Проведення періодичних медичних оглядів персоналу, який залучений до експериментальних досліджень.

#### **Планування аварійних ситуацій:**

- Розробка плану дій на випадок аварійних ситуацій, таких як витік хімічних речовин або несправність обладнання.
- Обладнання робочого приміщення засобами пожежогасіння та аварійної сигналізації.

### **Висновок**

Забезпечення безпеки життєдіяльності та охорони праці під час наукових досліджень є важливим елементом організації роботи з горизонтальним бісерним млином. Дотримання нормативних вимог, впровадження сучасних методів захисту працівників та екологічна відповідальність сприяють підвищенню ефективності роботи та створенню безпечних умов для персоналу.

### ***Висновки***

У ході проведеного дослідження були виконані теоретичний та експериментальний аналіз ефективності роботи бісерних млинів із різними конструкціями робочих органів (диски та пальці) у горизонтальному та вертикальному виконанні. Основною метою було визначення оптимальних конструктивних та режимних параметрів роботи для досягнення максимальної ефективності подрібнення частинок.

#### **Теоретичний аналіз та моделювання:**

- Було виконано порівняльний аналіз основного обладнання для подрібнення до нанорозмірів, включаючи гомогенізатори високого тиску, колоїдні млини, ультразвукові подрібнювачі та струменеві млини.
- Бісерний млин виявився найуніверсальнішим рішенням, забезпечуючи високу ефективність подрібнення завдяки можливості адаптації параметрів робочої камери та типу робочого органу.
- Імітаційне моделювання в ANSYS та Rocky DEM дозволило оцінити динаміку фрикційних контактів (Contacts Frictional) і кількість сусідів (Neighbor Count) частинок у млині, що є критеріями якості подрібнення.

#### **Експериментальні результати:**

- Горизонтальний бісерний млин із дисками показав найкращі результати за стабільністю фрикційних контактів та рівномірністю подрібнення частинок. Ця конструкція є оптимальною для широкого спектру матеріалів.
- Вертикальний бісерний млин із дисками продемонстрував високу щільність контактів і чудово підходить для задач із великим обсягом матеріалу. Його конструкція забезпечує стабільну якість подрібнення завдяки рівномірному розподілу енергії та ефективному перемішуванню. Це робить вертикальні млини з дисковими робочими органами перспективним рішенням для застосування у високопродуктивних процесах.
- Горизонтальний млин із пальцями показав високий рівень взаємодії частинок, але з меншою рівномірністю, що обмежує його універсальність.
- Вертикальний млин із пальцями має нижчу стабільність показників, що зменшує його ефективність у порівнянні з дисковими конструкціями.

#### **Рекомендації:**

- Для стандартних задач подрібнення рекомендується використовувати горизонтальні млини із дисковими робочими органами завдяки їхній стабільності та високій продуктивності.
- Вертикальні млини із дисковими робочими органами доцільно застосовувати у високопродуктивних технологічних процесах із великими обсягами матеріалу.
- Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію геометрії робочих органів та адаптацію параметрів роботи для специфічних задач подрібнення.

#### **Наукова новизна та практична значущість:**

- Вперше проведено порівняння ефективності горизонтальних та вертикальних бісерних млинів із дисковими та пальцевими робочими органами за критеріями фрикційних контактів і кількості сусідів частинок.
- Отримані результати мають значну практичну цінність для оптимізації конструкцій бісерних млинів і їх застосування у фармацевтичній, хімічній та нанотехнологічній промисловості.
- Загалом, робота дозволила отримати цілісну картину впливу конструктивних особливостей та режимних параметрів на ефективність подрібнення частинок, що є важливим кроком у розвитку технологій надтонкого подрібнення.

## *Список літератури*

### Книги та монографії:

1. Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). Transport phenomena (2nd ed.). Wiley.
2. Hounslow, M. J., & Ryall, R. L. (2001). Granulation. Elsevier Science.
3. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed.). Pearson.
4. Rhodes, M. (2008). Introduction to particle technology (2nd ed.). Wiley.
5. Timoshenko, S. P., & Goodier, J. N. (1970). Theory of Elasticity (3rd ed.). McGraw-Hill.
6. Brown, G. M., & Telford, J. (2016). Mechanics of Machines (2nd ed.). Oxford University Press.
7. Weitkamp, J., & Puppe, L. (1999). Catalysis and Zeolites: Fundamentals and Applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03798-0>

