

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

Інститут (факультет) *Навчально-науковий Інженерно-технічний*  
*інститут ім.акад. І.С. Гулого*

Кафедра *Машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв*

**«До захисту в ЕК»**

Директор інституту(декан факультету)

\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олександр ГАВВА  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

зі спеціальності *133 «Галузеве машинобудування»*  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми *«Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв»*

на тему

**Модернізація бісерного млина безперервної дії об'ємом робочої камери 0,02 м<sup>3</sup>.**

Виконав: здобувач IV курсу, групи ОХ-4-2

**Козицький Кирило Сергійович**

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

Керівник Губеня Олексій Олександрович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2025 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут *Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого*

Кафедра *Машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв*

Освітній ступінь *бакалавр*

Спеціальність *133 «Галузеве машинобудування»*

(шифр і назва)

Освітня програма *«Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв»*

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри МАХФВ**

**проф. Олександр ГАВВА**

(власне ім'я і ПРІЗВИЩЕ)

3 червня 2025 року

## **ЗАВДАННЯ** НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

**Козицький Кирило Сергійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Модернізація бісерного млина безперервної дії об'ємом робочої камери 0,02 м<sup>3</sup>.**

керівник проекту (роботи) *Губеня Олексій Олександрович, доц., канд. тех. наук*

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» квітня 2024 р. № 218-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 2 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

1. *Тип бісерного млина – горизонтальний, із відцентровим сепаратором бісеру.*

2. *Продукт – дріжджова суспензія.*

3 *Оглядові і дослідницькі наукові статті за тематикою проекту*

4. *Презентації та рекламні матеріали виробників обладнання*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): *анотація, зміст; перелік умовних позначень, термінів; вступ; порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі; техніко-економічне, соціальне обґрунтування; характеристика вихідної сировини і готового продукту; опис запропонованого технічного рішення, будова та принцип роботи; вибір конструкційних матеріалів; розрахункова частина; технологічний маршрут виготовлення деталі; вимоги щодо монтажу, експлуатації та ремонту; система управління; заходи щодо охорони праці, екології; висновки; список використаних літературних джерел, специфікація.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
 Загальний вигляд обладнання – 1 лист; Розрізи, Складальні одиниці обладнання – 3 листи; Технологія машинобудування – 1 лист
6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: «1» квітня 2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі	01.04.2025р.	
2	Техніко-економічне, соціальне обґрунтування.	05.04.2025р.	
3	Характеристика вихідної сировини і готового продукту	10.04.2025р.	
4	Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи.	15.04.2025р.	
5	Вибір конструкційних матеріалів	20.04.2025р.	
6	Розрахункова частина	02.05.2025р.	
7	Технологічний маршрут виготовлення деталі	15.05.2025р.	
8	Вимоги щодо монтажу, експлуатації та ремонту.	17.05.2025р.	
9	Опис системи управління	18.05.2025р.	
10	Заходи щодо охорони праці, екології	20.05.2025р.	
11	Висновки,	22.05.2025р.	
12	Графічна частина: 5 аркушів формату А3	25.05.2025р.	
13	Список використаних літературних джерел	27.05.2025р.	
14	Анотація, зміст	28.05.2025р.	
	Подача ДП на кафедрі	02.05.2025р.	

Здобувач \_\_\_\_\_ *Кирило КОЗИЦЬКИЙ*

Керівник роботи \_\_\_\_\_ *Олексій ГУБЕНЯ*

## Анотація

**Козицький Кирило Сергійович.** Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування «**Модернізація бісерного млина безперервної дії об'ємом робочої камери 0,02 м<sup>3</sup>**».

Модернізується бісерний млин безперервної дії із робочою камерою горизонтального типу та дисковими робочими органами. Бісер – скляний, з фракцією бісерінок діаметром 0.4–0.6 мм. Оброблювальний продукт – водна суспензія клітин мікроорганізмів, зокрема дріжджів, які необхідно зруйнувати з метою отримання біологічно цінних метаболітів, наприклад полісахариду бета-глюкану.

