

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

**Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.
Гулого
Кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв**

«До захисту в ЕК»
Директор інституту

Сергій БЛАЖЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)
7 грудня 2024 року

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

Олександр ГАВВА
(підпис) (ім'я та прізвище)
7 грудня 2024 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

освітньо-професійної програми *Інжиніринг фармацевтичних та біотехнологічних виробництв*

на тему: **Вплив конструкційних та режимних параметрів роботи бісерного млина на продуктивність і якісні показники руйнування клітин дріжджів**

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ОФ-2-6М

Касинюк Максим Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник Гавва Олександр Миколайович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти
(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) недозволеної 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) *Навчально-науковий інженерно-технічний інститут 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*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв

Олександр ГАВВА

7 грудня 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Касинюк Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Вплив конструкційних та режимних параметрів роботи бісерного млина на продуктивність і якісні показники руйнування клітин дріжджів**

керівник роботи Гава Олександр Миколайович, завідувач кафедри, доктор технічних наук, професор.

затверджені наказом закладу вищої освіти від 1 жовтня 2024 р. № 859-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 10.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Мікроорганізми – хлібопекарські дріжджі *Sacharomices*

Руйнування клітин – у бісерних млинах різних конструкцій

Орієнтовна продуктивність – 10 літрів дріжджової суспензії за годину

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

- Порівняльний аналіз технічних рішень
- Матеріали і методи досліджень,
- Результати досліджень та їх пояснення,
- Удосконалення конструкції бісерного млина
- Техніко-економічне обґрунтуван.

- Безпека життєдіяльності та охорона праці під час наукових досліджень.
- Висновки.
- Список літератури.

5. Перелік графічного матеріалу

Слайди презентації:

- Актуальність теми
- Мета і завдання досліджень
- Матеріали і методи (2-3 слайди)
- Результати досліджень та математично-статистичне оброблення – 5-7 слайдів
- Удосконалення конструкції машини (2-3 слайди)
- Висновки

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання **10 жовтня 2024 р.**

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Анотація, зміст	05.12.24	
2	Вступ	10.10.24	
3	Порівняльний аналіз технічних рішень	20.10.24	
4	Матеріали і методи досліджень	30.10.24	
5	Моделювання гідродинаміки потоку в бісерному млинні	03.11.24	
6	Проведення експериментальних досліджень	09.11.24	
7	Результати досліджень та їх пояснення	11.11.24	
8	Застосування результатів	20.11.24	
9	Техніко-економічне обґрунтування	22.11.24	
10	Безпека життєдіяльності та охорона праці	25.11.24	
11	Висновки	28.11.24	
12	Списки використаної літератури	01.12.24	
13	Презинтація	5.12.24	

Здобувач

(підпис)

Максим КАСИЮК

Керівник роботи

(підпис)

Олександр ГАВВА

Вступ. Метою дослідження є визначення впливу конструктивних і режимних параметрів роботи бісерного млина на продуктивність і якість руйнування клітин дріжджів.

Матеріали і методи. Досліджується руйнування клітин дріжджів. Експериментальні дослідження проводилися на лабораторному бісерному млині при швидкості обертання ротора 1350 об/хв з використанням бісеру розміром 0,6–0,8 мм. Оцінювання руйнування клітин здійснювалося за допомогою цифрового мікроскопу. Імітаційне моделювання взаємодії робочих оргнаїв з робочими тілами та суспензією виконано в програмному середовищі ANSYS.

Результати. Ступінь зруйнованості клітин дріжджів визначено за допомогою мікроскопії. Візуальний аналіз показав, що через 8 хвилин руйнування понад 85% клітин зазнали повного руйнування. Основними ознаками руйнованості були втрата цілісності клітинної стінки, деформація морфологічної структури та вихід внутрішньоклітинних компонентів у середовище.

Запропоновано використовувати робочі диски із висічками під кутом 60° , максимальна інтенсивність турбулентності спостерігається в центральній зоні робочої камери, поблизу поверхні дисків.

Максимальна ефективність руйнування досягається при використанні бісеру діаметром 0.6–0.8 мм та швидкості обертання ротора 1350 об/хв. Подальше збільшення часу руйнування понад 8 хвилин незначно впливає на ступінь руйнованості, але збільшує енерговитрати.

Висновок. Рекомендовано використовувати робочі оргнани бісерного млина у вигляді дисків із виточеними променеподібними або спіралеподібними пазами. За рахунок цього збільшується площа контакту бісеру з диском і, відповідно, інтенсивність циркуляції.

Ключові слова: бісерний млин, клітини, дріжджі, руйнування, лізис, енергоспоживання, продуктивність.

Abstract

Introduction. The purpose of this study is to determine the influence of structural and operational parameters of a bead mill on the productivity and quality of yeast cell disruption.

Materials and Methods. The study focuses on the disruption of yeast cells. Experimental research was conducted using a laboratory bead mill operating at a rotor speed of 1350 rpm with beads of 0.6–0.8 mm in diameter. Cell disruption was evaluated using a digital microscope. Simulation modeling of the interaction between the working organs, grinding media, and suspension was performed in the ANSYS software environment.

Results. The degree of yeast cell disruption was determined using microscopy. Visual analysis showed that after 8 minutes of grinding, more than 85% of the cells were completely disrupted. Key signs of disruption included the loss of cell wall integrity, deformation of the morphological structure, and the release of intracellular components into the medium.

It was proposed to use working discs with angle 60° . Maximum turbulence intensity was observed in the central zone of the working chamber near the surface of the discs. Maximum grinding efficiency was achieved using beads with a diameter of 0.6–0.8 mm and a rotor speed of 1350 rpm. Further increases in grinding time beyond 8 minutes had minimal impact on the degree of cell disruption but led to higher energy consumption.

Conclusion. It is recommended to use bead mill working organs in the form of discs with radial or spiral grooves. This design increases the contact area between the beads and the disc, thereby enhancing circulation intensity.

Keywords: bead mill, cells, yeast, disruption, lysis, energy consumption, productivity.

ЗМІСТ

Розділ 1. Порівняльний аналіз технічних рішень	8
1.1 Класифікація руйнування біологічних матеріалів	8
1.1.1 Механічні методи руйнування клітин	8
1.1.2 Фізико-хімічні методи	12
1.1.3 Ензиматичні методи	13
1.2. Опис конструкцій бісерних млинів	15
1.3. Анвіліз виробників бісерних млинів	24
1.4 Аналіз виробників обертових тіл	35
1.5 Методи визначення зруйнованості клітини	41
1.6 Кінетика руйнування клітини	43
1.7 Висновки та задачі досліджень	44
РОЗДІЛ 2. Матеріали і методи досліджень	45
2.1. Об'єкт і предмет досліджень	45
2.2. Лабораторна база і дослідна установка	45
2.3. Матеріали для досліджень та підготовка зразків	46
2.3.1 Біологічний об'єкт досліджень	46
2.3.2 Бісер для млина	47
2.3.3 Допоміжні речовини для дослідів	48
2.4 Порядок проведення експериментальних досліджень	48
2.5. Опис експериментального стенду	50
2.5.1. Опис робочої камери	51
2.6 Диференціальні рівняння моделі руйнування дріжджів	52
2.6.1 Початкові та граничні умови	52
2.6.3 Розв'язок системи диференціальних рівнянь	52
2.7 Обслуговування обладнання	53
2.8 План експерименту та обробка їх результатів	53
2.9 Методика імітаційного моделювання	55
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ПОЯСНЕННЯ	56
3.1 Визначення зруйнованості клітини	56
3.2. Вплив часу роботи бісерного млина на ступінь подрібненості дріжджів	58
3.3. Обробка та аналіз результатів досліджень імітаційного моделювання	63
3.3.1 Оптимальні умови руйнування	63
3.3.2 Імітаційне моделювання розподілення бісеру у вертикальному млині	65
3.3.3 Імітаційне моделювання розподілення бісеру у горизонтальному млині	67

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Гавва О.М.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Касинюк М.О.	<i>Назва, додаткова назва</i> Пояснювальна Записка	230641.ДП.01.001.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 6

РОЗДІЛ 4. Удосконалення конструкції бісерного млина	71
4.1 Опис конструкції бісерного млина	71
4.2 Модернізація горизонтального бісерного млина	72
4.3. Визначення конструктивних і режимних параметрів роботи удосконаленої конструкції бісерного млина	74
4.4 Аналіз моделювання руйнування дріжджів в горизонтальному бісерномук млині з запропонованим ротором	76
4.5 Розрахунок продуктивності млина	84
4.6 Розрахунок потужності приводу	84
4.7 Кінематичний розрахунок	86
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАН	88
РОЗДІЛ 6. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	91
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	93
ДОДАТКИ	96

РОЗДІЛ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІСНИХ РІШЕНЬ

1.1 Класифікація руйнування біологічних матеріалів

Надтонке руйнування клітин є важливим етапом у біотехнологічних та біомедичних дослідженнях, оскільки дозволяє вивільнити внутрішньоклітинні компоненти для подальшого аналізу або використання. Основні методи надтонкого руйнування клітин включають:

1.1.1 Механічні методи руйнування клітин

Руйнування у бісерних млинах

Бісерний млин – це пристрій, у якому руйнування відбувається за рахунок зіткнення твердих частинок (бісеру) з клітинною суспензією. Млин має обертальний барабан, наповнений бісером (скляними, керамічними або металевими кульками) та матеріалом, що подрібнюється. Під час обертання барабану бісер рухається, створюючи зони високого зсуву, тертя та ударів, що призводять до розриву клітинних стінок і мембран.



Рисунок 1.1. Бісерний млин

[<https://tecsa.com.ua/uk/obladnannya-dlya-vyrobnyctva-lfm-i-sbs/zanuryvalnyj-bisernyj-mlyn-mill-ennium/>]

Процес руйнування:

- Підготовка суспензії: Клітини додаються до камери млина разом із рідиною, яка підтримує їх у суспензії.
- Запуск млина: Обертання ротора створює циркуляцію бісеру, який під дією сил тертя і ударів здійснює руйнування клітин.
- Контроль параметрів: Основні параметри, що впливають на ефективність процесу, включають швидкість обертання ротора, розмір і матеріал бісеру, час руйнування та температуру процесу.

- Розрив клітинних стінок: Під дією ударів і зсувних напружень відбувається руйнування клітинних стінок, що дозволяє вивільнити внутрішньоклітинні компоненти, такі як білки, нуклеїнові кислоти та інші біомолекули.
- Переваги руйнування в бісерному млині:
- Висока ефективність: Можливість руйнування великої кількості клітин за відносно короткий проміжок часу.
- Контрольований процес: Параметри роботи млина легко піддаються регулюванню для досягнення необхідного рівня руйнування.
- Відтворюваність: Результати можна відтворити з високою точністю, що важливо для досліджень та промислових процесів.

Виклики та недоліки:

- Перегрів: Процес може викликати нагрівання суспензії, що негативно впливає на збереження біологічної активності молекул. Для вирішення цієї проблеми використовують системи охолодження.
- Зношування бісеру: З часом бісер може зношуватись, змінюючи ефективність руйнування і потенційно забруднюючи зразок.
- Оптимізація параметрів: Для ефективного руйнування потрібно підбирати оптимальні значення швидкості обертання, розміру бісеру та інших характеристик. [1, 2, 3]

Після руйнування суспензія містить фрагментовані клітини та вивільнені компоненти. Подальші етапи включають центрифугування або фільтрацію для відокремлення потрібних речовин від залишків клітинного матеріалу.

Бісерні млини є незамінним інструментом для дослідників та промислових спеціалістів, забезпечуючи високу ефективність і точність руйнування клітин різного типу.

Гомогенізатори високого тиску

Гомогенізатор високого тиску працює на основі пропускання суспензії клітин під дуже високим тиском через вузький канал або щілину. Під час цього процесу клітини піддаються різким змінам тиску та зсувним силам, що призводить до розриву їхніх стінок і мембран.



Рисунок 1.2 Гомогенізатор високого тиску

[<https://tecsa.com.ua/uk/obladnannya-dlya-vyrobnychtva-lfm-i-sbs/zanuryvalnyj-bisernyj-mlyn-mill-ennium/>]

Процес руйнування:

- Завантаження клітинної суспензії: Суспензія, що містить клітини, подається у вхідний отвір гомогенізатора.
- Підвищення тиску: Насос створює тиск, який може досягати значень від 100 до 1500 бар залежно від моделі пристрою та потреб дослідження.
- Пропускання через вузький канал: Під високим тиском суспензія проходить через вузький отвір, створюючи високошвидкісні зони турбулентності.
- Розрив клітин: Різка зміна тиску, що виникає під час проходження через канал, створює високі зсувні напруження, які руйнують клітинні стінки та мембрани.
- Збір продукту: Подрібнена суспензія виходить з гомогенізатора і може бути додатково оброблена, наприклад, центрифугуванням для видалення клітинних залишків.

Особливості конструкції гомогенізатора високого тиску:

- Поршневий насос: Створює необхідний високий тиск для процесу.
- Гомогенізаційний клапан: Центральна частина, де відбувається пропускання суспензії через вузький канал.
- Система охолодження: Запобігає перегріву суспензії під час руйнування.
- Контрольні системи: Дозволяють регулювати тиск і температуру процесу для точного налаштування параметрів руйнування.

Переваги використання гомогенізатора високого тиску:

- Висока ефективність: Дозволяє подрібнювати великі обсяги клітин за короткий час.
- Збереження біологічної активності: Завдяки швидкому процесу та можливості охолодження вдається мінімізувати пошкодження біомолекул.
- Контроль процесу: Параметри тиску і температури можна легко регулювати, що дозволяє адаптувати процес для різних типів клітин.

Недоліки та виклики:

- Перегрів: Незважаючи на наявність систем охолодження, процес може викликати підвищення температури, що може вплинути на чутливі молекули.
- Енергоспоживання: Гомогенізатори високого тиску вимагають значної кількості енергії для створення необхідного тиску.
- Висока вартість: Таке обладнання зазвичай є дорожчим, ніж інші методи руйнування. [4,5,6,7]

Після обробки в гомогенізаторі високого тиску клітини подрібнюються настільки ефективно, що вивільнені біомолекули зберігають свою активність і придатні для подальшого аналізу. Суспензію можна легко розділити на фракції за допомогою центрифугування або ультрафільтрації для виділення специфічних компонентів.

Гомогенізація високого тиску є одним із найбільш універсальних методів для руйнування клітин, що забезпечує високий рівень контролю та ефективності процесу.

Ультразвуковий лізис

Ультразвуковий лізис – це метод механічного руйнування клітин, який використовує ультразвукові хвилі для створення зон високого тиску та кавітаційних бульбашок у рідині. Цей метод є одним із найбільш ефективних способів руйнування клітин для виділення внутрішньоклітинних компонентів, таких як білки, нуклеїнові кислоти та інші біомолекули.



Рисунок 1.3 Ультразвуковий гомогенізатор

[<https://ua.cnsientz.net/ultrasonic-homogenizer/ultrasonic-homogenizer-for-sample.html>]

Метод базується на використанні високочастотних звукових хвиль (зазвичай від 20 до 100 кГц), які створюють цикли високого і низького тиску у рідкому середовищі. Під час фаз низького тиску у рідині утворюються кавітаційні бульбашки, які під час фази високого тиску різко колапсують. Цей процес супроводжується вивільненням значної кількості енергії, яка створює мікрострумені та зсувні напруження. Вони, у свою чергу, руйнують клітинні мембрани і стінки.

Процес руйнування:

- Підготовка суспензії: Клітинна суспензія готується шляхом додавання клітин до відповідного буфера або рідини.
- Застосування ультразвуку: Спеціальний зонд або ультразвуковий пристрій передає звукові хвилі у суспензію.
- Створення кавітації: Утворюються і колапсують бульбашки, що призводить до утворення зон з високими зсувними силами.
- Руйнування клітин: Високі сили зсуву руйнують клітинні стінки та мембрани, вивільняючи внутрішньоклітинні компоненти у рідину.
- Особливості обладнання:
- Ультразвуковий зонд: Металевий стрижень, який безпосередньо контактує із суспензією і передає ультразвукові хвилі.
- Ультразвуковий генератор: Пристрій, що генерує високочастотні хвилі.
- Система охолодження: Дозволяє уникнути перегріву суспензії під час інтенсивного ультразвукового впливу.

Переваги ультразвукового лізису:

- Висока ефективність: Метод дозволяє руйнувати клітини різного типу (бактерії, дріжджі, водорості, клітини тварин).
- Швидкість: Ультразвуковий лізис зазвичай займає декілька хвилин, що значно прискорює процес підготовки зразків.
- Контрольованість процесу: Можливість регулювання частоти, амплітуди ультразвуку та часу обробки для досягнення оптимальних результатів.
- Збереження активності білків: При правильному підході до охолодження і регулювання параметрів процесу забезпечується мінімізація денатурації білків.

Недоліки та виклики:

- Перегрів: Процес може призводити до нагрівання суспензії, що негативно впливає на чутливі до температури молекули. Це можна контролювати шляхом використання імпульсного режиму або системи охолодження.
- Піноутворення: Утворення піни може знизити ефективність кавітації та потребує регулювання потужності ультразвуку.
- Знос обладнання: Тривале використання ультразвукового зонда може призвести до його зношування, що вимагає регулярної заміни або обслуговування.

Після обробки клітини розпадаються, і внутрішньоклітинні компоненти вивільняються у середовище. Наступні кроки зазвичай включають центрифугування для виділення цільових молекул та очищення зразків. [8,9]

1.1.2 Фізико-хімічні методи

Осмотичний шок

Осмотичний шок – це метод фізико-хімічного руйнування клітин, який використовує різку зміну осмотичного тиску для руйнування клітинних мембран. Цей метод є ефективним для лізису клітин, які мають менш міцні клітинні стінки, таких як клітини тварин та деяких бактерій. Він широко застосовується у біохімічних дослідженнях для виділення внутрішньоклітинних компонентів, таких як ферменти та інші білки. Метод базується на явищі осмосу – руху молекул води через напівпроникну мембрану з області з нижчою концентрацією розчинених речовин до області з вищою концентрацією. Під час осмотичного шоку клітини зазнають раптової зміни осмотичного тиску, що призводить до осмотичного набухання або зневоднення. Це може спричинити розрив клітинної мембрани та вивільнення внутрішньоклітинних компонентів.

Процес руйнування:

- Підготовка клітин: Клітини піддають попередньому інкубуванню у гіпертонічному розчині, що спричиняє вихід води з клітин і їх зневоднення.
- Швидкий перехід до гіпотонічного розчину: Після інкубації клітини різко переносять у гіпотонічний розчин, який має нижчу концентрацію розчинених речовин. Вода швидко проникає у клітини, що призводить до їх набрякання.
- Руйнування мембран: Різке збільшення об'єму клітин спричиняє розрив мембрани та вивільнення внутрішньоклітинних компонентів у навколишнє середовище.

Переваги осмотичного шоку:

- Простота методу: Процес не вимагає складного обладнання і може бути проведений за допомогою звичайних лабораторних реактивів.
- Збереження біологічної активності: Відсутність механічних зсувних сил та високих температур дозволяє зберегти активність білків та інших чутливих молекул.
- Мінімальний ризик забруднення: На відміну від механічних методів, немає ризику забруднення зразка залишками обладнання.

Виклики та обмеження:

- Застосовність: Метод ефективний переважно для клітин без жорстких клітинних стінок, таких як еукаріотичні клітини тварин. Для клітин з товстими стінками, таких як грибки або бактерії з грампозитивними клітинними стінками, метод зазвичай не підходить.
- Контроль процесу: Потрібен точний контроль концентрацій розчинів і часу експозиції, щоб уникнути пошкодження або недостатнього руйнування клітин.
- Ризик надмірного лізису: Занадто тривалий або агресивний вплив гіпотонічного середовища може призвести до втрати цільових молекул у навколишнє середовище.[10,11]

Після завершення осмотичного шоку клітинна суспензія містить вивільнені внутрішньоклітинні компоненти, які можна відокремити за допомогою

центрифугування або фільтрації. Отримані зразки використовуються для подальшого біохімічного аналізу або інших досліджень.

Використання детергентів:

Використання детергентів для руйнування клітин є одним із хімічних методів лізису, що ґрунтується на властивостях цих речовин руйнувати ліпідний бішар клітинних мембран. Цей метод є популярним завдяки його простоті та ефективності, особливо для роботи з клітинами, які не мають міцних клітинних стінок, таких як тваринні клітини, еукаріоти та деякі бактерії.

Детергенти – це поверхнево-активні речовини, що мають гідрофільні та гідрофобні ділянки. При додаванні до клітинної суспензії вони взаємодіють із ліпідним бішаром мембран, руйнуючи його структуру. Це призводить до дестабілізації та розпаду мембран, що вивільняє внутрішньоклітинні компоненти, такі як білки, нуклеїнові кислоти та інші молекули.

Детергенти використовуються для лізису клітин у протеоміці, де дослідники виділяють і аналізують білки. Також метод є важливим для підготовки мембранних білків до очищення, дослідження клітинних сигналів та підготовки зразків для різних біохімічних тестів.

Після обробки детергентами отримують однорідну суміш, у якій внутрішньоклітинні компоненти вивільнені у розчин. Суспензію можна центрифугувати або фільтрувати для подальшого очищення та виділення молекул, які цікавлять дослідників.[12]

1.1.3 Ензиматичні методи

- Ферментативний лізис:

Ферментативний лізис – це метод руйнування клітин, який використовує специфічні ферменти для руйнування компонентів клітинних стінок і мембран. Це один із найбільш делікатних методів лізису, що дозволяє зберегти внутрішньоклітинні компоненти у нативному стані, не піддаючи їх механічному або хімічному стресу.

Метод заснований на використанні ферментів, які специфічно руйнують компоненти клітинних стінок, сприяючи їх розриву та вивільненню внутрішньоклітинних молекул. Вибір ферменту залежить від типу клітин, які потрібно подрібнити:

- Лізоцим – використовується для розщеплення пептидоглікану в клітинних стінках бактерій.
- Целюлаза – застосовується для руйнування клітинних стінок рослинних клітин, що містять целюлозу.
- Хітиніаза – ефективна для руйнування клітин грибків та інших організмів, які містять хітин у клітинних стінках.
- Протеази – використовуються для руйнування білкових структур мембран і інших компонентів.[13]

Після ферментативного лізису клітинна суспензія містить внутрішньоклітинні компоненти, які вивільнені у буферний розчин. Цю суспензію можна піддати подальшій обробці, такій як центрифугування або фільтрація, для очищення та виділення потрібних молекул.

Ферментативний лізис є надзвичайно корисним для чутливих біологічних експериментів, де збереження нативних властивостей білків та інших молекул є критичним.

Вибір конкретного методу залежить від типу клітин, цілей дослідження та необхідного ступеня руйнування. Часто використовують комбінацію кількох методів для досягнення оптимальних результатів.

Висновки

Механічні методи руйнування виявилися найкращими для промислового використання завдяки високій продуктивності та універсальності. Такі методи, як руйнування в бісерних млинах або роторно-ударних пристроях, забезпечують ефективне руйнування клітинних структур і дозволяють масштабувати процес для великого обсягу сировини. Основним недоліком є високе енергоспоживання та можливе термічне пошкодження матеріалів.

Фізико-хімічні методи руйнування забезпечують високу ефективність у спеціалізованих процесах, де важливо зберегти біологічну активність продуктів (наприклад, білків або ферментів). Їх застосування доцільне в поєднанні з механічними методами для підвищення загальної ефективності, хоча висока вартість реагентів і складність утилізації є значними обмеженнями.

Ензиматичні методи руйнування є високоселективними і найкраще підходять для біотехнологічних виробництв, де потрібно зберегти специфічні біологічно активні компоненти. Їх основні переваги включають екологічність і низьке енергоспоживання, але тривалий час проведення процесу та висока вартість ферментів обмежують їх широке використання в промисловості.

Загалом, вибір методу руйнування залежить від специфіки сировини, цілей виробничого процесу та економічних факторів. Комбіновані підходи, що поєднують механічні та фізико-хімічні або ензиматичні методи, мають значний потенціал для підвищення ефективності руйнування біологічних матеріалів.

1.2 Опис конструкцій бісерних млинів

Бісерний млин пальцевого типу

Бісерний млин пальцевого типу, з точки зору руйнування клітин, є високоефективним обладнанням для механічного руйнування клітинних стінок з метою вивільнення внутрішнього вмісту. Це обладнання використовується для різних біотехнологічних і дослідницьких застосувань, де важливе отримання внутрішньоклітинних компонентів, таких як білки, ферменти, ДНК тощо.

Руйнування клітин у бісерному млині пальцевого типу базується на механічному впливі бісеру, що інтенсивно рухається всередині робочої камери під дією ротора з пальцями. Завдяки обертанню ротора, бісер активно перемішується та стикається з клітинами, що призводить до багаторазових ударів і розтирань. Це руйнує клітинні стінки і забезпечує вивільнення внутрішнього вмісту клітин.

Особливості конструкції, важливі для руйнування клітин:

- Робоча камера з пальцями: Створює додаткові точки зіткнення між бісером і клітинами, підвищуючи інтенсивність руйнування. Пальці забезпечують турбулентні потоки та рух бісеру у всіх напрямках, що сприяє рівномірному руйнуванню клітин.
- Різноманітність бісеру: Для руйнування клітин використовують дрібний бісер (наприклад, діаметром від 0,1 до 0,5 мм), щоб забезпечити більш щільне зіткнення та ефективне руйнування клітинних стінок.
- Регульована швидкість ротора: Дозволяє змінювати інтенсивність руйнування, що важливо для досягнення оптимального балансу між руйнуванням клітин і запобіганням перегріву, який може пошкодити цінні біологічні молекули.

Переваги для руйнування клітин:

- Висока ефективність лізису: Забезпечує ефективне руйнування навіть міцних клітинних стінок, таких як у дріжджів (*Saccharomyces cerevisiae*) та бактерій.
- Контрольована інтенсивність руйнування: Можливість налаштування параметрів дозволяє уникнути надмірного руйнування або денатурації білків.
- Рівномірність руйнування: Забезпечує однорідність руйнування клітин у зразку, що є критично важливим для повторюваності результатів.