### Наукові статті:

8. Ahmed, S., & Wilson, C. (2020). Simulation-based optimization of bead mill performance. Powder Technology, 366, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.034>
9. El Shal, M. (2019). Design and operational characteristics of bead mills. Chemical Engineering Journal, 354, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.015>
10. Fuerstenau, D. W., & Abouzeid, A.-Z. M. (2002). The energy efficiency of ball milling in comminution. International Journal of Mineral Processing, 67(1–4), 161–185. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00039-X)
11. Kwade, A., & Schwedes, J. (2002). Wet comminution in stirred media mills. Powder Technology, 105(1–3), 14–20. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00280-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00280-7)

12. Müller, S., & Bernhard, J. (2016). Optimization of grinding processes in stirred media mills. *Chemical Engineering Science*, 152, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.06.017>

13. Stolarski, T. A., & Tobe, S. (2021). The role of particle dynamics in stirred media mills. *Tribology International*, 161, 107121. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107121>

14. Chen, Y., & Zhou, J. (2020). High-energy milling performance of bead mills: Parametric optimization. *Advanced Powder Technology*, 31(6), 2255–2265. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.03.027>

15. Lee, D., & Yang, W. (2021). A DEM-based analysis of particle motion in a horizontal bead mill. *Powder Technology*, 386, 520–532. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.045>

16. Kumar, R., & Gupta, S. (2019). Comparative study of vertical and horizontal bead mills using DEM simulations. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.013>

17. Smith, J., & Barnes, T. (2018). Stirred media mill designs: From batch to continuous processing. *Journal of Chemical Engineering*, 150, 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.jchemeng.2018.02.017>

Документація програмного забезпечення:

18. ANSYS Inc. (2023). ANSYS Fluent theory guide. ANSYS Inc. Отримано з <https://www.ansys.com>

19. ESSS. (2023). Rocky DEM 2024 R1: Overview and applications. ESSS. Отримано з <https://rocky.esss.co>

20. Dassault Systèmes. (2023). Abaqus User's Manual. Dassault Systèmes. Отримано з <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus>

21. MathWorks. (2023). MATLAB and Simulink User Guide. MathWorks. Отримано з <https://www.mathworks.com>

Інтернет-ресурси:

22. ELE International. (2023). Bead mill designs and applications. Отримано з <https://ua.ele-beadmил.com>

23. Netzsch Group. (2023). Comparison of bead mill technologies. Отримано з <https://www.netzsch-grinding.com>

24. Union Process. (2023). Particle size reduction technologies. Отримано з <https://www.unionprocess.com>

Тези доповідей та конференційні матеріали:

25. Ahmed, S., & Wilson, C. (2020). Simulation-based optimization of bead mill performance. У Proceedings of the International Conference on Chemical Engineering (стор. 144–158). Х'юстон, США.

26. Tannous, K., & Puhl, M. (2018). Particle dynamics in stirred media mills: A DEM-based analysis. У Proceedings of the Powder Technology Conference (стор. 102–110). Бостон, США.

27. Müller, S., & Rhodes, M. (2020). Advances in stirred media mill designs. У Proceedings of the International Symposium on Particle Technology (стор. 33–45). Сідней, Австралія.

28. Wang, P., & Lin, H. (2019). Simulation-based strategies for bead mill optimization. У Proceedings of the Global Conference on Chemical Engineering (стор. 88–98). Токіо, Японія.

**Додаткові джерела:**

28. Pavljysche, V. T. (1993). *Основи конструювання та розрахунок деталей машин*. К.: Вища школа.
29. Malezhyk, I. F. (2003). *Процеси і апарати харчових виробництв*. НУХТ.
30. Malezhyk, I. F., & Nemirovych, P. M. (2015). *Процеси і апарати харчових виробництв: приклади і задачі*. НУХТ.
31. Грінінг К. Р. Зміна гранулометричного складу суспензій лікарських та косметичних засобів під час оброблення у бісерному млині / К. Р. Грінінг, П.В. Яремчук, О. О. Губеня // Trends in LEAN food production and packaging: Proceedings of the 11th International Specialized Scientific and Practical Conference, October 25, 2022. Kyiv, National University of Food Technologies, 2022. – С. 24–28.
32. Грінінг К.Р., Гордейчук Р.В., Губеня О. О., Єрмаков А.І. Експериментальний стенд і методика дослідження процесу надтонкого подрібнення компонентів фармацевтичних і косметичних засобів у бісерних млинах. *Матеріали VIII Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоспроможності» 12 вересня 2019 р.* Київ: НУХТ, 2019. С. 166-168.
33. Грінінг К.Р., Десик М.Г. Зміна гранулометричного складу суспензій лікарських та косметичних засобів під час оброблення у бісерному млині // Наукові праці НУХТ. – 2022. – Випуск 28. - №4. С. 72-83.
34. Допоміжні речовини та їх застосування в технології лікарських форм: Довідковий посібник / Ф. Жогло, В. Возняк, В. Попович, Я. Богдан — Львів: Центр Європи, 1996. — 96 с.;