Сфери застосування:

- Біотехнологічні процеси: Для екстракції ферментів і білків з мікроорганізмів.

- Лабораторні дослідження: З метою підготовки зразків для подальшого аналізу (наприклад, ПЛР, протеоміка).
- Фармацевтична промисловість: Для підготовки біологічних агентів і вакцин. [14]



Рисунок 1.4 Бісерний млин пальцевого типу
[\[https://www.ele-mix.com/bead-mill/pin-type-bead-mill.html\]](https://www.ele-mix.com/bead-mill/pin-type-bead-mill.html)

Бісерний млин вертикальний ЗТО

У вертикальному бісерному млині ЗТО руйнування відбувається завдяки швидкому обертанню ротора, що приводить у рух бісер усередині вертикально розташованої робочої камери. Частинки клітин, що вводяться в млин, стикаються з бісером, що активно рухається, піддаючись багаторазовим ударам, розтиранню та зсувним деформаціям. Це руйнує клітинні стінки, сприяючи вивільненню їх вмісту.

Особливості конструкції, важливі для руйнування клітин:

- Вертикальне розташування робочої камери: Таке розташування сприяє природному змішуванню та забезпечує більш рівномірний рух бісеру, що може підвищити ефективність руйнування.
- Ротор зі спеціальною конструкцією: Створює турбулентні потоки і забезпечує інтенсивне перемішування клітин і бісеру.
- Система охолодження: Важлива для підтримання стабільної температури під час процесу, щоб уникнути перегріву і пошкодження чутливих біологічних молекул.
- Варіативність розміру бісеру: Для ефективного руйнування клітин часто використовують дрібний бісер (0,1–0,5 мм), що дозволяє досягти більш щільного зіткнення та ефективного руйнування клітинних стінок.

Переваги вертикального млина ЗТО для руйнування клітин:

- Однорідне руйнування: Вертикальна конструкція сприяє рівномірному розподілу частинок у робочій зоні, що забезпечує однорідне руйнування клітин.
- Зменшення осідання бісеру: Завдяки вертикальному розташуванню камери, бісер менше осідає, що підтримує високу інтенсивність руйнування протягом усього процесу.
- Ефективне охолодження: Система охолодження допомагає уникнути небажаного нагрівання зразка, що може бути критично важливим для збереження функціональних властивостей білків та інших чутливих компонентів.

Отже, вертикальний бісерний млин ЗТО є ефективним інструментом для руйнування клітин, оскільки забезпечує високу інтенсивність і рівномірність процесу, дозволяючи отримати цінні внутрішньоклітинні компоненти з високою ефективністю.



Рисунок 1.5 Бісерний млин вертикальний ЗТО

[<https://www.zto.com.ua/product-category/biserni-mlyny/vertykalnyj-bisernyj-mlyn/>]

Бісерний млин вертикального типу

Бісерний млин вертикального типу – це спеціалізоване обладнання, призначене для тонкого руйнування та диспергування твердих частинок у рідкому середовищі. Завдяки своїй конструкції, вертикальний млин забезпечує високу ефективність та рівномірність руйнування і широко

застосовується у різних галузях промисловості, таких як хімічна, фармацевтична, косметична та біотехнологічна.

Конструкція вертикального бісерного млина:

- Вертикальна робоча камера: Основна робоча зона млина, у якій відбувається перемішування та руйнування матеріалу. Вертикальне розташування сприяє рівномірному розподілу бісеру та ефективному подрібненню.
- Ротор і статор: Забезпечують обертальний рух бісеру, створюючи високу турбулентність і зіткнення частинок, що призводить до інтенсивного руйнування.
- Бісер: Використовується як подрібнювальний середник, який може бути виготовлений з кераміки, скла або сталі. Розмір бісеру підбирається залежно від цільового розміру частинок та властивостей матеріалу.
- Система охолодження: Дозволяє підтримувати стабільну температуру в робочій зоні під час роботи, що важливо для процесів, де небажаний перегрів.
- Приводний механізм: Забезпечує обертання ротора та підтримку необхідної швидкості для руйнування.

Під час роботи млина ротор обертається, приводячи в рух бісер, який, у свою чергу, взаємодіє з частинками матеріалу. Під час зіткнення між бісером і частинками відбувається механічне руйнування твердих частинок завдяки ударному, стискувальному та зсувному впливу. Вертикальне розташування робочої камери сприяє природному змішуванню частинок, що забезпечує рівномірне руйнування по всьому об'єму.

Переваги вертикальних бісерних млинів:

- Рівномірність руйнування: Вертикальна конструкція сприяє рівномірному розподілу частинок у камері.
- Висока продуктивність: Ефективне використання бісеру та рівномірний рух частинок забезпечують швидке досягнення необхідного ступеня руйнування.
- Компактність: Вертикальна конструкція зазвичай займає менше місця, що полегшує інтеграцію обладнання у виробничі лінії.
- Ефективне охолодження: Завдяки природній циркуляції рідини у вертикальній камері легше підтримувати стабільну температуру під час роботи.



Рисунок 1.6 Бісерний млин вертикального типу
[<https://www.indiamart.com/proddetail/vertical-bead-mill-6297549730.html?mTd=1>]

Бісерний млин вертикальний Discus Intensive Rotor.

Вертикальний бісерний млин Discus Intensive Rotor є високоефективним обладнанням для механічного руйнування клітин, що дозволяє вивільняти внутрішньоклітинні компоненти, такі як білки, нуклеїнові кислоти та інші біомолекули. Завдяки інноваційній конструкції ротора та оптимізованій системі руйнування, цей млин забезпечує високу продуктивність і якість процесу.

Конструктивні особливості:

- Discus Intensive Rotor: Ротор спеціальної конструкції з додатковими елементами активації, що підвищують інтенсивність руйнування та ефективність процесу.
- Вертикальна робоча камера: Забезпечує рівномірний розподіл бісеру та продукту, що сприяє ефективному подрібненню клітин.
- Система охолодження: Використання високоефективних керамічних матеріалів з високою теплопровідністю підвищує охолодження камери руйнування, запобігаючи перегріву продукту та зберігаючи активність біомолекул.

Переваги для руйнування клітин:

- Висока ефективність лізису: Інтенсивний рух бісеру та оптимізована конструкція ротора забезпечують ефективне руйнування клітинних стінок, що сприяє вивільненню внутрішньоклітинних компонентів.

- Контроль температури: Ефективна система охолодження дозволяє підтримувати оптимальну температуру під час процесу, запобігаючи денатурації чутливих біомолекул.
- Гнучкість у виборі розміру бісеру: Система дозволяє використовувати бісер діаметром до 0,3 мм, що підходить для руйнування різних типів клітин.

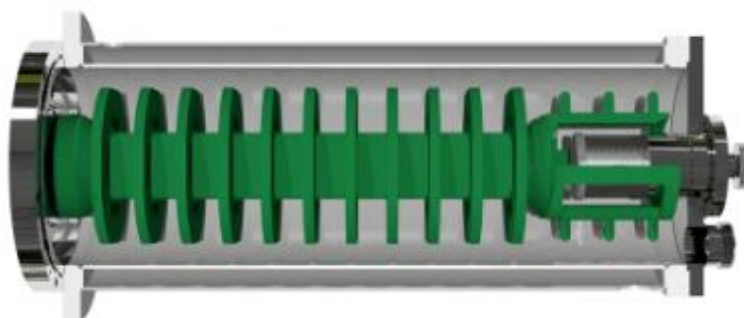


Рисунок 1.7 Вертикальний бісерний млин Discus Intensive Rotor
 [https://grinding.netzsch.com/en/news/2020/discus-intensive-a-quantum-leap-in-the-development-for-agitator-bead-mills-with-disk-agitators]

Бісерний млин горизонтальний DYNO

Горизонтальний бісерний млин DYNO-MILL є високоефективним обладнанням для механічного руйнування клітин, що дозволяє вивільняти внутрішньоклітинні компоненти, такі як білки, нуклеїнові кислоти та інші біомолекули. Завдяки своїй конструкції та технологічним особливостям, цей млин широко використовується в біотехнологічних та фармацевтичних галузях.

Конструктивні особливості:

- Горизонтальна робоча камера: Забезпечує рівномірний розподіл бісеру та продукту, що сприяє ефективному подрібненню клітин.
- Дисковий ротор DYNO®: Спеціально розроблений ротор з дисками, які створюють інтенсивний рух бісеру, підвищуючи ефективність руйнування.
- Система охолодження: Підтримує оптимальну температуру під час процесу, запобігаючи перегріву та зберігаючи активність біомолекул.

Переваги для руйнування клітин:

- Висока ефективність лізису: Інтенсивний рух бісеру та оптимізована конструкція ротора забезпечують ефективне руйнування клітинних стінок, що сприяє вивільненню внутрішньоклітинних компонентів.

- Контроль температури: Ефективна система охолодження дозволяє підтримувати оптимальну температуру під час процесу, запобігаючи денатурації чутливих біомолекул.
- Гнучкість у виборі розміру бісеру: Система дозволяє використовувати бісер різного діаметру, що підходить для руйнування різних типів клітин.



Рисунок 1.8 Горизонтальний бісерний млин DYNO-MILL

[<https://www.sieheindustry.com/productdetail/disc-type-horizontal-beads-mill?gadsourc=1&gclid=Cj0KCQiAoe5BhCNARIsADVLzZfnBeSJe8o1fG9a6gwrtdBs8D8t6pehAB8fOPkYc5C06tBH4sjPXZ0aAt7VEALwwcB>]

Занурювальний бісерний млин.

Занурювальний бісерний млин є сучасним обладнанням, призначеним для ефективного руйнування частинок у рідкому середовищі, що також використовується для руйнування клітинних стінок з метою вивільнення внутрішньоклітинних компонентів. Цей тип млина має свої конструктивні особливості, які роблять його зручним для застосування в лабораторних умовах та на невеликих виробничих лініях.

Конструктивні особливості:

- Занурювальна робоча камера: Камера з бісером занурюється у ємність з рідиною, яка містить клітинну суспензію, що дозволяє безпосередньо обробляти великі об'єми матеріалу.
- Ротор і статор: Внутрішня конструкція включає ротор, який обертається та перемішує бісер, створюючи інтенсивний рух, що сприяє подрібненню.
- Гнучка система охолодження: Занурювальний млин часто обладнаний системою охолодження, щоб уникнути перегріву зразка, що є важливим для збереження біологічної активності білків та інших чутливих молекул.

- Бісер: Використовується як подрібнювальний середник і може бути різного діаметру (0,1-2 мм), залежно від необхідного рівня руйнування.

Принцип роботи

- Занурювальний бісерний млин працює шляхом занурення робочої камери з бісером у ємність з клітинною суспензією. Під час обертання ротора бісер приводиться в рух, і частинки клітин стикаються з бісером, що призводить до механічного руйнування їхніх стінок. Це забезпечує ефективний лізис клітин для виділення внутрішньоклітинних компонентів.

Переваги для руйнування клітин:

- Висока ефективність руйнування: Завдяки інтенсивному руху бісеру забезпечується ефективне руйнування клітинних стінок.
- Простота використання: Занурювальна конструкція дозволяє легко працювати з різними об'ємами рідини та клітинної суспензії.
- Регульованість процесу: Можливість змінювати швидкість обертання ротора та вибір розміру бісеру дозволяють адаптувати процес під різні типи клітин.
- Збереження біологічної активності: Ефективна система охолодження допомагає підтримувати низьку температуру, що важливо для уникнення денатурації білків та інших біомолекул.



Рисунок 1.9 Занурювальний бісерний млин

[<https://hockmeyer.com/blog/articles/immersion-milling-quick-and-easy-2/>]

Бісерний млин дискового типу (горизонтальний).

Бісерний млин дискового типу (горизонтальний) є ефективним обладнанням для механічного руйнування клітин, що забезпечує високу інтенсивність лізису завдяки своїй конструкції. Він широко використовується в біотехнології та фармацевтиці для виділення внутрішньоклітинних компонентів, таких як білки, нуклеїнові кислоти та інші біологічні молекули. Конструктивні особливості:

- Горизонтальна робоча камера: Забезпечує стабільний та рівномірний розподіл бісеру і клітинної суспензії, що сприяє ефективному подрібненню.
- Дисковий ротор: Ротор з кількома дисками створює потужні турбулентні потоки та інтенсивний рух бісеру всередині камери, що значно підвищує рівень механічного впливу на клітини.
- Бісер різного розміру: Може бути виготовлений із кераміки, скла або сталі. Використання бісеру малого діаметра (0,1-0,5 мм) забезпечує ефективний контакт з клітинами та їх руйнування.
- Система охолодження: Дозволяє підтримувати оптимальну температуру під час руйнування, що є важливим для збереження біологічної активності виділених компонентів.

Переваги для руйнування клітин:

- Висока ефективність лізису: Завдяки інтенсивному руху бісеру і потужним потокам рідини забезпечується ефективне руйнування навіть міцних клітинних стінок.
- Рівномірність процесу: Дисковий ротор забезпечує постійний контакт бісеру з клітинною суспензією, що сприяє однорідності руйнування.
- Контроль температури: Система охолодження допомагає підтримувати низьку температуру, щоб уникнути денатурації білків та інших біомолекул.
- Гнучкість налаштувань: Можливість регулювання швидкості обертання ротора та розміру бісеру дозволяє адаптувати процес під різні типи клітин та вимоги до руйнування.



Рисунок 1.10 Бісерний млин дискового типу
[\[https://www.farfly.com/shop/fwe-horizontal-sand-mill\]](https://www.farfly.com/shop/fwe-horizontal-sand-mill)

Бісерний млин барабанного типу

Бісерний млин барабанного типу – це специфічний вид млина, що використовується для тонкого руйнування частинок у рідкому середовищі,

включаючи механічне руйнування клітин для виділення їх внутрішнього вмісту. Його конструкція та принцип роботи відрізняються від інших видів бісерних млинів і забезпечують певні переваги та обмеження при роботі з біологічними матеріалами.

Конструктивні особливості

- Барабанна камера: Основна робоча зона млина, у якій відбувається перемішування суспензії та руйнування клітин за допомогою бісеру. Камера обертається, створюючи потужний механічний вплив на клітинну суспензію.
- Бісер: Використовується як подрібнювальний середник, що може бути виготовлений із кераміки, скла або сталі. Розмір бісеру підбирається залежно від типу клітин, що підлягають подрібненню.
- Система охолодження: Барабанні млини можуть бути обладнані системою охолодження для запобігання перегріву матеріалу під час тривалого процесу руйнування.
- Мотор і привід: Забезпечують обертання барабана з потрібною швидкістю для досягнення оптимальної інтенсивності руйнування.

Переваги для руйнування клітин

- Простота конструкції: Барабанні млини мають порівняно просту будову, що полегшує обслуговування та налаштування.
- Можливість роботи з великими об'ємами: Завдяки місткості барабана млин підходить для обробки значних об'ємів клітинної суспензії.
- Відносна рівномірність руйнування: Обертальний рух забезпечує рівномірний розподіл бісеру та клітин у робочій камері.



Рисунок 1.11 Бісерний млин дискового типу
[<https://www.retsch.com/products/milling/ball-mills/tm-500/>]

1.3 Аанвліз виробників бісерних млинів

NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH (Німеччина)

Компанія NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH пропонує різноманітні системи руйнування для різних галузей промисловості. Одними з основних систем є: дискова система Discus, система Zeta і штифтова система Macro.

Модельний ряд системи руйнування Discus Intensive Rotor:

Табл. 1.1

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм ³	Партії, л	Привід, кВт	Типовий прохід, кг/год
LabStar	0,75	1,5-5	3	5-50
Discus 4	3,6	10-100	7,5	18-180
Discus 30	26	100-500	22/30	70-750
Discus 60	54	200-1000	45	140-1500
Discus 150	150	500-2500	75/90	250-2500

Переваги:

- Низьке споживання енергії;
- Більш вузький розподіл часу перебування продукту в робочій камері;
- Високоєфективна система відділення тіл, що мелють;
- Надійне масштабування;
- Оптимальне охолодження продукту завдяки матеріалу NETZSCH-Ceram C, який використовується для внутрішньої поверхні розмельних камер;
- Можлива робота в режимі рециркуляції з високою пропускну здатністю. Крім того, можливе використання бісеру діаметром до 0,3 мм, а система відділення дозволяє працювати млину навіть при досягненні критичної концентрації тіл, що мелють, особливо для продуктів зі складною реологією.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання – системи NETZSCH відносяться до преміум-класу, що може бути суттєвим фінансовим бар'єром для невеликих компаній.
- Високі вимоги до обслуговування – складна конструкція млинів може вимагати регулярного технічного обслуговування та спеціалізованого персоналу для їх налаштування і підтримки в робочому стані.
- Витрати на експлуатацію – хоча системи енергоєфективні, у великих масштабах процесу можуть виникати додаткові витрати на охолодження і забезпечення рециркуляції матеріалів.
- Підвищені вимоги до умов експлуатації – системи потребують точного контролю параметрів процесу, таких як температура і вологість, що може бути складно забезпечити в певних умовах.

- Залежність від спеціалізованих витратних матеріалів – для максимальної ефективності необхідні певні типи тіл, що мелють, та специфічні матеріали для охолодження, які можуть бути дорогими або важкодоступними.

ЗТО (ЗТО) Завод технічного обладнання (Україна)

Компанія ЗТО (Завод технічного обладнання) пропонує широкий асортимент обладнання для руйнування і змішування, зокрема бісерні млини, які відомі своєю ефективністю в подрібненні та диспергуванні різних матеріалів.

Бісерні млини ЗТО забезпечують тонке руйнування та високу якість дисперсії продуктів завдяки використанню високоефективних систем млинів. Вони застосовуються в хімічній, фармацевтичній, лакофарбовій, косметичній та харчовій промисловості. Основні характеристики бісерних млинів від ЗТО:

Табл. 1.2

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
ВМ 5	5	10-50	7,5	0,3-1,5
ВМ 20	20	50-200	22	0,3-1,5
ВМ 50	50	100-500	45	0,3-1,5
ВМ 100	100	200-1000	75	0,3-1,5

Переваги:

- Висока ступінь руйнування, яка досягається за рахунок використання бісеру малого діаметра (від 0,3 мм);
- Ефективне охолодження робочої камери для запобігання перегріву продукту;
- Простота в обслуговуванні та заміні бісеру;
- Можливість роботи в режимах циркуляції та рециркуляції для підвищення продуктивності;
- Надійна та довговічна конструкція млинів, що забезпечує стабільну роботу протягом тривалого часу.

Недоліки:

- Обмеження у використанні для певних матеріалів з підвищеною абразивністю, що може зменшити термін служби обладнання;
- Підвищені вимоги до умов експлуатації, особливо у випадку роботи з високо в'язкими матеріалами;
- Можливі високі витрати на енергію при роботі з великими обсягами продукції.

INOUE MFG., INC. (Японія)

Компанія INOUE MFG., INC. (Японія) спеціалізується на виробництві промислового обладнання для змішування, руйнування та диспергування. Вона пропонує широкий спектр обладнання для хімічної, фармацевтичної, харчової та інших галузей промисловості, зокрема бісерні млини для тонкого руйнування та диспергування матеріалів.

Бісерні млини INOUE забезпечують високу ефективність у процесах руйнування різних типів матеріалів, використовуючи бісер малого діаметра для досягнення рівномірної та тонкої дисперсії. Ці млини відомі своєю надійністю та продуктивністю в багатьох промислових застосуваннях.

Основні характеристики бісерних млинів INOUE:

Табл. 1.3

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
IM-1	1,5	5-50	3	0,1-1,0
IM-10	10	50-300	15	0,1-1,0
IM-50	50	200-1000	37	0,1-1,0
IM-100	100	500-2000	55	0,1-1,0

Переваги:

- Висока ступінь руйнування — бісер малого діаметра дозволяє досягати високої однорідності продукту та рівномірної дисперсії.
- Надійне охолодження робочої камери для підтримки стабільної температури, що особливо важливо при роботі з термочутливими матеріалами.
- Робота у режимі рециркуляції для підвищення продуктивності.
- Міцна конструкція, яка забезпечує тривалу експлуатацію та мінімальні витрати на обслуговування.
- Широкий спектр застосувань у хімічній, фармацевтичній, харчовій та лакофарбовій промисловості.

Недоліки:

- Високі капітальні витрати на придбання обладнання, що може бути перешкодою для невеликих підприємств.
- Енергетичні витрати можуть бути значними при роботі з великими обсягами продукції.
- Спеціалізовані витратні матеріали, такі як високоякісний бісер, можуть бути дорогими та вимагати частих заміन.

Oliver+Batlle (Іспанія)

Oliver+Batlle — це провідний виробник обладнання для процесів руйнування, змішування та дозування, яке використовується у хімічній, фармацевтичній, лакофарбовій та інших галузях промисловості. Компанія пропонує широкий асортимент бісерних млинів, які забезпечують високу продуктивність і якість руйнування.

Бісерні млини Oliver+Batlle спеціально розроблені для забезпечення максимальної ефективності у процесах диспергування і руйнування матеріалів з високою в'язкістю та складною реологією.

Основні характеристики бісерних млинів:

Табл. 1.4

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм ³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
Millennium RS 2	2	10-150	7,5	0,3-1,2
Millennium RS 5	5	50-300	15	0,3-1,2
Millennium RS 50	50	200-1000	45	0,3-1,2
Millennium RS 100	100	500-2000	75	0,3-1,2

Переваги:

- Висока ефективність руйнування: Системи забезпечують тонке і рівномірне руйнування завдяки високій якості бісеру і стабільному розподілу енергії.
- Широкий спектр застосуван: Підходять для диспергування пігментів, хімічних речовин, косметики та інших матеріалів.
- Надійне охолодження: Спеціальні системи охолодження робочої камери запобігають перегріву продукту під час руйнування.
- Гнучкість у використанні: Обладнання може працювати в різних режимах (циркуляції або рециркуляції), що дає можливість досягти більшої продуктивності при мінімальних витратах часу.
- Міцна конструкція: Високоякісні матеріали забезпечують тривалу експлуатацію обладнання та мінімальні витрати на обслуговування.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання, що може обмежити доступ для менших компаній.
- Вимоги до спеціалізованого персоналу для обслуговування і налаштування систем.
- Витрати на експлуатацію можуть зрости при обробці великих партій матеріалів через енергетичні потреби обладнання.

VMA-GETZMANN GMBH (Німеччина)

Компанія VMA-GETZMANN GmbH (Німеччина) спеціалізується на виробництві обладнання для змішування, диспергування та руйнування, яке застосовується в різних галузях промисловості, включаючи хімічну, фармацевтичну, харчову та косметичну. Особливу увагу компанія приділяє розробці високоефективних бісерних млинів для тонкого руйнування та диспергування матеріалів.

Бісерні млини VMA-GETZMANN забезпечують точне руйнування і рівномірну дисперсію матеріалів завдяки інноваційним технологіям і широким можливостям налаштування під різні типи продуктів.

Основні характеристики бісерних млинів:

Табл. 1.5

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм ³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
TML 1	1	5-50	3	0,2-1,5
TML 5	5	50-300	11	0,2-1,5
TML 10	10	100-500	22	0,2-1,5
TML 50	50	300-1500	45	0,2-1,5

Переваги:

- Точне руйнування та дисперсія: Завдяки використанню бісеру малого діаметра та високій швидкості обробки забезпечується рівномірне руйнування матеріалів з високою однорідністю.
- Гнучкість застосування: Млини підходять для широкого спектра матеріалів — від низьков'язких до високов'язких продуктів, таких як фарби, пігменти та хімічні речовини.
- Ефективне охолодження: Млини оснащені системами охолодження робочої камери, що дозволяє працювати з термочутливими матеріалами без ризику перегріву.
- Легкість у використанні: Системи інтуїтивні та легкі у налаштуванні, що забезпечує простоту експлуатації навіть для некваліфікованого персоналу.
- Надійна конструкція: Використання високоякісних матеріалів гарантує довговічність обладнання та зменшення витрат на обслуговування.

Недоліки:

- Високі інвестиційні витрати: Як і більшість високотехнологічного обладнання, бісерні млини VMA-GETZMANN вимагають значних початкових інвестицій.
- Витрати на обслуговування: Незважаючи на довговічність, складні системи охолодження та руйнування можуть потребувати регулярного обслуговування і заміни деталей.
- Високі енергетичні витрати при обробці великих обсягів матеріалів або при роботі з високов'язкими продуктами.

Bühler (Німеччина)

Bühler— це глобальна компанія, яка спеціалізується на виробництві обладнання для харчової промисловості, технологій руйнування, а також рішень для хімічної та фармацевтичної галузей. Зокрема, компанія пропонує широкий асортимент бісерних млинів, які відомі своєю продуктивністю та ефективністю в процесах руйнування і диспергування.

Бісерні млини компанії Bühler розроблені для тонкого руйнування і високоякісної дисперсії матеріалів. Вони широко використовуються в хімічній, фармацевтичній, лакофарбовій та косметичній промисловостях. Основними моделями є бісерні млини Centex і MicroMedia, що вирізняються високою ефективністю і надійністю.

Основні характеристики бісерних млинів:

Табл 1.6

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
Centex S2	2	50-500	11	0,3-1,5
Centex S4	5	100-1000	22	0,3-1,5
MicroMedia X1	1	5-50	4	0,05-0,5
MicroMedia X10	10	100-1000	30	0,05-0,5

Переваги:

- Максимальна ефективність руйнування: Використання бісеру малого діаметра (до 0,05 мм у моделях MicroMedia) дозволяє досягти надзвичайно тонкої дисперсії та високої однорідності продукту.
- Інноваційні системи охолодження: Спеціальна система охолодження робочої камери запобігає перегріву під час роботи, що особливо важливо при обробці термочутливих матеріалів.
- Гнучкість в налаштуванні: Млини легко адаптуються до різних типів матеріалів, забезпечуючи оптимальні результати як для низьков'язких, так і для високоабразивних продуктів.
- Висока продуктивність: Системи можуть працювати в режимах циркуляції та рециркуляції, що дозволяє підвищувати продуктивність при мінімальних енерговитратах.
- Економія енергії: Завдяки вдосконаленим технологіям, млини споживають менше енергії порівняно з традиційними системами руйнування.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання: Інноваційні рішення, такі як бісерні млини від Bühler, вимагають значних інвестицій, що може бути обмежувальним фактором для малих та середніх підприємств.
- Складність обслуговування: Устаткування потребує кваліфікованого персоналу для регулярного технічного обслуговування та налаштування.
- Підвищені витрати на бісер: Деякі типи бісеру, зокрема для моделей MicroMedia, можуть бути дорогими, що впливає на загальні витрати.

Royal Duyvis Wiener (Нідерланди)

Компанія Royal Duyvis Wiener спеціалізується на виробництві обладнання для обробки какао та кондитерської продукції, включаючи руйнування, змішування і коншування. Особливої уваги заслуговують млини для руйнування какао, які широко застосовуються в кондитерській промисловості.

Млини Royal Duyvis Wiener розроблені для руйнування какао-бобів, перетворюючи їх у високоякісні какао-продукти, такі як какао-масло, какао-порошок і шоколад. Вони забезпечують високу ефективність та точність у процесі руйнування, що є критично важливим для отримання однорідної текстури продукту.

Основні характеристики млинів для какао:

Табл. 1.7

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм³	Партії, л	Привід, кВт	Застосування
Wiener Ball Mill W-85	500	500-2000	75	Руйнування какао-бобів
Wiener Ball Mill W-105	1000	1000-4000 1000-4000	90	Руйнування какао-маси
Horizontal Ball Mill	1500	1500-6000	110	Руйнування шоколаду та какао

Переваги:

- Висока точність руйнування: Млини забезпечують однорідну текстуру какао-продуктів, що є ключовим для отримання високоякісного шоколаду та інших кондитерських виробів.
- Ефективне управління температурою: Завдяки вбудованим системам охолодження під час руйнування, млини запобігають перегріву продукту, зберігаючи його органолептичні властивості.
- Висока продуктивність: Млини здатні обробляти великі об'єми какао-бобів і какао-маси, що дозволяє працювати у промислових масштабах.

- Надійність: Використання високоякісних матеріалів і технологій забезпечує довгий термін експлуатації обладнання при мінімальних витратах на технічне обслуговування.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання: Млини для какао від Royal Duyvis Wiener потребують значних капітальних інвестицій, що може бути складним для невеликих виробників.
- Складність експлуатації: Обладнання потребує кваліфікованого персоналу для належної експлуатації та обслуговування, що може збільшити витрати на персонал.
- Високі енергетичні витрати: Через обробку великих обсягів продукту млини можуть споживати багато енергії, що впливає на операційні витрати.

Metso (Фінляндія)

Metso Outotec — це провідний світовий виробник обладнання для гірничодобувної, металургійної та переробної промисловості. Одним із ключових продуктів компанії є HIGmill — високоефективний бісерний млин для тонкого та надтонкого руйнування матеріалів.

HIGmill розроблений спеціально для руйнування мінералів і використовується у гірничодобувній та металургійній промисловості для досягнення надтонкого руйнування. Ця технологія відома своєю енергоефективністю та високою продуктивністю, що робить її оптимальним вибором для великих промислових проектів.

Основні характеристики HIGmill:

Табл. 1.8

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
HIGmill H500	500	10-20	500	1,5-6,0
HIGmill H1500	1500	30-50	1500	1,5-6,0
HIGmill H3000	3000	50-100	3000	1,5-6,0
HIGmill H5000	5000	100-200	5000	1,5-6,0

Переваги:

- Енергоефективність: HIGmill використовує вертикальну конфігурацію з високою ефективністю енергії, що дозволяє знизити енергетичні витрати при великомасштабному подрібненні.

- Надтонке руйнування: Завдяки високій інтенсивності руйнування HIGmill здатний досягати надтонких розмірів частинок, що є критично важливим для мінеральної переробки.
- Компактність конструкції: Млин займає менше місця у порівнянні з традиційними горизонтальними млинами, що дозволяє оптимізувати виробничі площі.
- Гнучкість у використанні: Може бути використаний для різних матеріалів, включаючи мінерали з високою абразивністю.
- Надійність: Високоякісні матеріали і конструкція забезпечують тривалий термін служби обладнання та мінімальні витрати на обслуговування.

Недоліки:

- Висока вартість: Як і більшість високотехнологічного промислового обладнання, HIGmill вимагає значних капітальних інвестицій.
- Складність налаштування: Робота з надтонким руйнуванням може вимагати точних налаштувань та високої кваліфікації персоналу.
- Енергетичні витрати: Хоча HIGmill є енергоефективним, при великих обсягах виробництва енергетичні витрати все одно можуть бути високими.

Custom Milling and Consulting LLC (США)

Custom Milling and Consulting LLC— це компанія, що спеціалізується на виробництві обладнання для руйнування, диспергування та змішування для хімічної, фармацевтичної, харчової, косметичної та інших промислових галузей. Їх бісерні млини відомі своєю універсальністю та ефективністю у процесах руйнування різних матеріалів.

Бісерні млини компанії забезпечують високоякісне руйнування та диспергування за допомогою використання інноваційних технологій.

Основною моделлю є Supermill PLUS, яка відрізняється високою продуктивністю і точністю руйнування.

Основні характеристики бісерних млинів Supermill PLUS:

Табл. 1.9

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм ³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
Supermill PLUS SM4	4	50-300	11	0,3-1,5
Supermill PLUS SM10	10	100-500	22	0,3-1,5
Supermill PLUS SM25	25	200-1000	37	0,3-1,5
Supermill PLUS SM50	50	500-2000	55	0,3-1,5

Переваги:

- Висока ефективність руйнування: Можливість використання бісеру малого діаметра (від 0,3 мм) дозволяє досягати тонкої і рівномірної дисперсії.
- Гнучкість застосування: Млини можуть обробляти широкий спектр матеріалів, включаючи пігменти, фарби, наноматеріали та косметичні продукти.
- Ефективна система охолодження: Спеціальна система охолодження робочої камери забезпечує стабільну робочу температуру, що важливо при обробці термочутливих матеріалів.
- Легкість в експлуатації: Системи інтуїтивно зрозумілі та легко налаштовуються під конкретні вимоги процесу.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання: Придбання та налаштування інноваційного обладнання може бути дорогим для малих компаній.
- Складність у технічному обслуговуванні: Як і з будь-яким високотехнологічним обладнанням, необхідні регулярне технічне обслуговування та спеціалізовані запчастини.
- Енергетичні витрати: Обладнання може споживати значну кількість енергії, особливо при великомасштабному виробництві.

WAHAL ENGINEERS (Індія)

Wahal Engineers— це провідний виробник обладнання для диспергування, руйнування та змішування, яке застосовується в різних галузях промисловості, включаючи фармацевтичну, хімічну, харчову та косметичну. Одним з ключових продуктів компанії є бісерні млини, які забезпечують високоякісне руйнування та диспергування матеріалів.

Бісерні млини Wahal Engineers призначені для руйнування і диспергування матеріалів різної в'язкості, забезпечуючи точну обробку і рівномірний розмір частинок. Їх обладнання широко використовується для обробки фарб, пігментів, хімікатів та інших матеріалів, які потребують тонкого руйнування.

Основні характеристики бісерних млинів:

Табл. 1.10

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
Bead Mill WABM-4	4	50-200	7,5	0,3-2,0
Bead Mill WABM-10	10	100-500	15	0,3-2,0
Bead Mill WABM-25	25	200-1000	30	0,3-2,0
Bead Mill WABM-50	50	500-2000	55	0,3-2,0

Переваги:

- Гнучкість у використанні: Млини можуть працювати з різними матеріалами — від низьков'язких рідин до високов'язких продуктів, таких як фарби та пігменти.
- Висока якість руйнування: Можливість використовувати бісер малого діаметра (до 0,3 мм) для тонкого руйнування і досягнення рівномірного розміру частинок.
- Ефективна система охолодження: Спеціальна система охолодження забезпечує стабільну робочу температуру, що дозволяє працювати з чутливими до температури матеріалами.
- Простота в обслуговуванні: Конструкція млинів дозволяє легко виконувати технічне обслуговування та очищення.

Недоліки:

- Високі інвестиційні витрати: Як і більшість промислового обладнання, бісерні млини Wahal Engineers вимагають значних початкових інвестицій.
- Енергетичні витрати: Робота з великими обсягами матеріалів може призводити до високих енергетичних витрат.
- Необхідність у спеціалізованому персоналі: Для налаштування і обслуговування обладнання потрібен кваліфікований персонал.

ELE Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd (Китай)

ELE Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd — це відомий виробник обладнання для диспергування, руйнування і змішування, що спеціалізується на виробництві бісерних млинів та іншого обладнання для різних промислових галузей, таких як фармацевтика, хімія, лакофарбова, косметична і харчова промисловість.

Бісерні млини ELE призначені для високоякісного руйнування і рівномірної дисперсії матеріалів. Вони широко використовуються для обробки різних продуктів, таких як фарби, пігменти, хімічні речовини, наноматеріали та косметика.

Основні характеристики бісерних млинів:

Табл. 1.11

Модель	Об'єм розмельної ємності, дм ³	Партії, л	Привід, кВт	Діаметр бісеру, мм
ELE-EVM-5	5	50-200	11	0,1-2,0
ELE-EVM-10	10	100-500	22	0,1-2,0
ELE-EVM-30	30	200-1000	37	0,1-2,0
ELE-EVM-60	60	500-2000	55	0,1-2,0

Переваги:

- Висока продуктивність: Млини забезпечують ефективне руйнування та диспергування навіть найскладніших матеріалів завдяки використанню дрібного бісеру (від 0,1 мм).
- Ефективна система охолодження: Спеціальна конструкція охолодження дозволяє уникнути перегріву під час обробки термочутливих матеріалів.
- Універсальність: Підходять для різних матеріалів, від фарб і пігментів до наноматеріалів та косметичних продуктів.
- Економія енергії: Завдяки оптимізованому дизайну млини працюють з високою енергоефективністю, що знижує операційні витрати.

Недоліки:

- Високі початкові інвестиції: Придбання обладнання потребує значних фінансових витрат, особливо для невеликих компаній.
- Складність в обслуговуванні: Обладнання потребує регулярного технічного обслуговування і кваліфікованого персоналу для налаштування і роботи.
- Енергетичні витрати: Незважаючи на енергоефективність, при обробці великих обсягів продукції витрати на енергію можуть бути суттєвими.

1.4 Аналіз виробників обертових тіл

Sigmund Lindner GmbH (Німеччина)

Компанія Sigmund Lindner GmbH спеціалізується на виробництві та дистрибуції технічного скла та керамічного бісеру для різних промислових застосувань. Заснована у 1854 році, вона має багатий досвід і є одним з провідних виробників бісеру для млинів, який використовується в процесах руйнування та диспергування.

Компанія пропонує широкий асортимент технічного скла та керамічного бісеру, який застосовується в бісерних млинах для руйнування в хімічній, фармацевтичній, фарбовій, косметичній та інших галузях промисловості.

Основні види бісеру:

1. Скляний бісер:

- Призначений для застосування у млинах з невеликим та середнім об'ємом.
- Відрізняється високою зносостійкістю та хімічною інертністю.
- Використовується для руйнування невеликих партій матеріалів і досягнення високого ступеня дисперсії.

2. Керамічний бісер (Zirconium Silicate, Yttrium-stabilized Zirconium):

- Підходить для застосування в умовах високих навантажень та при подрібненні продуктів із високою абразивністю.
- Висока твердість і щільність забезпечують ефективне руйнування матеріалів навіть при важких умовах експлуатації.
- Можливість використання бісеру з малим діаметром (до 0,1 мм) для досягнення найтоншого руйнування.

Основні характеристики:

Табл. 1.12

Тип бісеру	Матеріал	Діаметр бісеру, мм	Щільність, г/см ³
Скляний бісер	Технічне скло	0,1-3,0	2,5
Zirconium Silicate	Кераміка (цирконієвий силікат)	0,6-2,5	4,0
Yttrium-stabilized Zirconium	Кераміка (цирконій стабілізований ітрієм)	0,1-3,0	6,0

Переваги:

- Висока зносостійкість і тривалий термін служби бісеру.
- Широкий асортимент діаметрів для різних застосувань.
- Хімічна інертність і стійкість до агресивних середовищ.

- Забезпечення високої ефективності руйнування та досягнення рівномірної дисперсії продукту.

Недоліки:

- Вартість керамічного бісеру вища порівняно зі скляним, що може впливати на загальні експлуатаційні витрати.

- Висока щільність керамічного бісеру може призводити до підвищених енергетичних витрат при роботі млинів.

Saint-Gobain ZirPro (Франція)

Компанія Saint-Gobain ZirPro є одним із провідних світових виробників керамічного бісеру, зокрема цирконієвого бісеру, який використовується в різних промислових галузях для руйнування та диспергування матеріалів.

Компанія пропонує продукцію, яка підходить для високонавантажених процесів, що включають обробку абразивних матеріалів.

Saint-Gobain ZirPro має великий досвід у виробництві високоякісного цирконієвого бісеру, який широко використовується в хімічній, фармацевтичній, лакофарбовій, косметичній промисловості, а також у виробництві наноматеріалів. Їхні продукти забезпечують ефективне руйнування завдяки високій щільності, зносостійкості та стійкості до агресивних хімічних середовищ.

Основні види бісеру:

1. Цирконієвий бісер (Zirconium Silicate):

- Використовується для руйнування середньоабразивних матеріалів.

- Має високу щільність і твердість, що забезпечує ефективне руйнування.

- Ідеально підходить для обробки пігментів, фарб, лаків та інших подібних матеріалів.

2. Бісер з цирконію, стабілізований ітрієм (Yttrium-stabilized Zirconium):

- Призначений для руйнування високоякісних і важкооброблюваних матеріалів, таких як керамічні суспензії, наноматеріали та фармацевтичні препарати.

- Висока щільність і твердість забезпечують надтонке руйнування навіть при важких умовах експлуатації.

3. Бісер на основі цирконію і церію (Cerium-stabilized Zirconium Beads):

- Забезпечує високі показники руйнування для високов'язких або абразивних матеріалів.

- Стійкий до механічних та хімічних пошкоджень.

Основні характеристики:

Табл. 1.13

Тип бісеру	Матеріал	Діаметр бісеру, мм	Щільність, г/см ³
Zirconium Silicate	Кераміка (цирконієвий силікат)	0,6–2,5	4,0

Yttrium-stabilized Zirconium	Кераміка (цирконієвий силікат)	0,1–3,0	6,0
Cerium-stabilized Zirconium Beads	Кераміка (цирконієвий силікат)	0,3–3,0	6,2

Переваги:

- Висока зносостійкість: Завдяки високій щільності та твердості, бісер має тривалий термін служби навіть у складних умовах експлуатації.
- Широкий асортимент розмірів: Компанія пропонує різні діаметри бісеру для точного налаштування процесу руйнування залежно від потреб клієнта.
- Хімічна інертність: Бісер є стійким до агресивних середовищ, що дозволяє використовувати його для обробки хімічно активних або корозійних матеріалів.
- Висока ефективність руйнування: Завдяки високій щільності, бісер забезпечує рівномірне руйнування і диспергування продуктів до найтонших частинок.

Недоліки:

- Висока вартість: Керамічний бісер, зокрема цирконієвий, коштує значно дорожче порівняно з іншими матеріалами, такими як скляний бісер, що може підвищити експлуатаційні витрати.
- Енергетичні витрати: Через високу щільність бісеру, його використання може призвести до збільшення витрат на енергію при подрібненні великих обсягів матеріалів.

Tosoh Corporation (Японія)

Tosoh Corporation — провідний виробник цирконієвого бісеру для руйнування і диспергування матеріалів у різних промислових галузях, таких як хімія, фармацевтика, лакофарбова промисловість, косметика та нанотехнології. Компанія спеціалізується на виробництві високоякісного цирконієвого бісеру, що використовується в інтенсивних процесах руйнування і диспергування, де необхідна максимальна ефективність і точність.

Основні види бісеру від Tosoh Corporation:

1. Yttria-stabilized Zirconia (YSZ):

- Матеріал: Цирконій, стабілізований оксидом ітрію (YSZ).
- Застосування: Використовується для руйнування та диспергування в умовах високих навантажень, таких як у хімічній, фармацевтичній та фарбовій промисловостях.
- Характеристики:

- Висока щільність і твердість дозволяють досягати ефективного руйнування твердих і абразивних матеріалів.

- Відмінна стійкість до зносу та тривалий термін служби.

2. Cerium-stabilized Zirconia (CSZ):

- Матеріал: Цирконій, стабілізований оксидом церію (CSZ).

- Застосування: Призначений для надтонкого руйнування і диспергування матеріалів у фармацевтичних і хімічних процесах, де потрібна максимальна однорідність.

- Характеристики:

- Висока зносостійкість і стійкість до агресивних хімічних середовищ.

- Відмінна стійкість до механічних пошкоджень.

Основні характеристики:

Табл. 1.14

Тип бісеру	Матеріал	Діаметр бісеру, мм	Щільність, г/см ³
Yttria-stabilized Zirconia	Цирконій, стабілізований ітрієм (YSZ)	0,1–3,0	6,0–6,1
Cerium-stabilized Zirconia	Цирконій, стабілізований церієм (CSZ)	0,1–3,0	6,2

Переваги:

- Висока зносостійкість: Завдяки високій щільності та твердості цирконієвий бісер від Tosoh забезпечує тривалий термін служби навіть у найбільш інтенсивних процесах руйнування.

- Широкий діапазон діаметрів: Tosoh пропонує бісер різних діаметрів, що дозволяє адаптувати процес руйнування до різних матеріалів і вимог до дисперсії.

- Висока ефективність руйнування: Бісер забезпечує рівномірне руйнування і високу ефективність, що дозволяє досягти найтонших частинок у процесах, де точність має вирішальне значення.

- Хімічна інертність: Висока стійкість до агресивних хімічних середовищ дозволяє використовувати бісер у хімічних процесах, де матеріали можуть мати високу реактивність.

Недоліки:

- Висока вартість: Як і інші високоякісні цирконієві матеріали, бісер від Tosoh може бути дорожчим порівняно з альтернативними матеріалами, такими як скляний бісер.

- Енергетичні витрати: Висока щільність бісеру може призвести до підвищених витрат на енергію, оскільки потрібна більша потужність для руйнування.

Ceroglass (США)

Ceroglass — це провідна компанія, яка постачає скляний і цирконієвий бісер для бісерних млинів. Продукція компанії використовується в різних галузях промисловості, включаючи руйнування та диспергування пігментів, фарб, хімічних речовин і косметичних продуктів. Ceroglass відома своїми рішеннями для високоякісного руйнування і диспергування завдяки широкому асортименту бісеру, що відповідає вимогам найрізноманітніших промислових процесів.

Основні види бісеру від Ceroglass:

1. Скляний бісер (Glass Beads):

- Матеріал: Високоякісне технічне скло.
- Застосування: Підходить для диспергування і руйнування в млинах з низькою та середньою в'язкістю. Використовується для руйнування пігментів, фарб, фармацевтичних препаратів та косметики.
- Характеристики:
 - Висока хімічна інертність.
 - Довготривала робота у млинах з низьким рівнем абразивності.
 - Економічне рішення для низько- і середньоінтенсивних процесів руйнування.

2. Цирконієвий бісер (Zirconium Silicate Beads):

- Матеріал: Цирконієвий силікат.
- Застосування: Використовується для руйнування матеріалів з високою абразивністю та високою в'язкістю. Підходить для диспергування пігментів, лакофарбових матеріалів та хімічних речовин.
- Характеристики:
 - Висока щільність забезпечує ефективне руйнування та довговічність у процесах з високим навантаженням.
 - Стійкість до зносу при роботі з абразивними матеріалами.

3. Цирконієвий бісер, стабілізований ітрієм (Ytria-stabilized Zirconia Beads):

- Матеріал: Цирконій, стабілізований ітрієм.
- Застосування: Призначений для руйнування та диспергування в умовах високих навантажень і високих вимог до точності руйнування. Підходить для обробки наноматеріалів, фармацевтичних продуктів та фарб.
- Характеристики:
 - Висока щільність та твердість забезпечують надтонке руйнування і тривалий термін служби.
 - Відмінна хімічна стійкість для роботи в агресивних середовищах.

Основні характеристики:

Табл. 1.15

Тип бісеру	Матеріал	Діаметр бісеру, мм	Щільність, г/см ³
Скляний бісер (Glass Beads)	Технічне скло	0,1–3,0	2,5

Zirconium Silicate Beads	Цирконієвий силікат	0,6–2,5	4,0
Yttria-stabilized Zirconia Beads	Цирконій, стабілізований ітрієм	0,1–3,0	6,0

Переваги:

- Висока хімічна інертність: Скляний і цирконієвий бісер не вступає в реакцію з більшістю матеріалів, що дозволяє використовувати його для руйнування хімічних речовин і фармацевтичних препаратів.
- Довговічність: Завдяки високій щільності та твердості, цирконієвий бісер забезпечує тривалий термін служби навіть у високонавантажених процесах.
- Рівномірність руйнування: Використання дрібного бісеру забезпечує досягнення надтонких частинок і рівномірної дисперсії продукту.
- Широкий діапазон розмірів: Великий вибір діаметрів бісеру дозволяє підлаштувати процес руйнування під конкретні потреби виробництва.

Недоліки:

- Вартість: Цирконієвий бісер, особливо стабілізований ітрієм, є дорожчим порівняно зі скляним, що може підвищити загальні витрати на процеси руйнування.
- Енергетичні витрати: Висока щільність цирконієвого бісеру може збільшити витрати на енергію при роботі з великими обсягами матеріалів або в умовах високого навантаження.

1.5 Методи визначення зруйнованості клітини

Для оцінки пошкодження клітинної стінки *Saccharomyces cerevisiae* після ультратонкого руйнування бісерним млином ми можемо використовувати кілька аналітичних методів, кожен із яких має різну чутливість, точність та практичну застосовність:

1. Світлова та електронна мікроскопія: Світлова мікроскопія є досить простим методом для виявлення грубих структурних змін у клітинній стінці. Для отримання більшої роздільної здатності використовуються трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ) та скануюча електронна мікроскопія (SEM). ТЕМ дозволяє спостерігати ультраструктурні деталі, такі як інвагінації клітинної мембрани та цілісність клітинної стінки, тоді як SEM надає детальну інформацію про поверхневу морфологію. Однак підготовка зразків для електронної мікроскопії є трудомісткою і може призводити до артефактів, що ускладнює інтерпретацію результатів, особливо для пошкоджених клітинних стінок[15].

2. Флуоресцентне фарбування: Такі методи, як фарбування калкофлуор білим, який зв'язується з компонентами клітинної стінки, або пропідій йодид, що використовується для виявлення порушених мембран, є більш швидкими та зручними. Їх можна поєднувати з флуоресцентною мікроскопією або проточною цитометрією. Пропідій йодид зазвичай застосовується для оцінки цілісності мембрани після механічного або хімічного руйнування[16].

3. Протокова цитометрія: Цей метод дозволяє швидко кількісно оцінити цілісність клітинної стінки та життєздатність у великих популяціях клітин. Протокова цитометрія у поєднанні з флуоресцентними барвниками може оцінювати пошкодження клітинної стінки шляхом вимірювання змін у проникності. Це дуже чутливий метод, що підходить для обробки великих обсягів зразків.

4. Тести на проникність: Вимірювання проникності клітин є непрямим способом оцінки цілісності клітинної стінки. Такі тести, як виключення метиленового синього барвника, можуть визначити, чи збереглася цілісність клітинної стінки після руйнування. Пошкоджена стінка дозволяє барвнику проникати всередину клітини, що свідчить про порушення цілісності. [17]

5. Біохімічні тести: Вивільнення внутрішньоклітинних біомолекул, таких як білки або нуклеїнові кислоти, також може свідчити про пошкодження клітинної стінки. Це зазвичай здійснюється шляхом вимірювання кількості білків або нуклеїнових кислот у зовнішньому середовищі після руйнування до прикладу ІФА тестування.[18]

6. Ензиматичні тести: Активність ферментів, що розщеплюють клітинну стінку, таких як зімолаза, може бути використана для вимірювання того, наскільки клітинна стінка залишається непошкодженою після руйнування. Ензиматичне розщеплення компонентів клітинної стінки, таких як глюкани, може дати кількісну оцінку ступеня пошкодження. [19]

Метод мікроскопії має численні переваги, які роблять його одним із найкращих способів дослідження руйнування клітин дріжджів. Основною перевагою є можливість візуалізації реальної структури клітин. Оптична мікроскопія дозволяє безпосередньо спостерігати за клітинами та оцінювати їх морфологію. Це дозволяє виявити фізичні ознаки руйнування клітинної стінки, такі як розриви, тріщини або деформації, що є ключовим показником ступеня пошкодження. Використання електронної мікроскопії, наприклад, скануючої або трансмісійної, надає змогу дослідникам бачити детальну ультраструктуру клітинної стінки та внутрішніх органел, що робить цей метод надзвичайно точним для визначення навіть найменших пошкоджень. Інші методи, як-от біохімічні тести, хоч і дозволяють оцінити загальну кількість вивільнених внутрішньоклітинних речовин, не дають інформації про індивідуальні клітини або розподіл руйнування в популяції.

Спектрофотометричні методи вимірюють лише непрямі показники руйнування клітин, не надаючи можливості бачити фізичний стан окремих клітин. Методи проточної цитометрії визначають життєздатність клітин, але не дають безпосередніх зображень і не показують ступеня пошкодження клітинної стінки.

Таким чином, мікроскопія є найкращим методом для дослідження руйнування клітин дріжджів, оскільки вона дозволяє отримати візуальну інформацію про морфологічні зміни, що є важливими для детальної оцінки ступеня пошкодження.