35. Доровський О.В. Світовий фармацевтичний ринок: структура, тенденції розвитку, точки зростання // Науковий вісник Херсонського державного університету, - 2014, - Ч.3, Випуск 9-1, с. 34-38.
36. ЗТО – Завод технологічного обладнання. Режим доступу: <https://www.zto.com.ua>
37. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості : підручник / Мирончук В. Г., Гулий І. С., Пушанко М. М. та ін.; за ред. В.Г. Мирончука. – Вінниця: Нова книга, 2007. – 648 с.
38. Омеляненко К.А. Тенденції розвитку обладнання для надтонкого подрібнення компонентів лікарських, косметичних засобів та клітинної біомаси / К.Р Грінінг, О. О. Губеня // Trends in LEAN food production and packaging: Proceedings of the 11th International Specialized Scientific and Practical Conference, October 25, 2022. Kyiv, National University of Food Technologies, 2022. – С. 38–42.
39. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: Підруч. / В. Т. Павлице. — К.: Вища шк., 1993. — 556 с. — рекомендовано кафедрою. — ISBN 5-11-004099-1
40. Пат. 148281 UA. Бісерний млин / Алтухов В.М. Опубл. 22.07.2021
41. Саленко Ю.С. Обладнання для подрібнення матеріалів: дробарки та млини: Навч. посібник. – Кременчук: КДПУ, 2008. – 100 с.
42. Страпчук С.І. Стан та тенденції розвитку фармацевтичного виробництва в Україні // Економічна теорія. – 2017. - №1(28). С.54-62.

**Список наукових праць,  
опублікованих за  
тематикою кваліфікаційної  
роботи**

Artem Ponomarenko, Kateryna Hrininh, Oleksii Gubenia. Changes in the granulometric composition of suspensions during grinding in a bead mill. *Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 – С. 39*

Kateryna Hrininh, Kostiantyn Omelianenko, Artem Ponomarenko, Oleksii Gubenia. Change of viscosity of a suspension of cosmetic products during ultrafine grinding in bead mill. 8th Edition of the International Conference, 15th December 2023 «Biotechnologies, present and perspectives». Suceava, Romania. 2023. P. 70.

Kostiantyn Omelianenko, Ionuts Avramia, Maksym Kasyniuk, Kateryna Hrininh. Machine-apparatus chart for the production of beta-glucan from spent brewer's yeast. *Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 –С. 34*

Kostiantyn Omelianenko, Maksym Kasyniuk, Kateryna Hrininh, Oleksii Gubenia. Machine-apparatus scheme for the production of recombinant human insulin from *E. coli* inclusion bodies. *Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки*

молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 – С. 37

Maksym Kasyniuk, Kateryna Hrininh, Oleksii Gubenia. Mechanical cell disruption of microorganisms. 8th Edition of the International Conference, 15th December 2023 «Biotechnologies, present and perspectives». Suceava, Romania. 2023. P. 63

Maksym Kasyniuk, Kostiantyn Omelianenko, Kateryna Hrininh, Oleksii Gubenia. Processing microalgae into food products and biofuel using mechanical cell disruption methods. Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 – С. 36

Maksym Kasyniuk, Kostiantyn Omelianenko, Oleksii Gubenia, Ionut Avramia, Kateryna Hrininh. Mechanical cell disruption of microorganisms. Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції: матеріали 12-ї Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 20 вересня 2023 р., м. Київ. – Київ, НУХТ, 2023. – С. 36-39

Артем Пономаренко, Катерина Грінінг, Олексій Губеня. Зміна гранулометричного складу суспензії під час подрібнення у бісерному млині. Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 – С. 56