1.6 Кінетика руйнування клітини

Кінетика руйнування клітини в бісерному млині описує динаміку процесу руйнування клітинної стінки та виходу внутрішнього вмісту під впливом механічної дії. Цей процес залежить від низки факторів, які впливають на ефективність і швидкість руйнування клітин. Нижче розглянуто ключові фактори, що впливають на цей процес:

1. Розмір і матеріал бісеру: Один із найбільш важливих факторів – розмір бісеру. Дрібніший бісер забезпечує вищу поверхню контакту і сприяє більш ефективному руйнуванню клітин завдяки збільшенню числа зіткнень. Матеріал бісеру також важливий, оскільки від нього залежить міцність і щільність зіткнень. Найчастіше використовують бісер із силікату цирконію або оксиду алюмінію, які мають високу щільність і міцність.
2. Швидкість обертання млина: Швидкість обертання ротору впливає на кінетичну енергію бісеру та інтенсивність ударів об клітини. Зі збільшенням швидкості зростає кількість енергії, що передається клітинам, що призводить до ефективнішого руйнування. Однак надто висока швидкість може призводити до надмірного нагрівання, що може впливати на стан клітин та продуктів, що виділяються.
3. Тривалість обробки: Час перебування клітин у млині є критичним фактором. Чим довше триває обробка, тим більше клітин піддаються руйнуванню. Проте тривалість слід контролювати, щоб уникнути надмірного нагрівання або небажаних змін внутрішньоклітинних компонентів.
4. Концентрація клітин у суспензії: Щільність клітинного матеріалу впливає на взаємодію клітин з бісером. Вища концентрація клітин може зменшити ефективність руйнування через обмежену кількість контактів з бісером. Натомість занадто низька концентрація може бути неекономічною, оскільки енергія буде витрачатися неефективно.
5. В'язкість середовища: В'язкість середовища впливає на рух бісеру та ефективність передачі енергії до клітин. Більш в'язке середовище зменшує швидкість руху бісеру, що може знижувати ефективність руйнування. Оптимальна в'язкість забезпечує збалансоване переміщення бісеру та достатню кількість контактів.
6. Температура обробки: Під час процесу руйнування температура середовища може підвищуватися через механічну енергію, що виділяється. Підвищена температура може впливати на стабільність і структуру клітин, а також на якість отриманих біомолекул. Тому важливо контролювати температуру, щоб уникнути теплового пошкодження клітинного вмісту.
7. Гідродинаміка та конструкція млина: Гідродинаміка потоку всередині млина та конструктивні особливості (форма камери, розташування ротора і статора) також визначають ефективність руйнування клітин. Оптимальна конструкція дозволяє досягти більш рівномірного розподілу бісеру та клітин у середовищі, що покращує кінетику руйнування.

8. Характеристики клітинної стінки: Стійкість клітинної стінки залежить від виду та типу клітин. Наприклад, клітини дріжджів, такі як *Saccharomyces cerevisiae*, мають міцну клітинну стінку, що потребує вищої енергії для руйнування порівняно з іншими клітинами.

Комбінація цих факторів визначає кінетику руйнування клітини в бісерному млині. Вибір оптимальних параметрів обробки дозволяє досягти необхідного ступеня руйнування з урахуванням збереження функціональних властивостей виділених біомолекул. [20,21,22,23]

1.7 Висновки та задачі досліджень

У рамках даної роботи буде проведено всебічне дослідження руйнування клітин дріжджів у бісерному млині.

Необхідно глибше розуміння впливу конструкційних та режимних параметрів на продуктивність процесу і якість руйнування клітин.

Використання бісерного млина з різним діаметром бісеру дозволить оцінити ефективність передачі енергії та її вплив на кінетику руйнування клітин.

Методи мікроскопії будуть застосовані для візуального аналізу ступеня зруйнованості клітин і морфологічних змін, що відбуваються під час обробки. Це дозволить отримати об'єктивні дані щодо ефективності різних режимів роботи млина і визначити оптимальні умови для максимального вилучення внутрішньоклітинних компонентів.

Мета дослідження. Встановити вплив конструкційних та режимних параметрів роботи бісерного млина на продуктивність і якісні показники руйнування клітин дріжджів.

Задачі досліджень

1. Аналізувати стан наукової проблеми у світі та визначити шлях її вирішення.
2. Удосконалити методiku досліджень процесу руйнування клітин, зокрема, розробити методiku та провести імітаційне моделювання процесу взаємодії робочих оргнаїв, робочих тіл та клітинної суспензії у бісерному млині.
3. Розробити метод аналізу зруйнованості клітини на основі зображень після цифрової мікроскопії.
4. Доповнити теорію процесу руйнування клітин, зокрема, удосконалити математичну модель.
5. Удосконалити констукції бісерних млинів та надати рекомендації щодо вибору раціональних конструктивних та режимних параметрів їх роботи.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Об'єкт і предмет досліджень

Об'єкт дослідження: об'єктом дослідження є конструкційні та режимні параметри роботи бісерного млина.

Предмет дослідження:

- Бісерні млини.
- Кліни мікроорганзмів.
- Теорії руйнування.
- Методи визначення зруйнованості.
- Робочі органи бісерних млинів.
- Робочі тіла (бісер).
- Режим роботи бісерних млинів.
- Імітаційні моделі взаємодії робочих органів, робочих тіл та клітинної суспензії у бісерному млині.

Деталізовано предмети досліджень:

1. Процес механічного руйнування клітин дріжджів.
2. Конструктивні параметри бісерного млина (тип млина, розмір бісеру, матеріал бісеру, геометрія ротора).
3. Режимні параметри роботи бісерного млина (швидкість обертання, тривалість обробки, температура процесу).
4. Ефективність руйнування клітин і морфологічні зміни під час руйнування.
5. Продуктивність процесу руйнування та його енерговитрати.
6. Аналіз параметрів за допомогою імітаційного моделювання у програмному середовищі ANSYS, зокрема для оцінки розподілу турбулентності, механічного впливу бісеру та теплових ефектів.
7. Модельні мікроорганізми (дріжджі) як основний біологічний об'єкт дослідження.

2.2. Лабораторна база і дослідна установка

Дослідження виконували на базі лабораторії Національного університету харчових технологій, та компанії Хімлаборреактив, яка надала прилади та мікроскоп з вбудованою вебкамерою для аналізу результатів дослідження.

2.3. Матеріали для досліджень та підготовка зразків

2.3.1 Біологічний об'єкт досліджень

Дріжджові клітини, зокрема вид *Saccharomyces cerevisiae*, є одноклітинними еукаріотами, що належать до царства грибів.

Клітини мають чітку структуру, яка включає:

- Клітинна стінка: Зовнішній шар, який забезпечує механічну міцність і форму клітини. Вона складається переважно з полісахаридів, таких як β -глюкани та маннани, що утворюють матрицю, посилену білками.
- Плазматична мембрана: Ліпідний бішар, що відокремлює внутрішнє середовище клітини від зовнішнього і контролює транспорт речовин.
- Цитоплазма: Напіврідке середовище, що містить органели та інші внутрішньоклітинні компоненти.
- Ядро: Основний генетичний центр клітини, де міститься ДНК, обгорнута у ядерну мембрану.
- Мітохондрії: Органели, що відповідають за виробництво енергії у вигляді АТФ через процеси дихання.
- Вакуолі: Органели, що відіграють роль у зберіганні поживних речовин та регулюванні клітинного об'єму.
- Ендоплазматична сітка і апарат Гольджі: Відповідають за синтез і транспортування білків та інших молекул.
- Дріжджові клітини мають певні характеристики, які роблять їх ідеальними для досліджень руйнування:
- Чітка клітинна стінка: Її структура дозволяє вивчати процеси механічного руйнування і оцінювати ефективність різних методів лізису. Стійкість стінки до фізичних впливів є хорошим тестом для продуктивності обладнання.
- Однорідність розмірів і форми: Це спрощує стандартизацію експериментів та забезпечує надійні результати при використанні різних умов руйнування.
- Швидке розмноження: Дріжджі легко культивувати в лабораторних умовах, що дозволяє отримати достатню кількість біомаси для проведення серій експериментів.
- Важливість у біотехнології: Вони є модельним організмом для досліджень, тому їх використання у процесах руйнування дозволяє отримувати білки, ферменти, ДНК та інші біомолекули для подальших досліджень і промислових застосувань.
- Реагування на зовнішні впливи: Клітини дріжджів демонструють різні реакції залежно від умов руйнування, що дозволяє вивчати вплив змін у режимних і конструкційних параметрах роботи млина. [24, 25,26]

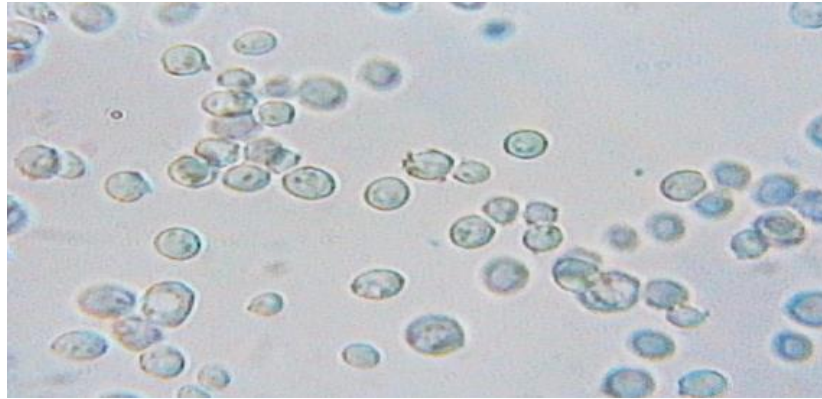


Рис. 2.1 *Saccharomyces cerevisiae*

2.3.2 Бісер для млина

Бісер для руйнування зазвичай виготовляється з різних матеріалів, таких як скло, кераміка, цирконієвий оксид або сталь. Вибір матеріалу залежить від вимог експерименту, типу клітин і потрібного ступеня руйнування. У нашому випадку для досліджень використовується скляний бісер розміром 0,1-0,5 мм, який має низку переваг для руйнування дріжджових клітин.

Малий розмір бісеру забезпечує високу щільність контакту з клітинами під час руйнування, що сприяє ефективному руйнуванню клітинних стінок. Такий розмір підходить для руйнування дрібних і середніх клітин, зокрема дріжджів, забезпечуючи рівномірне руйнування і високу продуктивність процесу. Скляний бісер відзначається хімічною інертністю, що гарантує його стійкість до хімічних реакцій і відсутність впливу на чистоту отриманих продуктів, що є важливим для досліджень з високими вимогами до чистоти зразків. Він також має достатню механічну міцність для збереження форми та функціональних властивостей під час багаторазового використання, а також є економічно вигідним, що робить його популярним вибором у лабораторних умовах.

Підготовка і використання бісеру

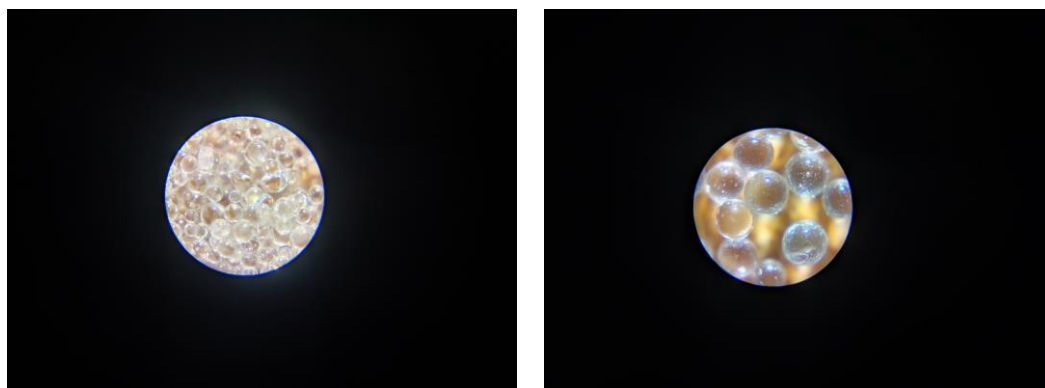
Перед використанням скляний бісер необхідно ретельно підготувати:

1. Промивання: Бісер промивають дистильованою водою або буферним розчином, щоб видалити залишки пилу чи домішок.

2. Стерилізація: Для запобігання контамінації зразків бісер стерилізують шляхом автоклавування або обробки етанолом.

3. Сушка: Після стерилізації бісер висушують, щоб запобігти його злипанню під час завантаження в млин.

Бісер розміром 0,1-0,5 мм забезпечує оптимальне співвідношення між швидкістю руйнування та ступенем руйнування клітин. Малий розмір бісеру створює велику кількість точок контакту, що збільшує ефективність передачі енергії і сприяє більш рівномірному подрібненню клітин.



**Рис. 2.2 Скляний бісер
(зображення отримано на мікроскопі для визначення якості
друку у лабораторії А-112 комп'ютерних технологій дизайну і
виготовлення упаковки)**

2.3.3 Допоміжні речовини для експериментальних досліджень

- Дистильована вода.

Дистильована вода є очищеною водою, з якої видалено всі домішки, солі та органічні речовини шляхом процесу дистиляції. Вона використовується для розведення дріжджів, щоб забезпечити чистоту експерименту та уникнути небажаних реакцій із сторонніми домішками, що можуть вплинути на результати дослідження.

- Метилловий синій.

Метилловий синій – це барвник, який використовується для підфарбування клітин після руйнування, щоб оцінити їхню цілісність під мікроскопом. Після обробки клітин барвником цілу клітини залишаються незабарвленими, тоді як пошкоджені або зруйновані клітини набувають синього кольору, що дозволяє легко визначати ефективність процесу лізису.

2.4 Порядок проведення експериментальних досліджень

1. Приготування суспензії клітин:

Дріжджові клітини суспендують у дистильованій воді до заданої концентрації. Це забезпечує оптимальні умови для руйнування у бісерному млині.

2. Підготовка бісерного млина:

Бісерний млин заповнюють скляним бісером розміром 0,1-0,5 мм. Перед завантаженням млина бісер стерилізують і висушують, щоб уникнути контамінації. Перевіряють справність млина та налаштовують його параметри.

3. Завантаження суспензії:

Підготовлену суспензію дріжджових клітин додають до камери млина разом із бісером. Камеру герметично закривають для запобігання витoku під час роботи.

4. Проведення руйнування:

Запускають млин, налаштовуючи режимні параметри відповідно до попередньо встановлених умов експерименту. Під час процесу відбувається механічне руйнування клітин за рахунок тертя та ударів між бісером і клітинами.

5. Контроль температури:

Під час руйнування контролюють температуру в камері, щоб уникнути перегріву, який може призвести до денатурації білків і пошкодження біомолекул.

6. Збирання зразків:

Після закінчення руйнування суспензію відокремлюють від бісеру шляхом фільтрації або центрифугування. Отриманий зразок готують для подальшого аналізу.

7. Аналіз цілісності клітин:

Для оцінки ефективності руйнування до частини зразка додають метиловий синій, що забарвлює пошкоджені клітини у синій колір. Підготовлений зразок розглядають під мікроскопом для визначення ступеня руйнування клітин.

8. Обробка результатів:

Результати руйнування аналізують, порівнюючи кількість цілих і пошкоджених клітин у зразку, а також проводять підрахунок ефективності процесу залежно від змінних параметрів, таких як час руйнування та швидкість обертання млина.

9. Повторні дослідження:

За потреби дослідження повторюють із різними режимними параметрами для оптимізації процесу руйнування та отримання даних для подальшого аналізу.

2.5. Опис експериментального стану

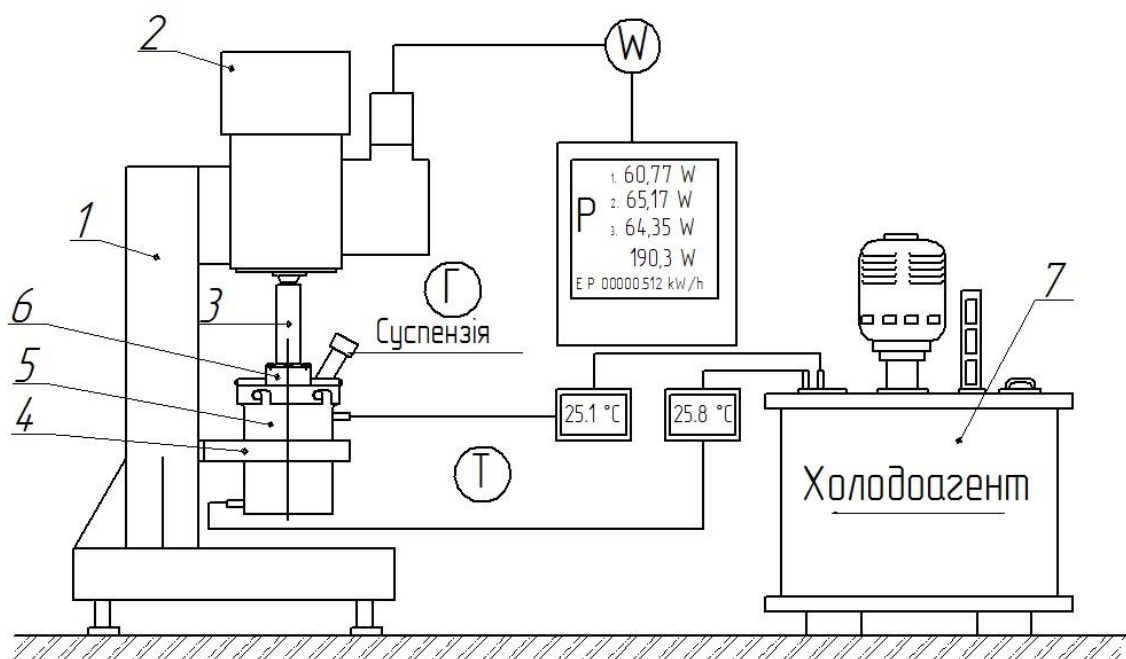


Рис.2.3 Експериментальний стенд – бісерний млин лабораторний.
1 – станина; 2 – двигун; 3 – пряма передача; 4 – зажим; 5 - стакан; 6 – кришка
стакану; 7 – циркуляційний насос.
W – вимірювання потужності мультиметром; T – вимірювання температури
термометром; Г – Забір проб скляною палочкою для досліду, під час
експерименту.

Експериментальний стенд представлений лабораторним бісерним млином, призначеним для дослідження руйнування клітин та аналізу впливу конструкційних і режимних параметрів. Стенд містить кілька основних компонентів, що забезпечують його ефективну роботу та контроль за процесом.

Основою конструкції є станина(1), яка забезпечує стійкість і надійність кріплення всіх компонентів під час роботи млина. Двигун(2) приводить у дію механізм руйнування за допомогою прямої передачі(3), що дозволяє передавати обертальний рух без використання проміжних шківів або пасів. Це сприяє підвищенню ефективності процесу руйнування та зменшенню втрат енергії.

Стакан(5), у якому знаходиться суспензія для руйнування разом із бісером, утримується за допомогою зажиму, що запобігає його переміщенню під час експерименту. Кришка стакану(6) забезпечує герметичність і безпеку, запобігаючи витоку суспензії. Для підтримання стабільної температури під час експерименту використовується циркуляційний насос(7), що циркулює охолоджувальну рідину (холодоагент) і запобігає перегріву зразків.

Система оснащена вимірювальними приладами, зокрема мультиметром для вимірювання потужності (W), що дозволяє фіксувати споживану електричну потужність під час роботи стану. Також є термометри для моніторингу температури (T) суспензії, що важливо для збереження біологічної активності зразків. Для зручності забору проб передбачено використання скляної палички (Г), що дозволяє відбирати зразки для досліду під час роботи млина без його зупинки.

Цей лабораторний стенд забезпечує комплексний підхід до дослідження впливу різних конструкційних і режимних параметрів на процес руйнування, дозволяючи контролювати ключові показники та проводити проміжні аналізи для точного оцінювання результатів експерименту.

2.5.1.Опис робочої камери

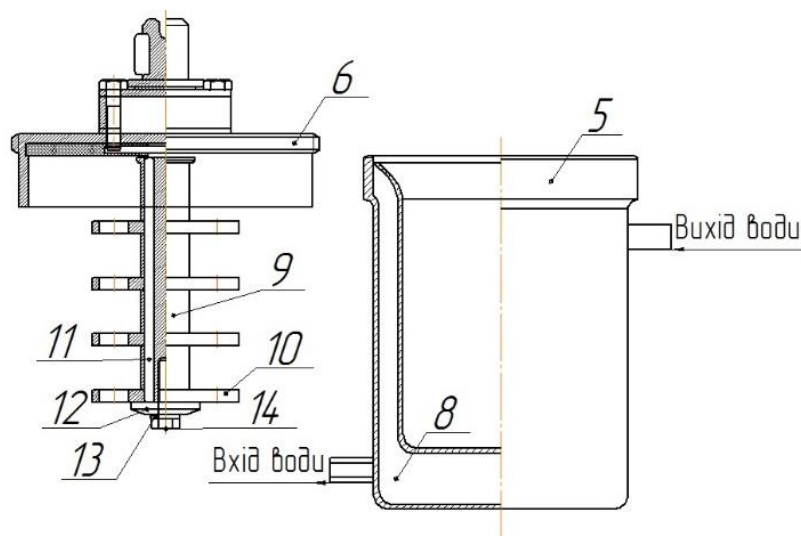


Рисунок 2.4 Робоча камера: 5 – стакан; 6 – кришка стакану; 8 – сорочка охолодження; 9 – вал; 10 – диски; 11 – шпонка; 12 – шайба; 13 – шайба Гровера; 14 – болт.

Робоча камера експериментального стану є ключовим елементом для проведення процесу руйнування в бісерному млині. Вона складається з робочого стакана (5), де знаходиться суспензія дріжджових клітин і бісер. Він дозволяє ефективно проводити процес руйнування, забезпечуючи належний контакт між бісером і клітинною суспензією.

Кришка (6) робочого стакана герметично закриває камеру, що запобігає витоку суспензії під час експерименту та забезпечує безпеку оператора. Вона також допомагає підтримувати стабільність робочого середовища, зберігаючи необхідні параметри під час процесу руйнування. Для ефективного охолодження камери передбачена сорочка охолодження (8), яка циркулює холодоагент і дозволяє уникнути перегріву суспензії, що важливо для збереження біологічної активності клітинних компонентів.

Вал (9) є центральним елементом, що приводить у дію диски (10), які безпосередньо відповідають за перемішування бісеру і суспензії. Диски забезпечують рівномірний розподіл енергії по всьому об'єму стакана, сприяючи ефективному руйнуванню клітинних стінок. Шпонка (11) використовується для фіксації дисків на валу, запобігаючи їх прокручуванню та забезпечуючи надійність роботи всієї системи.

Додаткові елементи, такі як шайба (12) і шайба Гровера (13), забезпечують додаткову стійкість і надійність з'єднання, запобігаючи ослабленню кріплень під час роботи. Болт (14) використовується для закріплення всіх компонентів, створюючи міцну конструкцію, що витримує навантаження під час процесу руйнування.

2.6 Диференціальні рівняння моделі руйнування дріжджів

Процес руйнування клітин дріжджів на бісерному млині може бути описаний системою диференціальних рівнянь, що враховують зміну концентрації різних фракцій клітинного матеріалу (цілі клітини, фрагменти клітин та вільні молекули) в часі.

Нехай:

$C(t)$ – концентрація цілих клітин в суспензії в момент часу t .

$F(t)$ – концентрація фрагментів клітин.

$M(t)$ – концентрація вільних молекул (білків, нуклеїнових кислот тощо).

Математична модель процесу надтонкого руйнування клітин дріжджів на бісерному млині дозволяє кількісно описати динаміку руйнування клітин та виділення внутрішньоклітинних компонентів. Використання цієї моделі сприяє оптимізації технологічних параметрів та підвищенню ефективності процесу, що є важливим для широкого спектру біотехнологічних застосувань.

Тоді процес руйнування можна описати такими рівняннями:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -k_1 C(t)B$$

$$\frac{dF(t)}{dt} = k_1 C(t)B - k_2 F(t)B$$

$$\frac{dM(t)}{dt} = k_2 F(t)B$$

де:

k_1 – константа швидкості руйнування цілих клітин.

k_2 – константа швидкості руйнування фрагментів клітин.

B – концентрація бісеру в суспензії.

2.6.1 Початкові та граничні умови

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь необхідно задати початкові умови. Нехай у початковий момент часу $t=0$:

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь необхідно задати початкові умови. Нехай у початковий момент часу $t=0$:

$$C(0) = C_0$$

$$F(0) = 0$$

$$M(0) = 0$$

C_0 – початкова концентрація цілих клітин у суспензії.

2.6.3 Розв'язок системи диференціальних рівнянь

Розв'язок системи рівнянь можна отримати шляхом інтегрування. Відокремлюючи змінні та інтегруючи перше рівняння, отримаємо:

$$C(t) = C_0 e^{-k_1 B t}$$

Підставляючи цей розв'язок у друге рівняння, отримаємо:

$$\frac{dF(t)}{dt} = k_1 C_0 e^{-k_1 B t} - k_2 F(t) B$$

Це рівняння можна розв'язати методом інтегрування по частинах або за допомогою чисельних методів. Аналогічно, третє рівняння розв'язується після підстановки розв'язку другого рівняння.

2.7 Обслуговування обладнання

Регулярне обслуговування обладнання є важливим етапом для забезпечення його надійної та ефективної роботи. У випадку бісерного млина, що використовується для руйнування дріжджових клітин, необхідно проводити періодичну перевірку та догляд за основними компонентами обладнання.

Перш за все, необхідно регулярно очищувати робочу камеру та стакан від залишків суспензії та бісеру. Після завершення кожного експерименту робочу камеру промивають дистильованою водою або спеціальним розчином для очищення, що запобігає накопиченню залишків і утворенню відкладень, які можуть впливати на точність подальших досліджень.

Особливу увагу слід приділяти перевірці та очищенню охолоджувальної сорочки, щоб уникнути блокування циркуляції холодоагенту. Підтримання ефективного охолодження є необхідним для

забезпечення стабільної температури під час експерименту, що впливає на результати руйнування.

Перевірка та обслуговування рухомих частин обладнання, зокрема валу, дисків та шпонок, є необхідними для уникнення зносу і пошкоджень. Рекомендується регулярно оглядати ці компоненти на предмет механічних дефектів та замінювати їх у разі виявлення зношування. Також слід змащувати рухомі частини у відповідності до інструкцій виробника, щоб запобігти їх заклинюванню і продовжити термін служби.

Двигун та система прямої передачі потребують періодичного огляду для перевірки рівня зносу і наявності можливих проблем з електричним живленням. Важливо контролювати справність електричних з'єднань та роботу вимірювальних приладів, таких як мультиметри для вимірювання потужності, щоб переконатися у правильності показань та відсутності відхилень.

2.8 План експерименту та обробка їх результатів

Основні етапи експерименту:

1. Підготовка обладнання та матеріалів:

- Очистка та стерилізація бісеру (скляного, розміром 0,1-0,5 мм).
- Підготовка дріжджової суспензії з необхідною концентрацією клітин.
- Налаштування бісерного млина та вимірювальних приладів (мультиметр, термометри).

2. Проведення серії експериментів:

- Експеримент проводиться з варіацією параметрів: швидкість обертання (1500 об/хв), тривалість процесу (1-15 хв), температура (контрольоване охолодження до 25°C).
- Експеримент проводиться тричі для забезпечення статистичної надійності результатів.

3. Відбір проб та аналіз:

- Проби відбираються під час кожного експерименту для оцінки ступеня руйнування клітин за допомогою метилового синього та мікроскопічного аналізу.
- Проводиться підрахунок пошкоджених і цілих клітин для визначення відсотка ефективності руйнування.

Обробка результатів

1. Обчислення середніх значень:

Після завершення кожної серії експериментів підраховуються середні значення відсотка пошкоджених клітин для кожного набору параметрів.

2. Розрахунок питомої енергії:

Обчислюється загальна питома енергія, що витрачається на руйнування, шляхом підставлення рівняння процесу (залежності потужності від часу) в інтегральний вираз.

3. Побудова графіків:

Побудова графіків залежності відсотка руйнування клітин від тривалості процесу. Це дозволяє візуально оцінити вплив кожного параметра на ефективність процесу.

Приклад обробки результатів:

Припустимо, що результати експерименту показали такі середні значення відсотка руйнування клітин:

Параметри експерименту	Результати обговорення
...	...
...	...
...	...

На основі отриманих даних можна зробити висновки про оптимальні параметри роботи бісерного млина, які забезпечують найвищу продуктивність і якість руйнування клітин.

2.9 Методика імітаційного моделювання

Метою моделювання є оцінка процесу механічного руйнування дріжджів у бісерному млині із дисковим валом, який працює на швидкості 1350 об/хв, використовуючи бісер діаметром 0,6–0,8 мм. Завдання полягає у визначенні впливу параметрів обладнання на ефективність руйнування клітин дріжджів. Для моделювання найкраще підходить **ANSYS**, який створюється 3D-модель робочої камери млина. Модель включає дисковий вал із точним відтворенням його геометрії, об'єм робочої зони, а також бісер і рідку суспензію дріжджів. Дисковий вал задається як об'єкт із заданою швидкістю обертання. Для опису руху бісеру й суспензії дріжджів використовується метод багатофазних потоків (метод Eulerian-Eulerian). Турбулентний рух моделюється з використанням моделей RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) або LES (Large Eddy Simulation), залежно від точності, необхідної для аналізу.

Результати моделювання включають:

- Поля швидкостей і тисків у робочій камері.
- Інтенсивність зіткнень бісеру між собою і з частинками клітин.
- Розподіл механічних напружень у суспензії дріжджів, що дозволяє оцінити ефективність руйнування клітин.

На основі отриманих даних проводиться оцінка параметрів роботи млина для оптимізації процесу руйнування дріжджів. Результати моделювання можна використовувати для налаштування експериментального обладнання, аналізу продуктивності або внесення змін у конструкцію бісерного млина.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ПОЯСНЕННЯ

3.1 Визначення зруйнованості клітини

Термін "зруйнованість клітини" відноситься до ступеня пошкодження клітинної структури в процесі обробки, такого як руйнування або механічне руйнування. У контексті руйнування за допомогою бісерного млина це означає розрив або деструкцію клітинної оболонки, що призводить до виходу внутрішнього вмісту клітини, включаючи цитоплазму та інші органели, у зовнішнє середовище.

Ступінь зруйнованості клітини описує, наскільки клітинна стінка пошкоджена в результаті обробки, і визначає кількість вмісту клітини, що виходить у навколишнє середовище. Цей параметр можна класифікувати за кількома рівнями:

1. Ціла клітина:

Опис: це клітина, яка зберігає свою природну структуру, без видимих пошкоджень клітинної стінки або мембрани. Вона характеризується повною цілісністю всіх компонентів, зокрема клітинної оболонки, цитоплазматичної мембрани та внутрішніх органел.

Ознаки: Клітина має чітку форму та гладку поверхню без розривів або тріщин.

Методи оцінки: Під мікроскопом цілі клітини виглядають рівними, без видимих деформацій чи пошкоджень. Вони чітко відрізняються за своєю формою та розміром.

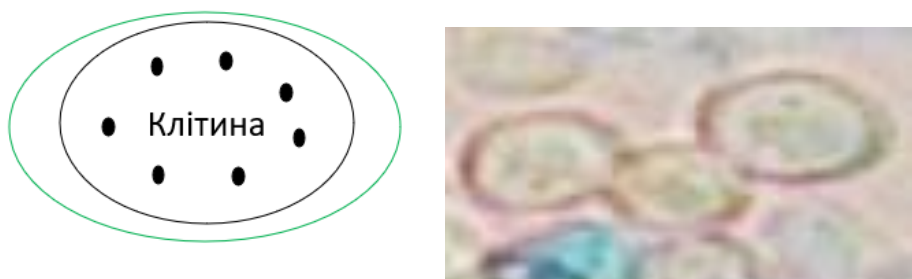


Рис. 3.1 Ціла клітина

2. Незначна зруйнованість:

Опис: Легка деформація клітинної стінки без суттєвих пошкоджень.

Ознаки: Переважна більшість клітин залишається цілою, без видимого витоку вмісту.

Методи оцінки: Під мікроскопом клітини виглядають дещо зміненими, але без серйозних розривів.

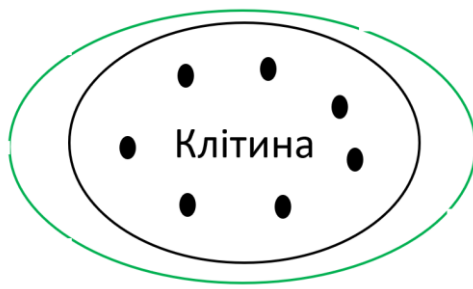


Рис. 3.2 Незначна зруйнованість

3. Помірна зруйнованість:

Опис: Часткова руйнація клітинних стінок, що призводить до витоку певної кількості внутрішнього вмісту.

Ознаки: Спостерігається помітне зниження цілісності клітин, деякі клітини виглядають тріснутими або мають порушену форму.

Методи оцінки: Можна використовувати біохімічні тести для вимірювання вмісту білків або інших речовин, які вийшли з клітин.

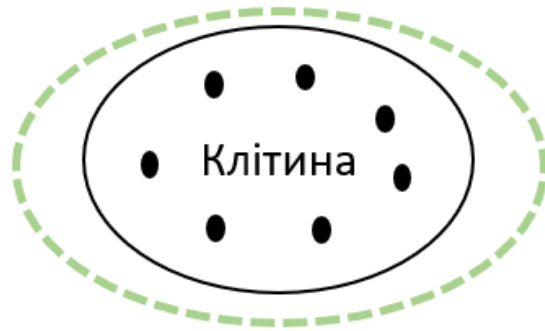


Рис. 3.3 Помірна зруйнованість

4. Висока зруйнованість:

Опис: Значна деструкція клітинної стінки, що призводить до масового виходу клітинного вмісту.

Ознаки: Більшість клітин має розірвані стінки, внутрішній вміст вільно виходить у середовище, залишаються лише залишки оболонки.

Методи оцінки: Під мікроскопом видно, що клітини втратили форму і залишилися лише фрагменти стінок. Біохімічний аналіз показує значне підвищення концентрації внутрішньоклітинних речовин у середовищі.



Рис. 3.4 Висока зруйнованість

5. Повна зруйнованість:

Опис: Клітини повністю руйнуються до ступеня, коли їх не можна відрізнити одна від одної як цілі об'єкти.

Ознаки: Весь вміст клітин випущений у середовище, а залишки клітинної оболонки важко ідентифікувати.

Методи оцінки: Під мікроскопом майже не видно цілих клітин, лише фрагменти та залишки. Аналіз вмісту середовища показує, що майже всі клітини повністю зруйновані.

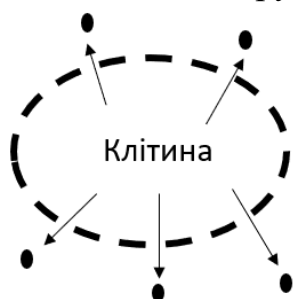


Рис. 3.5 Повна зруйнованість

3.2. Вплив часу роботи бісерного млина на ступінь подрібненості дріжджів

Час,хв	Результат / Обговорення	
0		<p>Форма клітин – еліпсоподібна (овалоподібна). Співвідношення розмірів (довжини і ширини) – постійний. Розподіл барвника – близький до рівномірного. Деякі області між клітинами мають більш насичене зображення.</p> <p>Внутрішній вміст клітин – не забарвлений Стінки клітин відображаються чітко, форма лінії – потовщена, колір – близький до чорного. Навколо стінки клітини наявний тонкий кольоровий (всілосиній, блакитний) ареал. Клітини містять легковиражене ядроподібне включення більш темнішого кольору порівняно із вмістом клітини. Мертві (інтенсивно забарвлені) клітини – відсутні або їх кількість мізерна.</p>
2		<p>Форма клітин – клітини переважно еліпсоподібні або овальні, як і на попередньому зображенні. Співвідношення розмірів – співвідношення довжини та</p>

ширини залишається постійним у більшості клітин.

Розподіл барвника – розподіл барвника нерівномірний, деякі клітини та області між клітинами мають більш інтенсивне забарвлення, що, ймовірно, свідчить про структурні зміни.

Внутрішній вміст клітин – внутрішній вміст багатьох клітин залишається незабарвленим, однак у деяких клітинах є більш інтенсивне забарвлення, що може свідчити про пошкодження клітин.

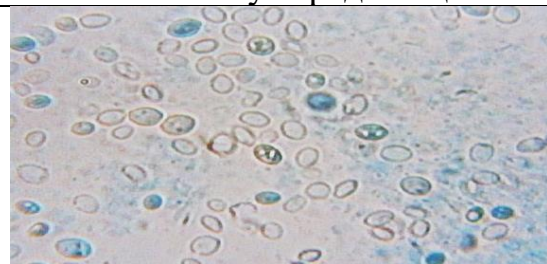
Стіни клітин – клітинні стінки чітко видно, вони мають товсту лінію. Проте деякі клітини мають пошкоджені або частково зруйновані стінки.

Ареал навколо клітин – тонкий кольоровий ареал видно навколо стінок клітин, з відтінками блакитного чи світло-синього. Ареал може бути менш вираженим або нерівномірним у пошкоджених клітинах.

Включення – Деякі клітини все ще містять трохи темніше включення, схоже на ядро, хоча у пошкоджених клітинах воно може бути менш чітким.

Мертві/зруйновані клітини – На цьому зображенні присутні чітко пошкоджені або частково зруйновані клітини, що видно за темнішим, нерівномірним забарвленням та порушеними клітинними стінками. Також помітно залишки клітин у навколишньому середовищі.

4



Форма клітин – більшість клітин зберігають овальну або еліпсоподібну форму, але з'являються також фрагменти клітин.

Співвідношення розмірів – співвідношення довжини та

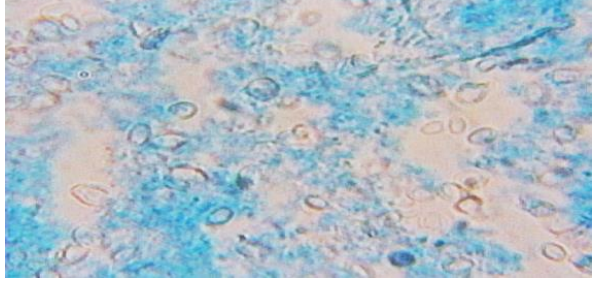
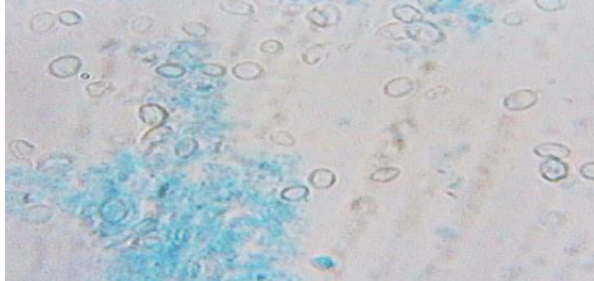
ширини у цілих клітин залишається постійним, але деякі клітини виглядають деформованими або фрагментованими.

Розподіл барвника – розподіл барвника менш рівномірний, з більш інтенсивним забарвленням у місцях фрагментації клітин, що може вказувати на руйнування структур клітин.

Внутрішній вміст клітин – у деяких клітинах вміст залишається не забарвленим, але також є клітини з більш інтенсивним забарвленням, що свідчить про можливе пошкодження.

Стіни клітин – клітинні стінки відображаються менш чітко через фрагментацію. У зруйнованих клітин стінки виглядають порушеними або неповними.

Ареал навколо клітин – тонкий кольоровий ареал навколо клітин присутній, але в зруйнованих клітинах він часто відсутній або нерівномірний.

	<p>Ядроподібне включення – деякі клітини все ще містять темніше ядроподібне включення, хоча у фрагментованих клітинах воно може бути відсутнє або менш виражене.</p> <p>Мертві/зруйновані клітини – на цьому зображенні спостерігається більше зруйнованих клітин, а також багато клітинних фрагментів, що свідчить про значний рівень руйнування та руйнування клітин.</p>
6	 <p>Форма клітин – значна частина клітин втратила чітку овальну або еліпсоподібну форму, і більшість структур виглядає як фрагменти. Співвідношення розмірів – для цілих клітин</p> <p>співвідношення розмірів складно визначити через високу ступінь руйнування. Більшість клітинних структур є нерівномірними або фрагментованими.</p> <p>Розподіл барвника – барвник розподілений дуже нерівномірно. Більшість зображення забарвлена інтенсивно, особливо в зонах скупчення клітинних залишків, що вказує на значний рівень руйнування.</p> <p>Внутрішній вміст клітин – уцілілих клітин майже немає, і більшість внутрішнього вмісту розподілена по всьому зображенню як фрагменти, без чіткої структури.</p> <p>Стіни клітин – чіткі клітинні стінки практично відсутні, оскільки більшість клітин розпалася на частини.</p> <p>Ареал навколо клітин – тонкий кольоровий ареал навколо клітин майже не помітний через високий рівень руйнування.</p> <p>Ядроподібне включення – включення, схожі на ядра, більше не видно, оскільки більшість клітин втратили свою структурну цілісність.</p> <p>Мертві/зруйновані клітини – на цьому зображенні переважають залишки клітин та фрагменти, що вказує на дуже високий рівень руйнування та деструкції клітинної структури.</p>
8	 <p>Форма клітин – більшість клітин втратила чіткі обриси, деякі структури мають овальну форму, але значна частина виглядає як фрагменти. Співвідношення розмірів –</p> <p>визначити точне співвідношення розмірів для клітин складно через високий рівень фрагментації. Овальні форми присутні, але вони нечіткі або деформовані.</p>

Розподіл барвника – барвник розподілений нерівномірно, особливо інтенсивне забарвлення спостерігається в областях із великою кількістю клітинних фрагментів, що може свідчити про значне пошкодження клітин.

Внутрішній вміст клітин – лише кілька клітин зберегли свою структуру, більшість вмісту розподілена хаотично у вигляді фрагментів по всьому зображенню.

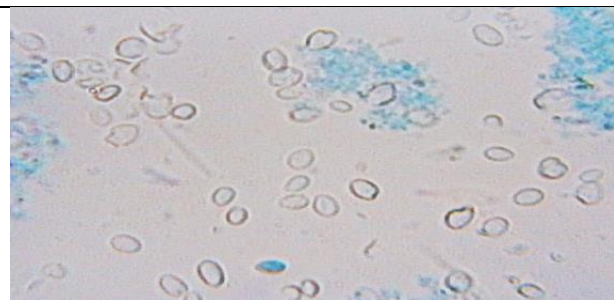
Стіни клітин – деякі клітинні стінки ще видно, але більшість зруйнована або розірвана, внаслідок чого структура клітин є нечіткою.

Ареал навколо клітин – тонкий кольоровий ареал навколо клітин майже відсутній, особливо в зоні руйнування, де він стає нерівномірним або непомітним.

Ядроподібне включення – ядроподібні включення не виражені або відсутні через сильне пошкодження клітин.

Мертві/зруйновані клітини – це зображення демонструє переважно залишки клітин і значну кількість фрагментів, що свідчить про високий рівень руйнування та руйнування клітинної структури.

10



Форма клітин – окремі клітини зберегли овальну або еліпсоподібну форму, але поряд з ними спостерігаються фрагменти та зруйновані клітини. Співвідношення розмірів –

уцілілі клітини мають стабільне співвідношення довжини та ширини, проте внаслідок пошкоджень частина клітин втратила форму.

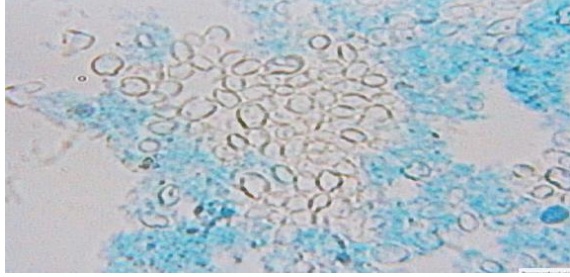
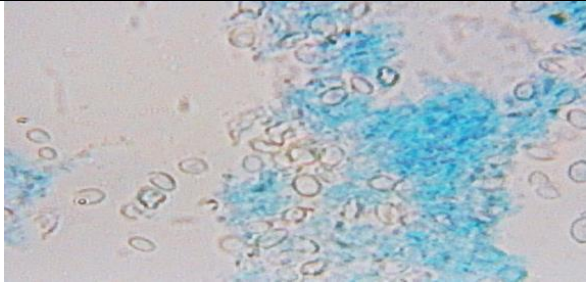
Розподіл барвника – барвник розподілений нерівномірно, інтенсивніші ділянки забарвлення можна помітити у зонах скупчення клітинних залишків, що вказує на фрагментацію.

Внутрішній вміст клітин – деякі клітини містять нефарбований вміст, але більшість зображення представлена фрагментами клітинної структури.

Стіни клітин – стіни деяких клітин ще можна побачити чітко, але більшість має нерівні контури або виглядає частково пошкодженою.

Ареал навколо клітин – тонкий кольоровий ареал навколо деяких клітин присутній, але менш виражений і нерівномірний у зонах руйнування.

Ядроподібне включення – уцілілі клітини все ще містять ядроподібне включення, хоча в зруйнованих клітинах воно або відсутнє, або нечітке.

	<p>Мертві/зруйновані клітини – зображення показує наявність значної кількості фрагментованих клітин та зруйнованих структур, що свідчить про високий рівень руйнування.</p>
<p>12</p>	 <p>Форма клітин – більшість клітин втратили чітку овальну або еліпсоподібну форму; вони сильно подрібнені, і важко розпізнати цілі структури. Співвідношення розмірів – через високий рівень руйнування складно визначити стабільне співвідношення довжини та ширини. Більшість клітинних структур є фрагментами. Розподіл барвника – барвник розподілений дуже нерівномірно, особливо інтенсивно в ділянках з великою кількістю фрагментів, що вказує на руйнування клітинної структури. Внутрішній вміст клітин – уцілілі клітини практично відсутні; більшість внутрішнього вмісту клітин розпорошена по зображенню у вигляді дрібних фрагментів. Стіни клітин – чіткі клітинні стінки майже не помітні, оскільки більшість клітин розпалися на дрібні частинки. Ареал навколо клітин – тонкий кольоровий ареал навколо клітин здебільшого відсутній через високий ступінь руйнування. Ядроподібне включення – ядроподібні включення не видно, оскільки клітини втратили цілісність і структура внутрішнього вмісту зруйнована. Мертві/зруйновані клітини – на цьому зображенні переважають дрібні фрагменти клітин, які вказують на майже повне руйнування клітинної структури.</p>
<p>14</p>	 <p>Форма клітин – цілі клітини ледь помітні, більшість структур на зображенні складаються з дрібних фрагментів, які втратили будь-яку чітку форму. Співвідношення розмірів – через майже повне руйнування складно визначити співвідношення розмірів, оскільки залишилися лише малі фрагменти клітин. Розподіл барвника – барвник розподілений нерівномірно, із загальним розмиттям кольору по всій площі зразка, що свідчить про значну деструкцію клітин. Внутрішній вміст клітин – цілісного внутрішнього вмісту не видно; усе розподілено у вигляді дрібних частинок.</p>

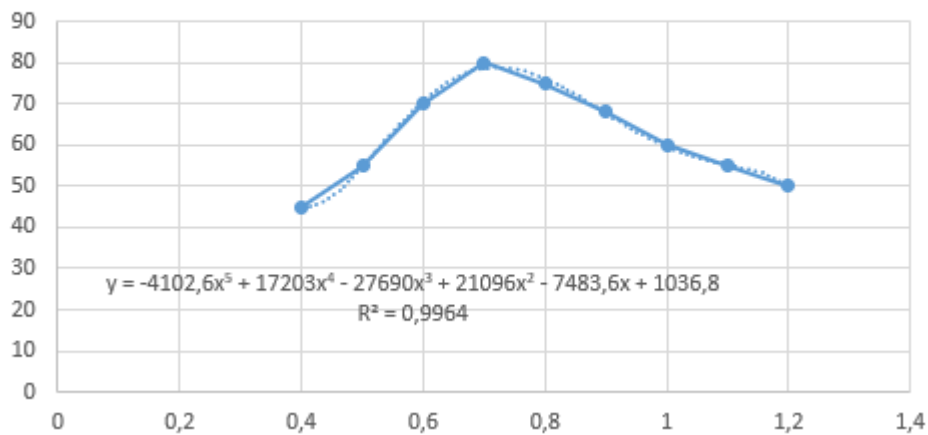
Стіни клітин – чіткі клітинні стінки відсутні; більшість клітинних залишків не мають структурної оболонки.
Ареал навколо клітин – тонкий кольоровий ареал навколо клітин не помітний, що підтверджує високий ступінь руйнування.
Ядроподібне включення – жодного вираженого ядроподібного включення не спостерігається через фрагментацію клітин.
Мертві/зруйновані клітини – на зображенні присутні майже виключно фрагменти та залишки клітин, які вказують на повне руйнування.

На 14-й хвилині експерименту в бісерному млині при швидкості обертання 1350 об/хв та використанні скляного бісеру діаметром 0,6-0,8 мм спостерігається значний ступінь руйнування клітин. Більшість клітин втратили свою цілісність, залишаючись у вигляді дрібних фрагментів та залишків. Це свідчить про ефективність обраних параметрів процесу руйнування, які сприяють інтенсивному руйнуванню клітинної структури в заданих умовах.

3.3. Обробка та аналіз результатів досліджень імітаційного моделювання

3.3.1 Оптимальні умови руйнування

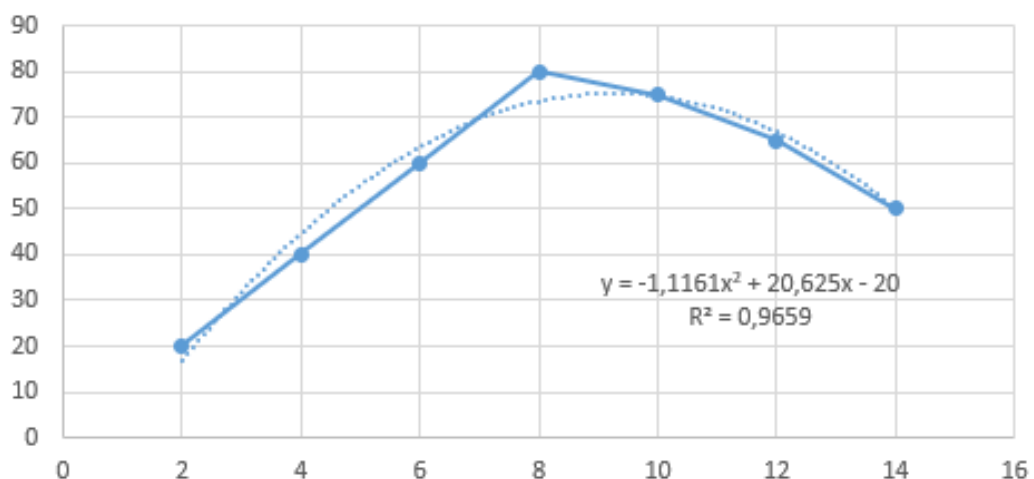
Залежність сумарного виходу подрібнення від розміру бісеру (%)



На графіку показано залежність сумарного виходу руйнування дріжджів (%) від розміру бісеру (мм). Оптимальний розмір бісеру для максимального руйнування знаходиться в діапазоні від 0,6 до 0,8 мм, де вихід руйнування досягає найвищого рівня (приблизно 80%).