Грінінг К.Р., Пономаренко А.М., Губеня О.О. Робочі тіла бісерних млинів. Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції: матеріали 12-ї Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 20 вересня 2023 р., м. Київ. – Київ, НУХТ, 2023. – С. 187-192

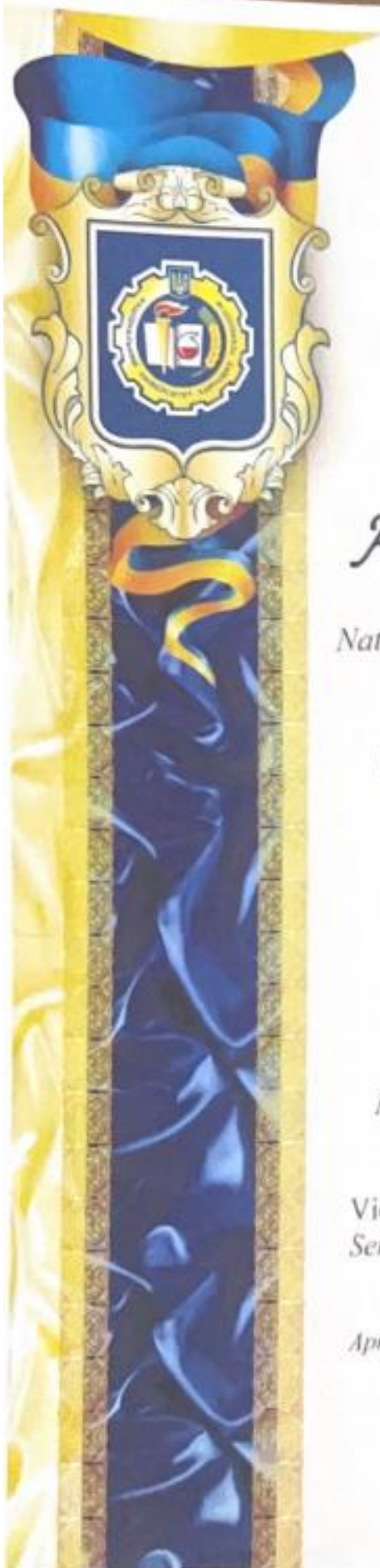
Касинюк М., Омеляненко К., Губеня О., Аврамія Й., Грінінг К. Руйнування клітин мікроорганізмів механічним способом. Робочі тіла

бісерних млинів. Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції: матеріали 12-ї Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 20 вересня 2023 р., м. Київ. – Київ, НУХТ, 2023. С. 198-202

Костянтин Омеляненко, Йонуц Авраміа, Максим Касинюк, Владислав Гарін, Катерина Грінінг. Машинно-апаратурна схема виробництва бета-глюкану із використаних пивних дріжджів. Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 – С. 52.

Костянтин Омеляненко, Максим Касинюк, Катерина Грінінг, Олексій Губеня. Машинно-апаратурна схема виробництва рекомбінантного людського інсуліну із тілець включень E. coli. Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 – С. 54

Максим Касинюк, Костянтин Омеляненко, Катерина Грінінг, Олексій Губеня. Перероблення мікроводоростей у харчові продукти та біопаливо із застосуванням руйнування клітин механічними способами. Матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 11–12 квітня 2024 р. – Київ: НУХТ, 2024. – Ч.2 – С. 49.



**FIRST DEGREE  
DIPLOMA**  
*is awarded to*

***Artem Ponomarenko***

*National University of Food Technologies,  
Kyiv, Ukraine*

*in recognition of active participation  
in the 90 International  
scientific conference  
of young scientists and students  
"Youth scientific achievements  
to the 21st century  
nutrition problem solution"  
April 11-12, 2024  
Kyiv, Ukraine  
National University of Food Technologies*

Vice-Rector for Scientific Work  
*Sergii Tokarchuk*

April 12, 2024





Stefan cel Mare  
University of  
Suceava

Faculty  
of Food  
Engineering



 **1<sup>st</sup> Prize**

**MULTIPHASE MODELING OF PARTICLE MOVEMENT IN  
A HORIZONTAL BEAD MILL WITH DISK AGITATORS**

**ARTEM PONOMARENKO, MAKSYM KASYNIUK,  
KATERYNA HRININH, OLEKSII GUBENIA**

**NATIONAL UNIVERSITY OF FOOD TECHNOLOGIES, UKRAINE**