Як видно з графіка, із збільшенням розміру бісеру після цього оптимального діапазону сумарний вихід руйнування починає зменшуватися, що вказує на меншу ефективність більших частинок бісеру для цього процесу. [33,34,35]

Залежність часу руйнування від сумарного виходу дріжджів (%)

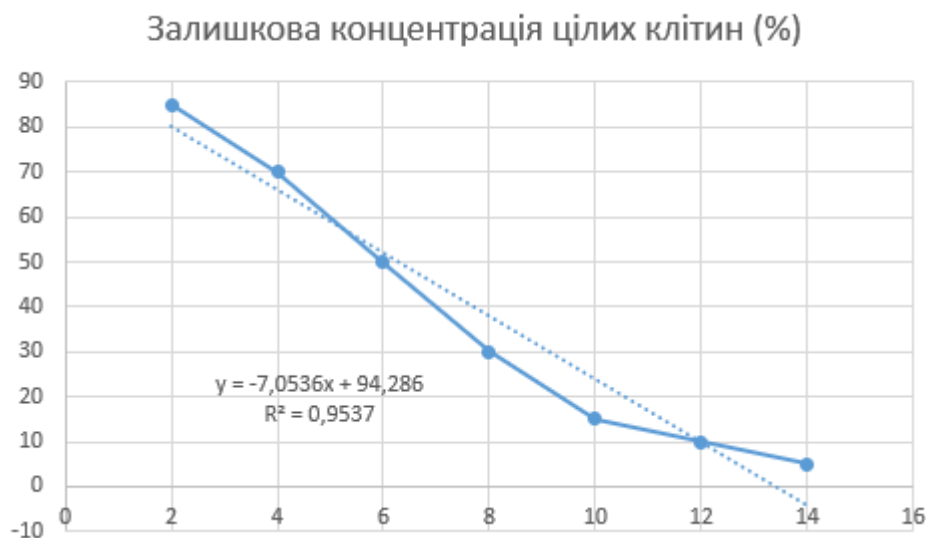


На графіку показано залежність часу руйнування від сумарного виходу дріжджів (%), де пік руйнування досягається на 8 хвилині з максимальним виходом 80%. До цього моменту вихід руйнування стрімко зростає, що відображає активний процес руйнування клітин. Після 8 хвилин вихід

починає поступово знижуватись, ймовірно, через перенавантаження або зміну динаміки взаємодії бісеру з суспензією.

Цей графік демонструє, що оптимальний час для досягнення максимального виходу становить близько 8 хвилин. Після цього етапу подальше руйнування стає менш ефективним, що слід враховувати для оптимізації роботи млина, щоб уникнути зайвого споживання енергії та втрат якості руйнування.

[35,36,37]



На графіку зображено залежність залишкової концентрації цілих клітин (%) від часу руйнування (хв). Видно, що на початкових етапах (2–6 хв) концентрація цілих клітин швидко зменшується, що вказує на активне руйнування клітин під дією механічного впливу бісеру. Після 8 хвилин зниження стає більш плавним, а до 14 хвилини залишкова концентрація цілих клітин наближається до мінімуму (5%).

Цей графік демонструє ефективність руйнування клітин у часі та допомагає визначити оптимальний час процесу, після якого руйнування стає менш ефективним. [38,39]

3.3.2 Імітаційне моделювання розподілення бісеру у вертикальному млині

На цьому рисунку показано процес руйнування у вертикальному бісерному млині, але він має ті ж принципи роботи, що й горизонтальний млин. У системі бісер (позначений оранжевим кольором) і суспензія (синій колір) взаємодіють у турбулентному потоці, забезпечуючи руйнування дріжджових

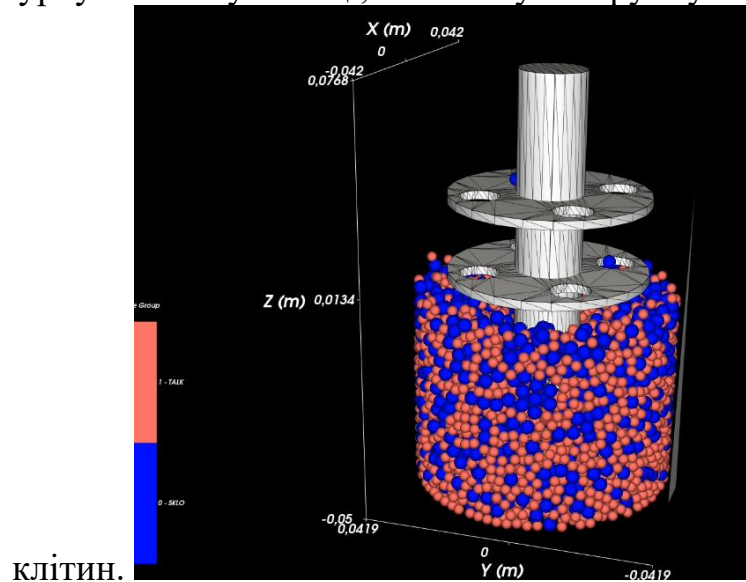


Рис. 3.6 Початок роботи млина

Основна відмінність вертикального млина від горизонтального полягає у напрямку потоку та впливі гравітаційних сил. У вертикальному млині бісер і суспензія утворюють більш структурований шар, оскільки бісер через свою густину осідає донизу, створюючи високу концентрацію в нижній частині робочої камери. Проте ротор, який обертається, забезпечує рівномірний розподіл бісеру по об'єму, підтримуючи необхідну інтенсивність руйнування.

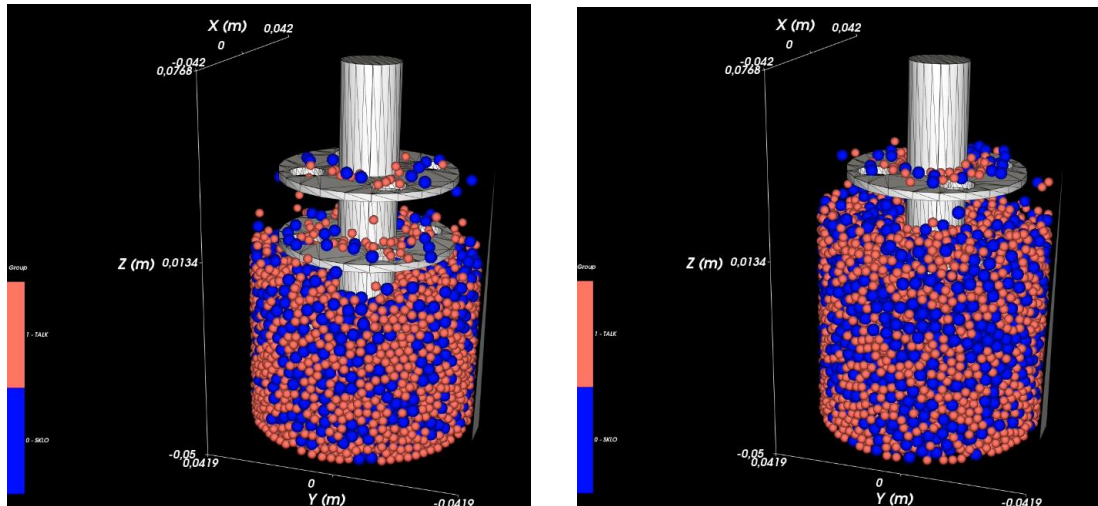


Рис. 3.7 Процес стабілізації перемішування

На цих рисунках показано динаміку ковзання суспензії (синій колір) крізь робочу камеру вертикального млина. У міру руху суспензія рівномірно контактує з бісером (оранжевий колір), який постійно перемішується ротором, створюючи необхідні умови для руйнування. Синя суспензія переміщується через густий шар бісеру, який знаходиться у стані постійного хаотичного руху. Ротор із кількома дисками забезпечує турбулентність і змішування, що запобігає застою частинок бісеру й забезпечує інтенсивну взаємодію між бісером і дріжджовими клітинами в суспензії. Видно, що бісер рівномірно розподілений у верхніх і нижніх зонах камери, що гарантує стабільний процес руйнування.

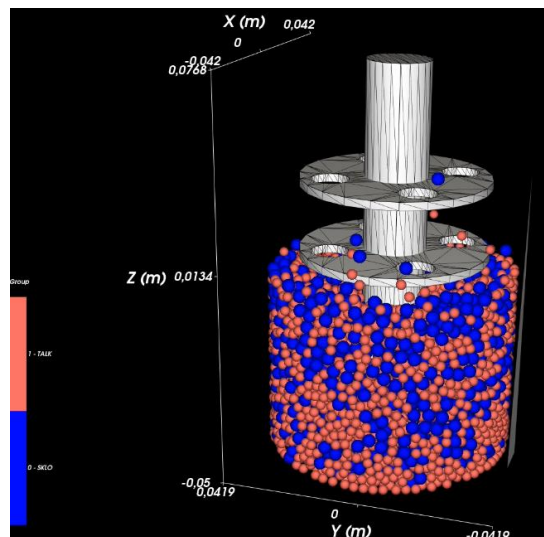


Рис. 3.8 Стабільність перемішування

На цьому етапі процесу руйнування у вертикальному бісерному млині видно, що система досягла стабільного режиму роботи. Бісер (оранжевий колір) і суспензія (синій колір) рівномірно розподілені в робочій камері, що забезпечує сталість і ефективність процесу.

Рівномірний рух суспензії через шар бісеру свідчить про те, що турбулентність, створена ротором, забезпечує необхідну динаміку для сталого руйнування. Стабілізація означає, що всі частинки суспензії рівномірно взаємодіють із бісером, а процес руйнування відбувається з однаковою інтенсивністю у всьому об'ємі камери. Це дозволяє уникнути нерівномірного впливу, який може призвести до переруйнування або недостатнього руйнування частини клітин. [40,41]

3.3.3 Імітаційне моделювання розподілення бісеру у горизонтальному млині

На наступних зображеннях показано процес руйнування дріжджових клітин у горизонтальному бісерному млині, змодельований у програмі ANSYS. Млин працює на швидкості 1350 обертів за хвилину, а руйнування здійснюється за допомогою бісеру розміром 0,6–0,8 мм. Цей процес ілюструє складну взаємодію між рідиною, бісером і дріжджовими клітинами, яка спрямована на руйнування клітинних стінок для подальшого вилучення вмісту.

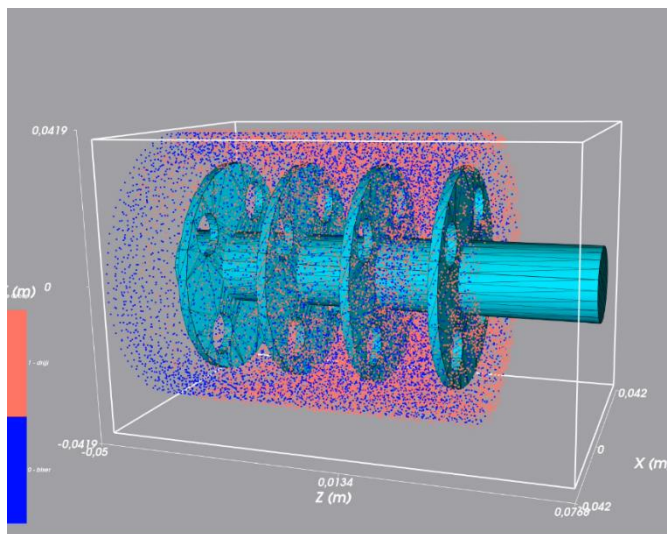


Рис. 3.6 Початок роботи млина

Синій колір на зображенні представляє суспензію, в якій знаходяться дріжджові клітини. Це рідке середовище слугує для транспортування клітин через робочу зону млина, а також для передачі енергії від ротора до частинок бісеру. Завдяки високій швидкості обертання ротора, рідина знаходиться в стані інтенсивного турбулентного руху, що сприяє рівномірному перемішуванню всієї маси.

Оранжевий бісер, розташований у рідині, виконує основну функцію руйнування. Його рух є хаотичним, але спрямованим силою обертання ротора та зсуву. Частинки бісеру стикаються одна з одною, а також з клітинами дріжджів, створюючи механічний вплив, достатній для руйнування клітинних стінок. У цьому процесі ключову роль відіграє правильний вибір розміру бісеру, адже його діаметр впливає на інтенсивність руйнування.

На зображенні видно конструкцію млина, яка включає горизонтально розташований корпус і ротор з декількома дисками. Диски забезпечують рівномірне перемішування суспензії й бісеру в об'ємі, а також генерують зони високої енергії, де відбувається найбільш ефективне руйнування. Рівномірний розподіл бісеру і рідини, відображений на моделі, свідчить про оптимальні умови роботи млина.

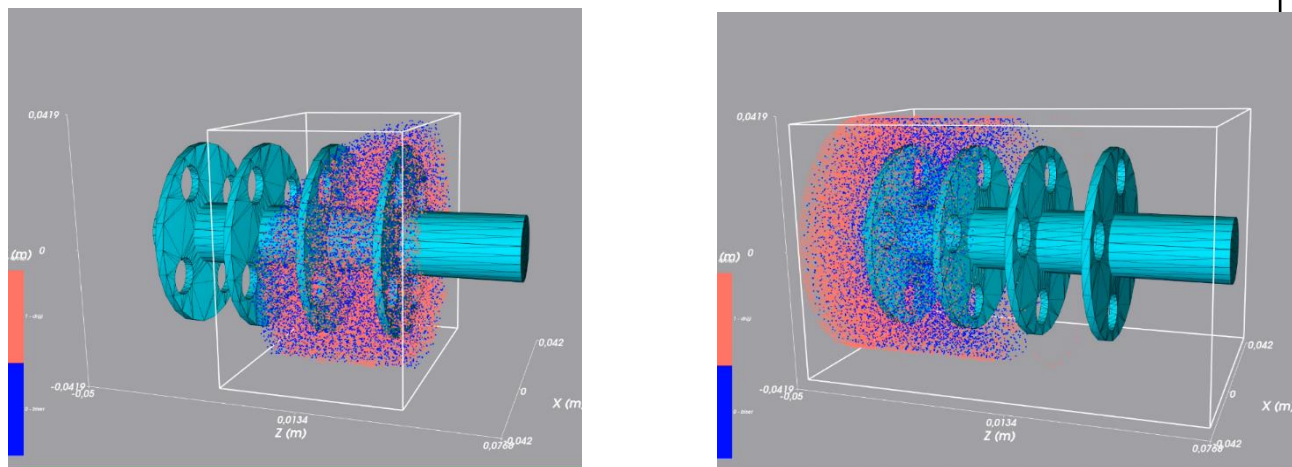


Рис. 3.7 Процес стабілізації перемішування

На цих рисунках показано процес переміщення суспензії крізь робочу камеру горизонтального бісерного млина. Суспензія (синій колір) поступово ковзає від початку до кінця камери, проходячи крізь зони з високою концентрацією бісеру (оранжевий колір), що забезпечує ефективне руйнування.

На початку робочої камери суспензія активно контактує з бісером, який розташований густо навколо ротора. Турбулентний рух, створений дисками ротора, сприяє рівномірному розподілу рідини та бісеру в об'ємі, створюючи інтенсивну зону руйнування. У цій частині камери відбувається початковий контакт між дріжджовими клітинами та бісером, що ініціює руйнування клітинних стінок.

Далі, в середній частині робочої камери, суспензія проходить через наступні зони з обертовими дисками. Завдяки турбулентному потоку та прискоренню, створеному ротором, відбувається активне перемішування частинок бісеру з суспензією. Рідина ковзає крізь ці зони, підтримуючи рівномірність процесу руйнування, адже кожна ділянка дріжджової суспензії багаторазово взаємодіє з бісером.

Наприкінці камери суспензії виходить із млина після проходження фінальної зони руйнування. На цьому етапі дріжджові клітини зазнали максимального механічного впливу, а суспензія набуває однорідного стану завдяки подрібненню. На зображеннях видно, як динаміка розподілу бісеру та суспензії змінюється від початку до кінця камери, підкреслюючи ефективність конструкції та оптимальність розподілу енергії в процесі.

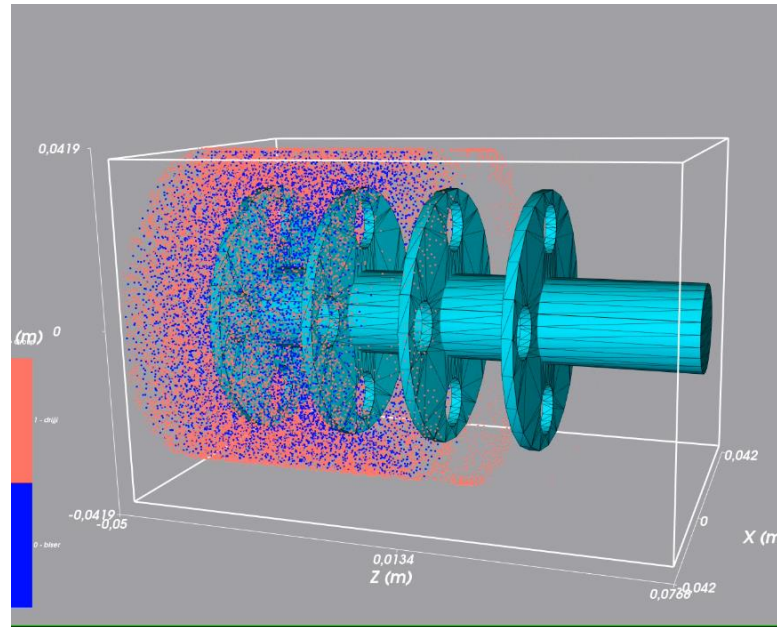


Рис. 3.8 Стабільність перемішування

На цьому етапі роботи млина процес руйнування досяг стабільного стану, що видно з рівномірного розподілу бісеру (оранжевий) і суспензії (синій) по всьому об'єму робочої камери. Завдяки цьому стабільному потоку забезпечується однорідне руйнування дріжджових клітин.

Суспензія, що містить дріжджові клітини, ковзає через зони високої енергії, створені ротором і дисками. Потік рідини та бісеру став більш організованим, що свідчить про досягнення оптимальних умов руйнування. Бісер, активно перемішуючись у суспензії, взаємодіє з клітинами з постійною інтенсивністю, спричиняючи рівномірне механічне руйнування їхніх стінок.

На рисунку видно, що інтенсивність взаємодії бісеру і суспензії залишається високою по всій довжині млина. Це свідчить про ефективний розподіл енергії і стабільність роботи обладнання. Результатом цього процесу є стало подрібнена суспензія, де всі клітини зазнали однакового ступеня впливу, що забезпечує високий рівень якості руйнування.

Такий стабільний режим роботи млина є бажаним для промислових процесів, адже він дозволяє досягти максимальної продуктивності без втрати якості. Завдяки точному підбору параметрів (швидкість обертання, розмір бісеру, конструкція ротора) млин працює з високою ефективністю, що видно з моделі. [40,41]

Висновки:

На основі представленого моделювання можна зробити висновок, що горизонтальний млин є більш ефективним для руйнування дріжджових клітин, ніж вертикальний. Ось основні причини такого висновку:

1. Рівномірність руйнування - у горизонтальному млині бісер і суспензія рівномірно розподілені по всьому об'єму камери завдяки турбулентному потоку, створеному ротором. У вертикальному млині гравітація сприяє осіданню бісеру, що може призводити до менш рівномірного розподілу навантаження у верхніх зонах.
2. Інтенсивність взаємодії - у горизонтальному млині бісер залишається в постійному активному русі завдяки напрямленій динаміці потоку, що забезпечує більш часті і ефективні зіткнення з клітинами. У вертикальному млині рух бісеру ускладнюється через вплив гравітації, що може знижувати інтенсивність руйнування.
3. Оптимальне використання енергії - у горизонтальному млині енергія, передана ротором, використовується більш ефективно, оскільки вона спрямована на підтримання турбулентного руху суспензії та бісеру. У вертикальному млині частина енергії витрачається на подолання гравітаційного осідання бісеру.
4. Стабільність роботи - горизонтальний млин швидше досягає стабільного режиму руйнування, що видно з рівномірного розподілу бісеру та суспензії протягом усього процесу. У вертикальному млині стабільність більше залежить від конструктивних особливостей і параметрів роботи.

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ БІСЕРНОГО МЛИНА

4.1 Опис конструкції бісерного млина

Для дослідження процесу механічного руйнування клітин дріжджів у біотехнологічних застосуваннях було обрано горизонтальний бісерний млин як об'єкт модернізації.

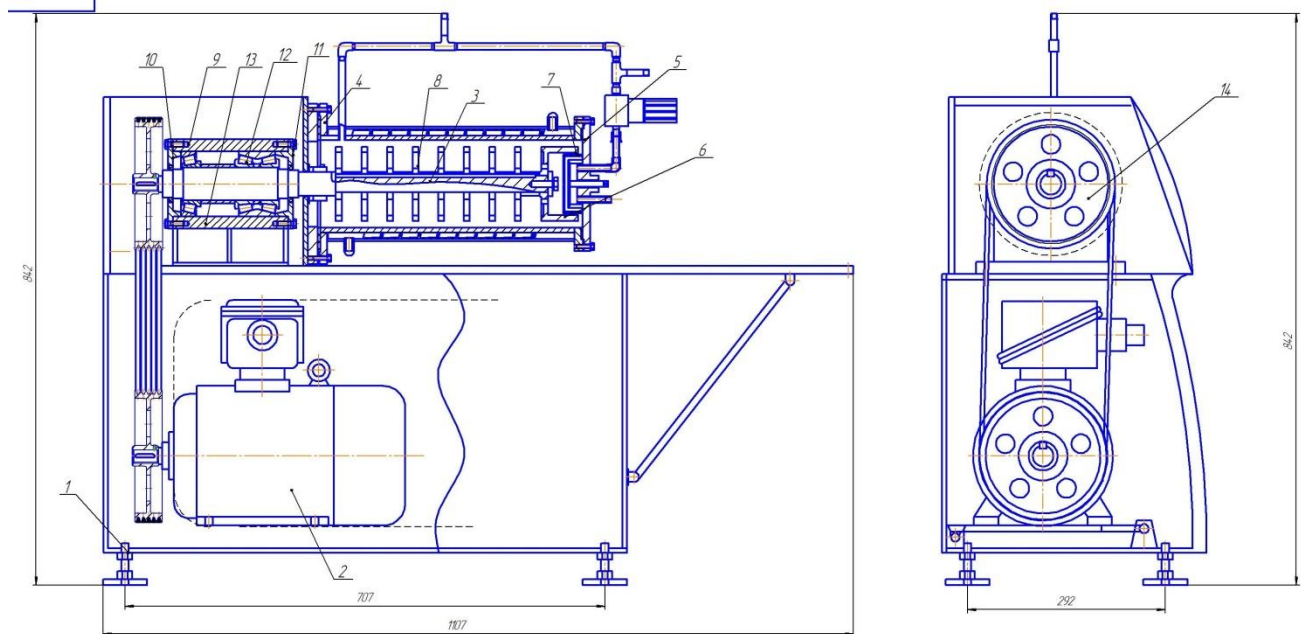


Рис.4.1 Бісерний млин вертикального типу

1 – підставка млина; 2 - двигун; 3 - вал; 4 - права кришка млина; 5 - ліва кришка млина; 6 - сепаратор; 7 - сітчастий фільтр; 8 - обертові диски; 9 - підшипниковий корпус; 10 - права кришка підшипникового вузла; 11 - ліва кришка підшипникового вузла; 12 - підшипники; 13 - підстава підшипникового вузла; 14 - шків.

Основою конструкції є підставка млина (1), яка забезпечує стійкість і правильне розташування всіх компонентів, дозволяючи обладнанню працювати стабільно навіть у складних умовах.

Привідною частиною млина є двигун (2), який забезпечує обертання валу (3). Вал, у свою чергу, передає обертальний момент до робочих елементів, таких як обертові диски (8), які є ключовими для процесу руйнування. Мішалки створюють механічний вплив на бісер, який безпосередньо взаємодіє з матеріалом у робочій камері млина.

Робоча камера млина закрита з обох боків правою кришкою (4) і лівою кришкою (5), що забезпечують герметичність і захист внутрішніх частин. У камері встановлений сітчастий фільтр (7), який виконує функцію додаткової фільтрації продукту після руйнування, та сепаратор (6), що відділяє подрібнений матеріал від бісеру.

Для забезпечення плавного обертання валу використовується підшипниковий вузол, який складається з підшипникового корпусу (9), підшипників (12),

підстави підшипникового вузла (13) та захисних кришок з обох боків — правої кришки підшипникового вузла (10) і лівої кришки підшипникового вузла (11). Підшипники мінімізують тертя і дозволяють валу обертатися з високою ефективністю навіть при значних навантаженнях.

Передача обертового моменту від двигуна до валу здійснюється за допомогою шків (14), який є частиною ремінного приводу. Це дозволяє регулювати швидкість обертання валу залежно від необхідних умов роботи. Конструкція бісерного млина розроблена таким чином, щоб забезпечити ефективне перемішування, руйнування та оптимальну продуктивність процесу. Усі елементи млина взаємодіють для досягнення максимальної ефективності та якісних показників під час обробки матеріалів.

4.2 Модернізація горизонтального бісерного млина

Запропонована модернізація робочих дисків бісерного млина передбачає використання дисків із висічками, розташованими під кутом 60° . Така конструкція має кілька переваг, які позитивно впливають на ефективність процесу руйнування клітин дріжджів.

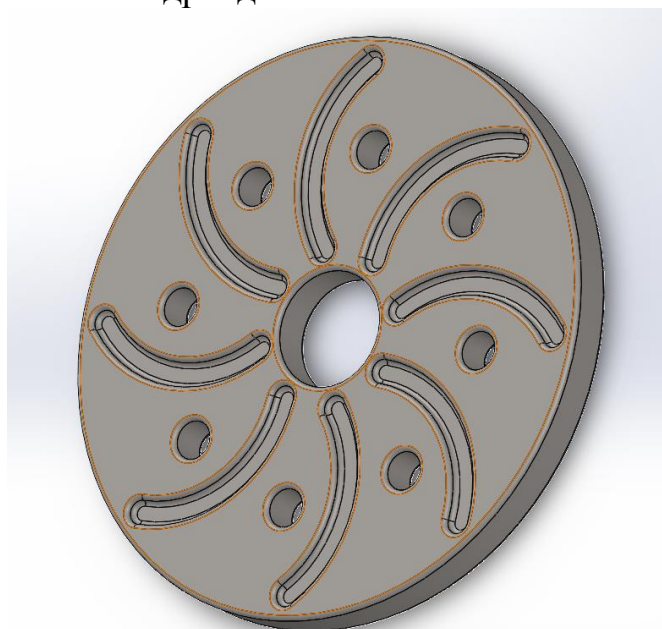


Рис.4.2. Диск для ротору бісерного млина

1. Покращення циркуляції бісеру.

Висічки під кутом 60° сприяють вільному вислизанню бісеру з поверхні дисків під час їх обертання. Це забезпечує рівномірний розподіл бісеру в робочій камері, зменшуючи ймовірність утворення зон застою. Завдяки цьому бісер активніше взаємодіє з матеріалом, що покращує якість і швидкість руйнування клітин дріжджів.

2. Збільшення площі диску.

Збільшена площа поверхні диску, на якій розташовані висічки, дозволяє працювати з більшим об'ємом бісеру. Це забезпечує більш інтенсивне механічне навантаження на матеріал, що важливо для руйнування клітин із міцними стінками, такими як клітини дріжджів.

3. Зменшення зношення дисків.

Рівномірний розподіл навантаження по поверхні дисків завдяки висічкам знижує локальне тертя та зношення матеріалу. Це підвищує довговічність дисків і зменшує частоту їх заміни, що робить експлуатацію млина більш економічною.

4. Інтенсивна циркуляція бісеру і суспензії.

Кутові висічки сприяють створенню більш турбулентного потоку бісеру та матеріалу в робочій камері. Це дозволяє досягти більш однорідного руйнування клітин дріжджів, що є важливим для біотехнологічних процесів, де необхідна висока якість обробки.

5. Ефективність процесу руйнування.

Завдяки покращенню взаємодії між бісером, матеріалом і дисками, процес руйнування клітин стає більш енергоефективним. Більша площа контакту між бісером і дисками дозволяє ефективніше передавати механічну енергію клітинам дріжджів, що знижує енергоспоживання обладнання.

Висновок

Модернізовані диски з висічками під кутом 60° є раціональним рішенням для підвищення ефективності роботи бісерного млина. Вони забезпечують рівномірний розподіл бісеру, покращують якість руйнування, зменшують зношення деталей і вузлів обладнання і знижують енергоспоживання процесу. Це робить їх використання доцільним для біотехнологічних і фармацевтичних виробництв, де якість руйнування клітин має критичне значення.

4.3. Визначення конструктивних і режимних параметрів роботи удосконаленої конструкції бісерного млина

На початковому етапі процесу руйнування дріжджів із використанням модернізованого ротора, оснащеного дисками з висічками під кутом 60° , створюється інтенсивна механічна взаємодія між бісером, дріжджовими клітинами та поверхнею дисків. Робоча камера заповнюється сумішшю дріжджів (червоні точки) і бісеру (сині точки), яка зазнає впливу обертових дисків.

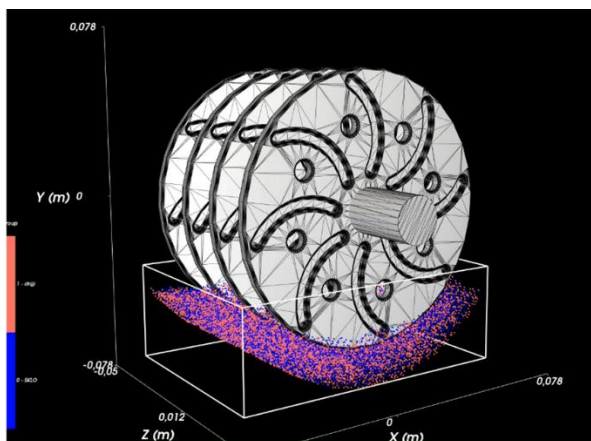


Рис 4.3 Початок процесу руйнування

Обертові диски, завдяки спеціальним висічкам, створюють потік бісеру, що циркулює у формі турбулентних зон навколо ротора. Ці турбулентні потоки забезпечують рівномірний розподіл бісеру по всій робочій камері, мінімізуючи застійні зони і забезпечуючи постійну взаємодію бісеру з клітинами дріжджів. Висічки на поверхні дисків спрямовують бісер під оптимальним кутом, збільшуючи кількість контактів між бісером і дріжджовими клітинами, що сприяє більш ефективному руйнуванню клітинної стінки.

Після початкового етапу, коли клітини дріжджів і бісер розподіляються у робочій камері, процес руйнування переходить у фазу стабілізації. У цей момент у системі досягається динамічна рівновага, за якої турбулентні потоки, створені модернізованими дисками з висічками, забезпечують рівномірний розподіл механічної енергії по всьому об'єму робочої камери.

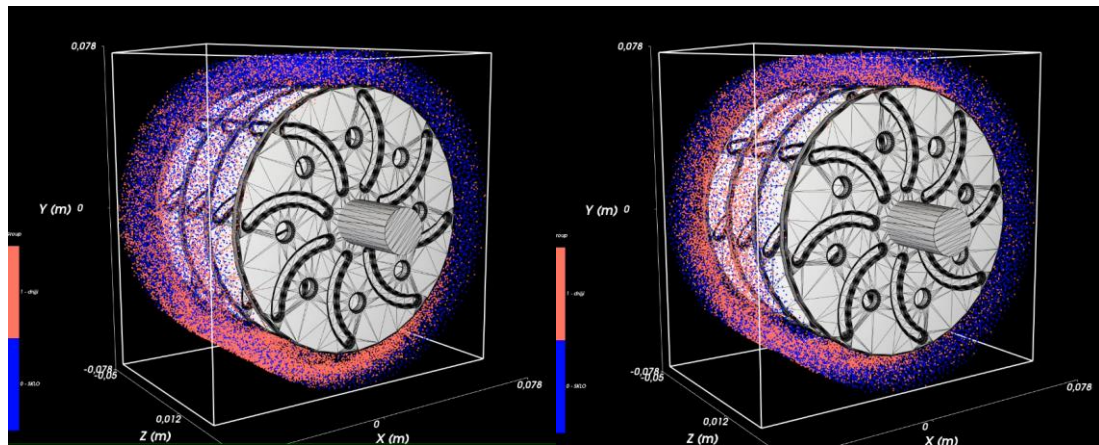


Рис. 4.4 Процес стабілізації руйнування

Ключовою характеристикою стабілізації є формування сталих потоків бісеру та матеріалу (дріжджів), які циркулюють навколо обертового ротора. Висічки під кутом 60° на дисках спрямовують потоки бісеру, забезпечуючи максимальний контакт між частинками бісеру й клітинами дріжджів. Це дозволяє уникати локальних зон застою, де руйнування клітин могло б бути менш ефективним.

Стабільність процесу також підтримується оптимальним балансом між швидкістю обертання ротора, діаметром і матеріалом бісеру, а також іншими режимними параметрами. За цієї фази клітини дріжджів, що залишилися цілими після початкового руйнування, поступово руйнуються під дією багаторазових ударів бісеру.

Ще однією важливою характеристикою стабілізованого процесу є мінімізація втрат енергії. Завдяки рівномірному розподілу механічних зусиль та оптимальній циркуляції суміші бісеру й матеріалу, енергоспоживання залишається на стабільному рівні, що підвищує загальну ефективність роботи млина.

4.4 Аналіз моделювання руйнування дріжджів в горизонтальному бісерному млині з запропонованим ротором



Рис 4.5 Димаїка кількості активних часток

На представленому графіку показано динаміку кількості активних частинок (Particles Enabled) під час симуляції руйнування дріжджів у бісерному млині в програмному середовищі ANSYS Rocky. Ось X відображає час (в секундах), а вісь Y — кількість активних частинок у системі.

Графік демонструє, що протягом усього процесу кількість активних частинок залишається постійною, без значних змін. Це свідчить про те, що всі частинки (дріжджі та бісер) перебувають у динамічній рівновазі й активно беруть участь у процесі руйнування. Відсутність зменшення кількості частинок може також означати, що жодна з них не покинула робочу область і не була "вимкнена" через фізичні обмеження чи інші фактори.

Плоска крива на графіку вказує на стабільність процесу руйнування. Це свідчить про те, що система ефективно підтримує постійний потік матеріалу та енергії між бісером і клітинами дріжджів.

Результати свідчать, що задані параметри моделювання (швидкість обертання, тип ротора, розміри бісеру тощо) відповідають умовам, за яких руйнування є оптимальним і стабільним. Це дозволяє зробити висновок, що використовувані диски з висічками забезпечують рівномірне перемішування й механічний вплив на матеріал.

Висновок

Симуляція в ANSYS Rocky підтверджує, що процес руйнування відбувається стабільно, без втрати частинок чи зміни їх кількості. Це свідчить про оптимальні параметри системи, які забезпечують ефективне руйнування клітин дріжджів у робочій камері бісерного млина.

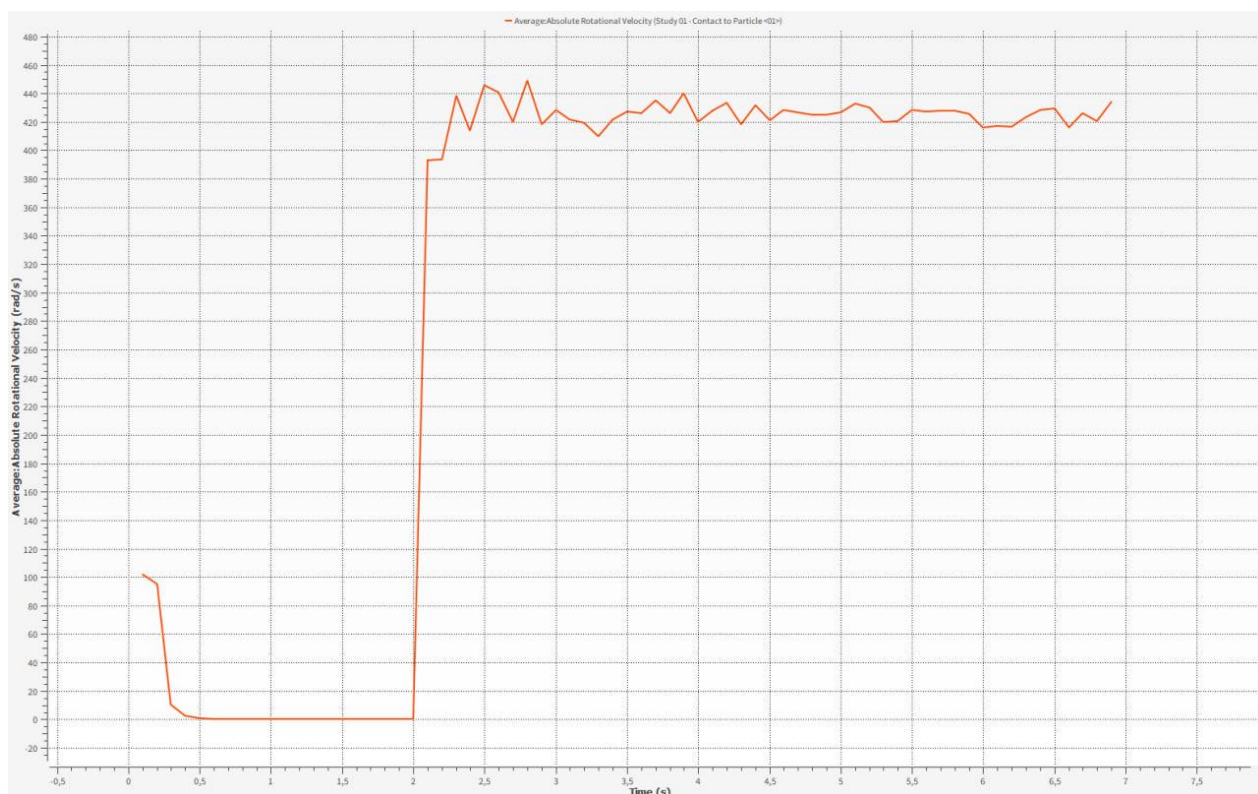


Рис.4.6 Графік середньої абсолютної швидкості обертання

Графік демонструє динаміку середньої абсолютної швидкості обертання частинок (у рад/с) в системі під час симуляції руйнування в бісерному млині. На осі X показано час (у секундах), а на осі Y — середня абсолютна швидкість обертання частинок у системі.

1. Початкова фаза (0–0.5 с):

У перші секунди симуляції спостерігається невелика початкова швидкість обертання частинок, яка поступово знижується. Це може бути пов'язано з тим, що система ще не досягла стабільної роботи, а частинки тільки починають взаємодіяти одна з одною та з поверхнею обертових дисків.

2. Фаза запуску (0.5–2.5 с):

У цій фазі відбувається різке збільшення швидкості обертання, що свідчить про запуск ротора та початок активної взаємодії між бісером і клітинами дріжджів. Система переходить із нерівномірного руху до більш інтенсивного обертального потоку.

3. Стабільна фаза (після 2.5 с):

Після 2.5 секунд графік демонструє вихід на плато, де середня швидкість обертання частинок стабілізується в межах ~ 450 рад/с. Це свідчить про досягнення динамічної рівноваги у системі: потік матеріалу й бісеру стає стабільним, а механічна енергія передається рівномірно. Такі умови є оптимальними для процесу руйнування, оскільки забезпечують постійну й ефективну взаємодію між частинками.

4. Незначні коливання:

У стабільній фазі спостерігаються невеликі коливання швидкості, що можуть бути викликані локальними нерівномірностями в розподілі частинок або моментами випадкового контакту. Ці коливання не є значними та не впливають на загальну стабільність процесу.

Висновки:

- Різке зростання швидкості обертання вказує на ефективність запуску системи.
- Стабільна швидкість обертання після 2.5 секунд свідчить про досягнення оптимальних умов для процесу руйнування.
- Такий графік підтверджує ефективність обраних параметрів роботи млина, зокрема конструкції дисків і режимних параметрів, для забезпечення рівномірного руйнування клітин дріжджів.

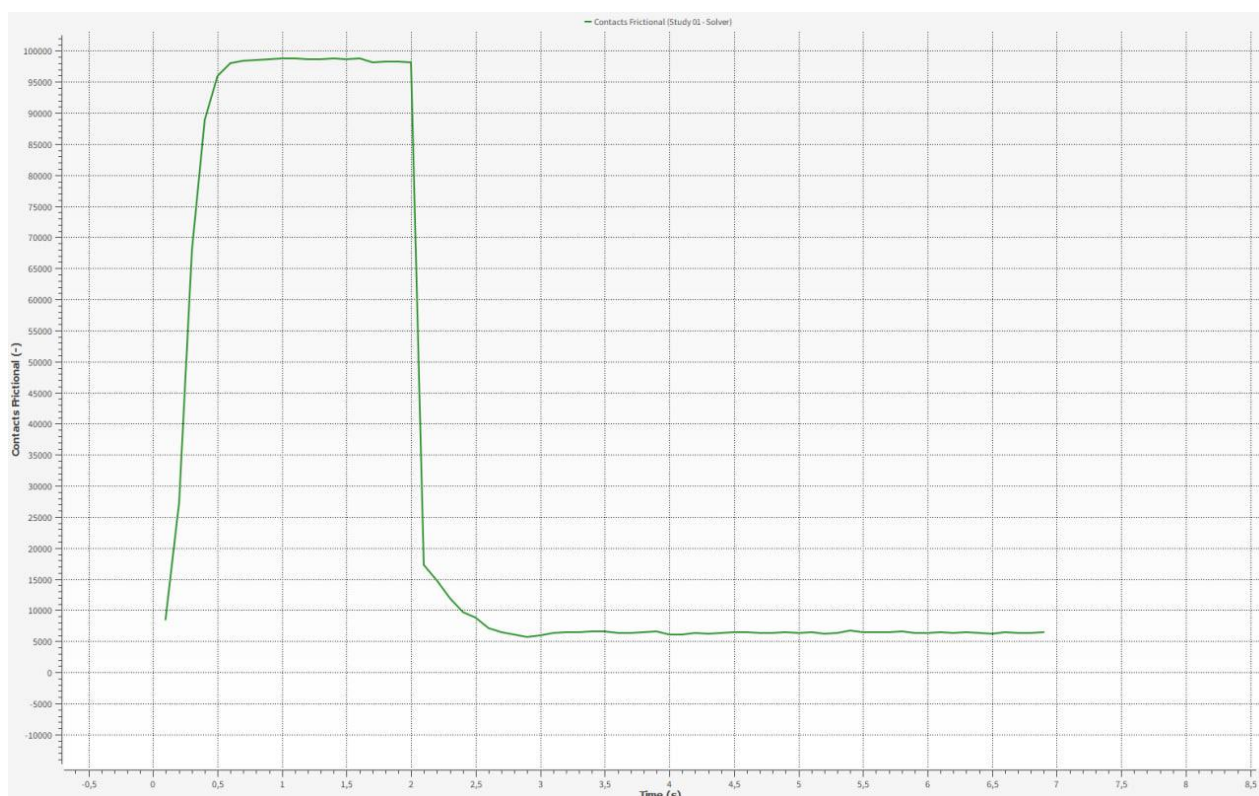


Рис.4.7 Динаміка сили тертя між частинками

На графіку представлено динаміку сили контактного тертя між частинками (наприклад, дріжджі та бісер) під час симуляції руйнування в бісерному млині. Вісь X відображає час (у секундах), а вісь Y — силу контактного тертя.

1. Початкова фаза (0–0.5 с):

У початковий період відбувається зростання сили контактного тертя. Це свідчить про початок активної взаємодії між частинками, коли система досягає робочого стану. У цей момент ротор запускається, і частинки починають взаємодіяти одна з одною, а також із поверхнею дисків.

2. Стабільна фаза роботи (0.5–2.5 с):

У цей період графік показує плато, де сила контактного тертя досягає максимального значення (~100,000 умовних одиниць) і залишається стабільною. Це вказує на те, що частинки бісеру та дріжджів рівномірно розподілені по всьому об'єму робочої камери, і їх взаємодія стає передбачуваною та стабільною. На цій фазі відбувається інтенсивне руйнування клітин.

3. Зниження тертя (2.5–4 с):

Після досягнення максимального значення сила контактного тертя різко зменшується. Це може бути пов'язано з тим, що клітини дріжджів частково руйнуються, зменшуючи кількість великих частинок, які взаємодіють із бісером. Іншим фактором може бути зниження щільності контактів через локальні зміни в об'ємі матеріалу.

4. Фаза стабілізації (4–8.5 с):

На цьому етапі графік демонструє сталий рівень сили контактного тертя (~5,000 умовних одиниць). Це свідчить про те, що система досягла динамічної рівноваги, і руйнування продовжується в умовах стабільної взаємодії частинок. У цій фазі механічна енергія системи використовується для подальшого руйнування дрібніших частинок.

Висновки:

- Максимальна сила контактного тертя досягається в період стабільної роботи, коли руйнування клітин є найінтенсивнішим.
- Різке зниження сили тертя вказує на те, що основна маса великих частинок була подрібнена.
- Стабільна низька сила тертя в кінці процесу свідчить про рівномірність системи та завершення основного етапу руйнування.

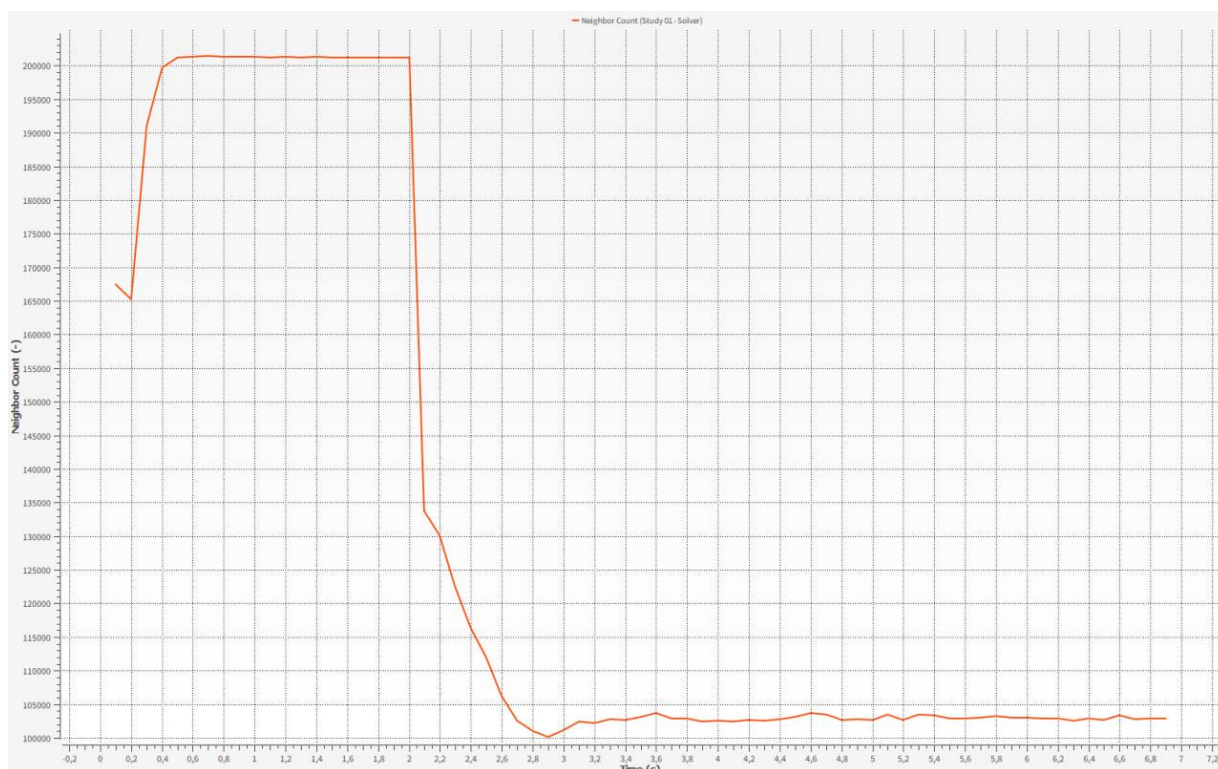


Рис.4.8 Динаміка кількості сусідніх частинок

На графіку представлено динаміку кількості сусідніх частинок (Neighbor Count) під час симуляції руйнування у бісерному млині. Вісь X відображає час (у секундах), а вісь Y — кількість сусідніх частинок, що знаходяться у контакті одна з одною.

1. Початкова фаза (0–0.5 с):

У перші миті симуляції кількість сусідніх частинок поступово зростає. Це пов'язано із запуском системи та початком активного перемішування. На цьому етапі частинки (дріжджі та бісер) лише починають взаємодіяти одна з одною, заповнюючи робочу камеру.

2. Стабільна фаза контакту (0.5–2 с):

У проміжку між 0.5 і 2 секундами графік досягає плато з максимальною кількістю сусідніх частинок (~200,000 одиниць). Це вказує на те, що частинки рівномірно розподілилися у робочій камері, створюючи максимальну щільність контактів. У цей момент інтенсивність взаємодій між частинками є найвищою, що сприяє ефективному подрібненню клітин дріжджів.

3. Різде зменшення контактів (2–3 с):

Після досягнення плато кількість сусідніх частинок різко знижується. Це може бути пов'язано із завершенням первинного руйнування великих частинок дріжджів, що призводить до зменшення кількості контактів через утворення дрібніших фрагментів.

4. Стабілізація (3–7.2 с):

На цьому етапі кількість сусідніх частинок залишається відносно стабільною (~100,000 одиниць). Цей рівень свідчить про те, що система

досягла динамічної рівноваги, і руйнування дрібних частинок продовжується у стабільних умовах. Зменшення кількості контактів порівняно з початковими фазами вказує на те, що частинки стали менш щільно згрупованими через їх зменшення в розмірі.

Висновки:

- Максимальна кількість контактів досягається на етапі інтенсивного перемішування та руйнування.
- Різке зниження кількості контактів після 2 секунд вказує на ефективне руйнування великих частинок клітин.
- Стабілізація на нижчому рівні контактів свідчить про перехід процесу до руйнування дрібніших частинок у стабільних умовах.



Рис. 4.9 Зміна суми перекриття частинок

На графіку представлено зміну суми перекриття частинок (Sum Overlap) під час симуляції руйнування в бісерному млині. Вісь X відображає час (у секундах), а вісь Y — сумарне перекриття частинок у метрах.

1. Початкова фаза (0–0.5 с):

На початку графік демонструє поступове зниження суми перекриття. Це свідчить про початковий запуск системи, коли частинки починають взаємодіяти одна з одною, але ще не досягли стабільного стану. У цій фазі зменшення перекриття може бути обумовлено розподілом частинок у робочій камері.

2. Фаза стабілізації (0.5–2 с):

У цій фазі сума перекриття залишається відносно стабільною (~0.022 м). Це вказує на те, що частинки встановили сталий контакт одна з одною, і система працює в рівноважному стані. Інтенсивність взаємодії між частинками та обертання ротора створюють необхідну силу для руйнування, але без значного збільшення тиску.

3. Різке збільшення перекриття (2–2.5 с):

На цьому етапі спостерігається різкий пік у графіку, що може бути викликано короточасним збільшенням сили стискання між частинками. Це може бути результатом локальної концентрації матеріалу в певних зонах робочої камери або зміною динаміки потоку частинок.

4. Поступове зниження перекриття (2.5–3.5 с):

Після піку перекриття різко зменшується. Це може свідчити про ефективне руйнування клітин, що призводить до зменшення їх розмірів і, відповідно, зниження сили стискання між частинками.

5. Фаза стабілізації після руйнування (3.5–7.2 с):

У цій фазі графік показує коливання навколо нижчого рівня перекриття ($\sim 0.013\text{--}0.015$ м). Це вказує на те, що процес руйнування перейшов до стабільного стану з меншими контактами та тиском між частинками, оскільки більшість клітин уже була подрібнена до дрібніших фрагментів.

Висновки:

- Початкове зниження перекриття свідчить про формування рівноважного стану системи.
- Пік перекриття вказує на інтенсивний момент стискання частинок, що може бути ключовою фазою руйнування.
- Стабілізація на нижчому рівні перекриття після 3.5 секунд свідчить про завершення основного етапу руйнування великих клітин і перехід до роботи з дрібнішими частинками.

4.5 Розрахунок продуктивності млина

Необхідна продуктивність млина – 10 кг/год.

Час руйнування – 20 хв.

Час допоміжних операцій – 15 хв.

Маса бісеру – 10 кг.

Густина пасти – 1080 кг/м³

Насипна густина бісеру – 3500 кг/м³

Загальний об'єм бісеру і суспензії з грибами:

$$V = m_{\text{п}}/\rho_{\text{п}} + m_{\text{б}}/\rho_{\text{б}} = 10/1080 + 10/3500 = 0.0121 \text{ м}^3$$

Отже, вільний об'єм барабана має становити 0,00191м³

Приймаємо внутрішній діаметр барабана 200 мм.

Діаметр валу – 70 мм.

Тоді довжина барабану для забезпечення заданої продуктивності:

$$L = \frac{4V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0.0121}{\pi \cdot 0.2^2} = 0.38 \text{ м}$$

4.6 Розрахунок потужності приводу

Для розрахунку роботи, витраченої на руйнування клітин дріжджів, 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 δ – питома поверхнева енергія, ΔF – площа новоутвореної поверхні, k – коефіцієнт пропорційності, а ΔV – деформований об'єм клітини.

При подрібненні дріжджів до колоїдного стану переважає перший доданок, оскільки руйнування клітин створює велику площу нової поверхні, і енергетичні витрати пропорційні саме цій поверхні. Проте ця формула має обмеження у застосуванні для практичних розрахунків, оскільки в бісерному млині клітини дріжджів не руйнуються миттєво. Кожна клітина піддається багаторазовій деформації протягом циклів руйнування.

Тільки близько 1% енергії витрачається безпосередньо на утворення нової поверхні клітин, тобто на їх лізис. Решта енергії витрачається на багаторазове деформування, тертя та утворення тепла. Крім того, значна частина роботи використовується на перемішування клітинної суспензії в млині, що додатково впливає на загальні енергетичні витрати процесу. Таким чином, для оптимізації процесу руйнування дріжджів важливо враховувати не тільки витрати енергії на утворення нової поверхні, а й на інші процеси, що супроводжують руйнування.

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 залитої суспензії та бісеру.[27, 28,29]

- Розрахунок потужності для розгону ротора:

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

де:

$m_p = 12 \text{ кг}$ – маса ротора;

$R = 0,012 \text{ м}$ – радіус центру мас ротора;

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

Підставимо значення:

$$A_1 = \frac{12 \cdot 0,012^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1500}{30}\right)^2}{2} = 848 \text{ Дж.}$$

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;

ω – кутова швидкість ротора, рад/с;

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

τ – час розгону ротора, сек.

Розрахунок потужності для розгону суспензії дріжджів та бісеру:

Робота, необхідна для надання кінетичної енергії суспензії дріжджів та бісеру:

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

де:

$m_c = 9 \text{ кг}$ – маса суспензії дріжджів і бісеру,

$R = 0,12 \text{ м}$ – зовнішній радіус розміщення суспензії,

$r = 0,025 \text{ м}$ – внутрішній радіус розміщення суспензії.

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 суспензії:

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

де

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

Загальна потужність:

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

Враховуючи ряд рекомендацій щодо проектування бісерних млинів, для млину малої продуктивності ($m = 10 \text{ кг/год}$) приймаємо $N_{двигуна} = 3,67 \text{ кВт}$. [27, 28,29]

4.7 Кінематичний розрахунок

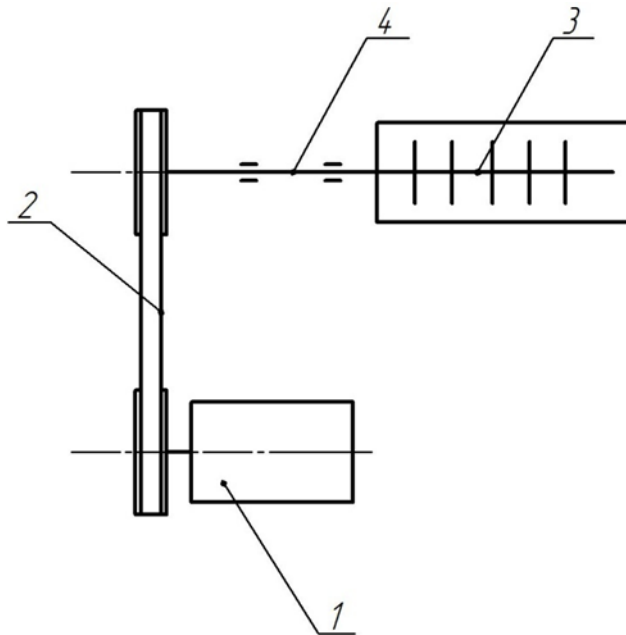


Рис.4.1 Кінематична система : 1 – двигун; 2 – пасова передача; 3 – ротор; 4 – підшипниковий вузол

$n_2 - 1500$ об/хв.; $n_1 - 1500$ 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:

$$T = \frac{9580 \text{ N}}{n} = \frac{9580 \cdot 1,5}{1500} = 9,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Під час руйнування дріжджів у бісерному млині відбувається значний розігрів суспензії внаслідок дисипації енергії приводу. Це явище виникає через перетворення частини енергії, що передається від приводу до бісеру, на тепло під час руйнування клітин. Як відомо, підвищення температури може сприяти інтенсифікації процесу руйнування завдяки зниженню в'язкості середовища і підвищенню активності клітинних компонентів, що полегшує подальше руйнування клітинних стінок. Однак такий ефект вимагає ретельного контролю, адже надмірне нагрівання може призвести до денатурації білків, зниження активності біомолекул і навіть до небажаного зміщення хімічних реакцій.

Для забезпечення стабільності температурного режиму і запобігання перегріванню суспензії дріжджів, бісерні млини обладнують сорочкою охолодження. Це дозволяє контролювати температуру суспензії, підтримуючи її на оптимальному рівні для ефективного руйнування та збереження активності дріжджових клітинних компонентів.

Розрахунок кількості води, необхідної для охолодження:

Кількість води, що необхідна для охолодження суспензії дріжджів, 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 суспензії дріжджів, бісеру, приводу та контейнера млина до необхідної температури.

Тепловий баланс має вигляд:

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

$Q_{\text{в}}$ — 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),

$Q_{\text{суспензія}}$, $Q_{\text{бісер}}$ та $Q_{\text{контейнер}}$ — кількість тепла, що витрачається на нагрівання суспензії дріжджів, 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 суспензії, бісеру та контейнера, отримаємо значення $Q_{\text{в}}$. Припустимо, що $Q_{\text{в}} = 500 \text{ кДж}$.

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

$$m_{\text{вода}} = \frac{500}{4,18 \cdot 10} = 11,96 \text{ кг}$$

Отже, для підтримки необхідної температури суспензії дріжджів під час руйнування в бісерному млині потрібно близько 12 літрів води. Цей обсяг води забезпечить ефективне охолодження та підтримання стабільного температурного режиму для оптимального процесу руйнування. [27, 28, 29, 30]

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Дослідження впливу конструктивних і режимних параметрів роботи бісерного млина на руйнування клітин дріжджів має наукове та практичне значення. Основною метою є оптимізація процесу механічного лізису клітин, що дозволить вирішити низку критичних проблем у біотехнологічній, фармацевтичній та харчовій промисловостях.

Руйнування клітин мікроорганізмів є ключовим етапом у виробництві ферментів, білків, біологічно активних сполук та інших цінних продуктів. Проте недостатнє розуміння механізмів впливу конструктивних параметрів (тип дисків, форма ротора, розмір бісеру) та режимів роботи млина (швидкість обертання, тривалість процесу) на ефективність руйнування обмежує можливість точного налаштування обладнання. Це призводить до підвищених витрат енергії, нерівномірного руйнування клітин і втрат цінних продуктів.

У сучасних умовах промисловості виникає необхідність мінімізувати енергоспоживання при максимальній ефективності процесу. Типові бісерні млини часто працюють із низьким ККД через нераціональну конструкцію робочих органів та неврахування турбулентності в камері руйнування. Це обмежує продуктивність і збільшує експлуатаційні витрати.

Очікувані переваги:

1. Підвищення продуктивності: Завдяки оптимізації конструкції робочих органів, таких як диски з виточеними пазами, можна досягти більш рівномірного руйнування клітин, що збільшить вихід цінних компонентів.
 2. Зниження енергоспоживання: Оптимальні конструктивні параметри дозволять зменшити витрати енергії на руйнування, що знижує собівартість процесу.
 3. Поліпшення якості продукту: Рівномірне руйнування клітин сприятиме збереженню біологічної активності продуктів, таких як ферменти чи білки.
 4. Екологічна ефективність: Завдяки зменшенню енергоспоживання знижується вуглецевий слід виробництва.
 5. Універсальність застосування: Отримані результати можуть бути використані не тільки для руйнування дріжджів, а й для інших біологічних матеріалів, що розширює сфери впровадження.
- Дослідження дозволить вирішити актуальні проблеми енергоефективності та оптимізації процесів руйнування, забезпечуючи промисловість інноваційними рішеннями для підвищення конкурентоспроможності продукції.

Для розрахунку витрат електроенергії та визначення загальної енергетичної ефективності процесу роботи бісерного млина на основі заданих параметрів протягом часу від 1 до 20 хв розглянемо такі основні кроки.

Вихідні параметри млина;

- Тип млина: АИММ 63В4 У2.5;
- Напруга: 380 В;
- Сила струму: 1,0 А;
- Потужність: 0,37 кВт;
- Частота: 50 Гц;
- Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$): 0,72;
- Частота обертів: 1500 об/хв;
- Маса бісеру: 250 г.

1. Розрахунок активної потужності (P):

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Де

- $U = 380\text{В}$ – напруга,
- $I = 1,0\text{А}$ – сила струму,
- $\cos \varphi = 0,72$ – коефіцієнт потужності.

$$P = 380\text{ В} \cdot 1,0\text{ А} \cdot 0,72 = 273,6\text{ Вт} = 0,273\text{ кВт}$$

2. Розрахунок споживання електроенергії за час роботи:

Енергію, спожиту млином протягом певного часу, можна розрахувати за формулою:

$$E = P \cdot t$$

де:

- $P = 0,2736\text{ кВт}$ – активна потужність,
- t – час роботи млина в годинах.

Розрахунок споживання енергії для часу роботи від 1 до 20 хвилин

Перетворимо час роботи з хвилин у години:

$$t_1 = 1\text{ хв} = \frac{1}{60}\text{ год} = 0,0167\text{ год}$$

$$t_{20} = 20\text{ хв} = \frac{20}{60}\text{ год} = 0,333\text{ год}$$

Розрахуємо споживання енергії для декількох інтервалів, щоб показати зміну витрат при збільшенні тривалості процесу.

Для 1 хвилини (0,0167 год):

$$E_1 = 0,2736\text{ кВт} \cdot 0,0167\text{ год} = 0,00457\text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для 5 хвилин (0,0833 год):

$$E_5 = 0,2736 \text{ кВт} \cdot 0,0833 \text{ год} = 0,0228 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для 10 хвилин (0,167 год):

$$E_{10} = 0,2736 \text{ кВт} \cdot 0,167 \text{ год} = 0,0457 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для 15 хвилин (0,25 год):

$$E_{15} = 0,2736 \text{ кВт} \cdot 0,25 \text{ год} = 0,0684 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для 20 хвилин (0,333 год):

$$E_{20} = 0,2736 \text{ кВт} \cdot 0,333 \text{ год} = 0,0911 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Час роботи, хв	Споживання енергії, кВт·год
1	0,00457
5	0,0228
10	0,0457
15	0,0684
20	0,0911

З розрахунків видно, що при роботі млина протягом 20 хвилин споживання електроенергії становить приблизно 0,0911 кВт·год. Оскільки ефективність руйнування значно знижується після перших 20 хвилин, продовження процесу руйнування може бути недоцільним з точки зору енергетичних витрат. Тому оптимальним є проведення процесу руйнування в декілька етапів з проміжним калібруванням, що дозволить зменшити витрати електроенергії та підвищити ефективність процесу.

РОЗДІЛ 6. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Забезпечення безпеки життєдіяльності під час роботи з експериментальним обладнанням є необхідною умовою ефективного проведення досліджень, особливо з використанням бісерного млина, що передбачає механічне руйнування клітин. Дотримання санітарно-гігієнічних норм і правил безпеки згідно з вимогами СанПіН є обов'язковим для зниження ризиків та запобігання небезпекам, пов'язаним з експлуатацією лабораторного обладнання.

Згідно з СанПіН 9-80-98, працівники лабораторії зобов'язані забезпечувати виконання загальних вимог безпеки на робочих місцях. Це включає підтримку належної гігієни, забезпечення чистоти та порядку в зоні проведення експериментів, а також регулярне провітрювання приміщення для уникнення накопичення шкідливих речовин. Особлива увага приділяється обладнанню робочого місця таким чином, щоб уникнути травматизму, забезпечити достатній доступ до приладів та можливість швидкого припинення експерименту у випадку аварійної ситуації.

Згідно з вимогами СанПіН 2.2.4 / 2.1.8.10-32-2002, необхідно підтримувати оптимальний мікроклімат у лабораторії. Температура повітря повинна залишатися в межах 18–22 °С, а відносна вологість – на рівні 40–60%.

Приміщення має бути обладнане системою загальнообмінної вентиляції, яка забезпечує регулярну циркуляцію повітря та видалення шкідливих речовин, що можуть утворюватися під час експерименту. Особливо важливим є підтримка вентиляційної системи в робочому стані при роботі з бісерним млином, оскільки він може виділяти мікрочастинки матеріалу при тривалому подрібненні, які потрібно виводити з приміщення.

Вимоги до електробезпеки, визначені СанПіН 2.2.4.13-29-2006, передбачають використання лише справного обладнання з належним заземленням. Усі електричні прилади, зокрема бісерний млин, повинні бути підключені до мережі з відповідним захистом від перевантажень. Працівники зобов'язані регулярно перевіряти справність ізоляції проводів та заземлення перед початком роботи. Оскільки млин працює під високим навантаженням, він має бути підключений до джерела живлення через пристрій автоматичного вимикання на випадок аварійної ситуації або короткого замикання.

Працівники лабораторії зобов'язані використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), зокрема захисні окуляри, рукавички та лабораторні халати. Під час роботи з бісерним млином, особливо при високошвидкісному подрібненні, можливе утворення мікрочастинок та аерозолів, що можуть бути шкідливими при вдиханні. У таких випадках рекомендується використовувати захисні маски або респіратори.

У випадку виникнення аварійної ситуації (наприклад, коротке замикання, зупинка млина або викид матеріалу з робочої камери) необхідно негайно припинити подачу живлення до обладнання та вжити заходів для усунення

джерела небезпеки. У разі витоку небезпечних речовин приміщення має бути швидко провітрене, а працівники повинні залишити зону небезпеки. Всі інциденти повинні бути зафіксовані для аналізу причин та запобігання повторенню аварій.

Дотримання правил безпеки згідно з вимогами СанПіН є обов'язковим для всіх працівників лабораторії, які працюють з експериментальним обладнанням. Виконання вищевказаних заходів знижує ризик травматизму та аварійних ситуацій, що сприяє підвищенню ефективності та безпеки проведення експериментальних досліджень.[31,32]

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Montalescot V., Rinaldi T., Touchard R., Jubeau S., Frappart M., Jaouen P., Bourseau P., Marchal L. Optimization of bead milling parameters for the cell disruption of microalgae: Process modeling and application to *Porphyridium cruentum* and *Nannochloropsis oculata*. *Bioresource Technology*. 2015. Volume 196. Pp. 339-346, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.075>.
2. Shuli L., Gifuni I., Mear H., Frappart M., Couallier E. Recovery of soluble proteins from *Chlorella vulgaris* by bead-milling and microfiltration: Impact of the concentration and the physicochemical conditions during the cell disruption on the whole process. *Process Biochemistry*. Volume 108,2021, Pp. 34-47, <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.021>.
3. Melendres A., Honda H, Shiragami N., Unno H. A kinetic analysis of cell disruption by bead mill. The influence of bead loading, bead size and agitator speed. *Bioseparation*. 1991. Volume 2 no.4 Pp.231.
4. Lee S.-Y. et al. Preparation of cellulose nanofibrils by high-pressure homogenizer and cellulose-based composite films. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2009. Vol. 15, no. 1. Pp. 50–55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2008.07.008> (date of access: 05.11.2024).
5. Xing J.-j. et al. Effect of high-pressure homogenization on the extraction of sulforaphane from broccoli (*Brassica oleracea*) seeds. *Powder Technology*. 2019. Vol. 358. P. 103–109. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.010> (date of access: 05.11.2024).
6. Shirgaonkar I. Z., Lothe R. R., Pandit A. B. Comments on the Mechanism of Microbial Cell Disruption in High-Pressure and High-Speed Devices. *Biotechnology Progress*. 1998. Vol. 14, no. 4. P. 657–660. URL: <https://doi.org/10.1021/bp980052g> (date of access: 05.11.2024).
7. Bernaerts M. et al. Evaluating microalgal cell disruption upon ultra high pressure homogenization. *Algal Research*. 2019. Vol. 42. Pp. 101616. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101616>
8. Gerde et al. Evaluation of microalgae cell disruption by ultrasonic treatment. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 125. Pp. 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.110>
9. Ultrasound for microalgal cell disruption and product extraction: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Pp. 106054. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106054>
10. Rose D. Physical Responses of Yeast Cells to Osmotic Shock. *Journal of Applied Bacteriology*. 1975. Vol. 38, no. 2. P. 169–175. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1975.tb00517.x> (date of access: 05.11.2024).
11. Nakayama Y, Yoshimura K, Iida H. Organellar mechanosensitive channels in fission yeast regulate the hypo-osmotic shock response. *Nat Commun*. 2012; 3 Pp. 1020.
12. Radford A. P. Biological detergents. *Br Med J*. 1970. Vol. 4, no. 5728. Pp. 181–182.

13. Knorr D., Shetty K. J., Kinsella J. E. Enzymatic lysis of yeast cell walls. *Biotechnology and Bioengineering*. 1979. Vol. 21, no. 11. P. 2011–2021. URL: <https://doi.org/10.1002/bit.260211109> (date of access: 26.11.2024).
14. Kumar A., Sahu R., Tripathy S. K. Energy-Efficient Advanced Ultrafine Grinding of Particles Using Stirred Mills—A Review. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 14. P. 5277. URL: <https://doi.org/10.3390/en16145277> (date of access: 05.11.2024).
15. Osumi M. Visualization of yeast cells by electron microscopy. *Microscopy*. 2012. Vol. 61, no. 6. P. 343–365. URL: <https://doi.org/10.1093/jmicro/dfs082> (date of access: 05.11.2024).
16. ATALE N. et al. Cell-death assessment by fluorescent and nonfluorescent cytosolic and nuclear staining techniques. *Journal of Microscopy*. 2014. Vol. 255, no. 1. P. 7–19. URL: <https://doi.org/10.1111/jmi.12133> (date of access: 05.11.2024).
17. Adan A. et al. Flow cytometry: basic principles and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2016. Vol. 37, no. 2. P. 163–176. URL: <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1128876> (date of access: 05.11.2024).
18. Gan S. D., Patel K. R. Enzyme Immunoassay and Enzyme-Linked Immunosorbent Assay. *Journal of Investigative Dermatology*. 2013. Vol. 133, no. 9. P. 1–3. URL: <https://doi.org/10.1038/jid.2013.287> (date of access: 05.11.2024).
19. Orenga S., James A., Manafi M., Perry J., Pincus D. Enzymatic substrates in microbiology. *Journal of Microbiological Methods*. Volume 79. Issue 2.2009. Pp. 139-155.
20. Zinkoné T., Gifuni I., Lavenant L., Pruvost J., Marchal L. Bead milling disruption kinetics of microalgae: Process modeling, optimization and application to biomolecules recovery from *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*. Volume 267. 2018, Pp. 458-465.
21. Montalescot V., Rinaldi T., Touchard R., Jubeau S., Frappart M., Jaouen P., Bourseau P., Marchal L. Optimization of bead milling parameters for the cell disruption of microalgae: Process modeling and application to *Porphyridium cruentum* and *Nannochloropsis oculata*. *Bioresource Technology*. Volume 196. 2015. Pp. 339-346.
22. Safi C., Frances C., Ursu A., Laroche C., Pouzet C., Vaca-Garcia C., Pontalier P. Understanding the effect of cell disruption methods on the diffusion of *Chlorella vulgaris* proteins and pigments in the aqueous phase. *Algal Research*. Volume 8. 2015. Pp. 61-68.
23. van Gaver D., Huyghebaert A. Optimization of yeast cell disruption with a newly designed bead mill. *Enzyme and Microbial Technology*. 1991. Vol. 13, no. 8. P. 665–671. URL: [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(91\)90082-1](https://doi.org/10.1016/0141-0229(91)90082-1) (date of access: 05.11.2024).
24. Parapouli M., Vasileiadis A., Afendra A., Hatziloukas E. *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology*. 2020. Volume 6. Issue 1. Pp. 1-31.

25. Hartwell L. H. *Saccharomyces cerevisiae* cell cycle. *Bacteriological Reviews*. 1974. Vol. 38, no. 2. P. 164–198. URL: <https://doi.org/10.1128/br.38.2.164-198.1974> (date of access: 05.11.2024).
26. Kelly A. C., Wickner R. B. *Saccharomyces cerevisiae*. *Prion*. 2013. Vol. 7, no. 3. P. 215–220. URL: <https://doi.org/10.4161/pri.24845> (date of access: 05.11.2024).
27. 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.
28. 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
29. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / За ред. проф. І. Ф. Малежика. Підручник. – К.: НУХТ, 2003. – 400с.
30. Процеси і апарати харчових виробництв: приклади і задачі: навч. посіб. / І. Ф. Малежик, П. М. Немирович, В. Л. Зав'ялов та ін. ; за ред. І. Ф. Малежика ; Нац. ун-т харч. технол. — К. : НУХТ, 2015. — 386 с.
31. Безпека життєдіяльності [Електронний ресурс]: конспект лекцій для студентів усіх напрямів підготовки бакалаврів денної та заочної форм навчання / уклад. О. П. Слободян, В. А. Заєць, С. О. Авдієнко, Л. П. Нецадим. - К. : НУХТ, 2013. – 51 с.
32. Основи охорони праці [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітнього ступеня «бакалавр» денної та заочної форм навчання / В. С. Гуць, С. Д. Коваленко, О. В. Євтушенко та ін. – К. : НУХТ, 2016. – 97 с.
33. Melendres A. , Honda H., Shiragami N., Unno H. A kinetic analysis of cell disruption by bead mill. *Bioseparation*. Pp. 231-236, 1991.
34. Heim A., Kamionowska U., Solecki M. The effect of microorganism concentration on yeast cell disruption in a bead mill. *Journal of Food Engineering*. Volume 83. Issue 1. 2007, Pp. 121-128.
35. Bakir U., Hamamci H. The effect of freeze-thawing on the release of intracellular proteins from *Escherichia coli* by means of a bead mill. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 1997. Volume 13. Pp. 475–477.
36. Kovač T. et al., Disruption of *Aspergillus flavus* cells: a bead mill homogenization method, *Food in Health and Disease*, 2019. Vol. 8. Issue 1. Pp. 13-18.
37. Günerken E., D'Hondt E., Eppink M., Elst K., Wijffels R. Flow cytometry to estimate the cell disruption yield and biomass release of *Chlorella* sp. during bead milling. *Algal Research*. Volume 25. 2017. Pp. 25-31.
38. Liu S., Gifuni I., Mear H., Frappart M., Couallier E. Recovery of soluble proteins from *Chlorella vulgaris* by bead-milling and microfiltration: Impact of the concentration and the physicochemical conditions during the cell disruption on the whole process. *Process Biochemistry*. Volume 108. 2021. Pp. 34-47.
39. Montalescot V., Rinaldi T., Touchard R., Jubeau S., Frappart M., Jaouen P., Bourseau P., Marchal L. Optimization of bead milling parameters for the cell

disruption of microalgae: Process modeling and application to *Porphyridium cruentum* and *Nannochloropsis oculata*. *Bioresource Technology*. Volume 196. 2015. Pp. 339-346.

40. María Catalina Quesada-Salas et al. Optimization and Comparison of Three Cell Disruption Processes on Lipid Extraction from Microalgae. *Processes*. Feb. 2021.

41. M. Safi et al., Aqueous extraction of proteins from microalgae: Effect of different cell disruption methods. *Bioresource Technology*. Vol. 237. Pp. 150-158, Nov. 2017.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Artem Ponomarenko, Kateryna Hrining, Oleksii Gubenia, Maksym Kasyniuk. 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

2. Kateryna Hrininh, Kostiantyn Omelianenko, Maksym Kasyniuk, 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.

3. 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

4. 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

5. 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

6. 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

7. 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

8. Maksym Kasyniuk, Artem Ponomarenko, Ihor Zhytnetskyi. Water treatment in the food industry: modern technologies and erspectives. Proceedings of the International Conference "Modern Technologies in the Food Industry-2024". 17-18 October 2024, Chisinau. P. 51.

9. Артем Пономаренко, Катерина Грінінг, Олексій Губеня. Зміна гранулометричного складу суспензії під час руйнування 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

10. 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

11. 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

12. Костянтин Омеляненко, Йонуц Аврамія, 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.

13. 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

14. 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.