Пропонується оснастити бісерний млин для руйнування клітин мікроорганізмів системою сепараторів для якісного відділення обробленої суспензії зруйнованих мікроорганізмів від бісеру.

Як прототип використано інноваційні розробки вчених НУХТ. На валу бісерного млина додатково встановлюємо відцентровий сепаратор у вигляді турбінного колеса із отворами. За рахунок відцентрової сили бісер буде викидатися із вікон до стінок робочої камери, а суспензія зі зруйнованими клітинами мікроорганізмів під створеним напором буде безперервно відводитися через патронний фільтр. Такий ефект досягається за рахунок того, що швидкість осідання частинок більшого діаметру у графітаційному або відцентровому полях більша, ніж швидкість осідання дрібних мікроскопічних частинок.

Суспензія після виходу із млина через зовнішній циркуляційний контур багатократно повертається у робочу камеру, поки не досягнемо повного руйнування клітин.

Технічний ефект полягає у якісному відділенні бісеру від оброблювальної суспензії та можливості організації безперервного процесу руйнування клітин при невеликих початкових інвестиціях.

**Ключові слова:** *бісерний млин, мікроорганізм, клітина, бісер, сепаратор.*

## Annotation

**Kozytskyi Kyrylo Serhiyovych.** Qualification work for the degree of Bachelor in specialty 133 - Industrial mechanical engineering "**Modernization of a continuous bead mill with a working chamber volume of 0.02 m<sup>3</sup>**".

A continuous bead mill with a horizontal working chamber and disk working elements is being modernized. The beads are glass, with a bead fraction of 0.4–0.6 mm in diameter. The processed product is an aqueous suspension of microbial cells, in particular yeast, which must be destroyed in order to obtain biologically valuable metabolites, such as the polysaccharide beta-glucan.

It is proposed to equip a bead mill for the destruction of microbial cells with a system of separators for the qualitative separation of the processed suspension of destroyed microorganisms from the beads.

Innovative developments of scientists of the National Technical University of Chemistry and Technology were used as a prototype. On the shaft of the bead mill, we additionally install a centrifugal separator in the form of a turbine wheel with holes. Due to centrifugal force, the beads will be thrown out of the windows to the walls of the working chamber, and the suspension with crushed cells of microorganisms under the created pressure will be continuously discharged through the cartridge filter. This effect is achieved due to the fact that the settling speed of particles of larger diameter in gravitation or centrifugal fields is greater than the settling speed of small microscopic particles.

After leaving the mill, the suspension is repeatedly returned to the working chamber through the external circulation circuit until complete destruction of the cells is achieved.

The technical effect consists in the high-quality separation of beads from the processing suspension and the possibility of organizing a continuous process of cell destruction with small initial investments.

**Keywords:** bead mill, microorganism, cell, beads, separator.

## Зміст

Вступ.	
Розділ 1. Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі	
1.1. Продукти мікробного синтезу на основі руйнування клітин мікроорганізмів	
1.2. Порівняльний аналіз обладнання для надтонкого подріблення	
1.3. Конструкції бісерних млинів	
1.4. Сепаратори суспензії від бісеру	
1.5. Узагальнення будови бісерних млинів	
Розділ 2. Техніко-економічне обґрунтування	
Розділ 3. Характеристика вихідної сировини і готового продукту	
Розділ 4. Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи обладнання	
4.1. Схема обладнання	
4.2. Опис бісерного млина	
4.3. Опис модернізації	
Розділ 5. Вибір конструкційних матеріалів	
Розділ 6. Розрахункова частина	
6.1. Розрахунок продуктивності	
6.2. Розрахунок потужності приводу	
6.3. Кінематичний розрахунок	
6.4. Розрахунок вузлів і деталей на міцність	
6.4.1. Розрахунок пасової передачі	
6.4.2. Розрахунок валу	
6.5.1. Розрахунок шпонкових з'єднань	
6.5.2. Розрахунок та підбір підшипників	
6.6.1. Теплотехнічний розрахунок	
Розділ 7. Технологічний маршрут виготовлення деталі	
7.1. Вибір деталі та обґрунтування вибору матеріалів	
7.2. Перевірка деталі «Шків» на відповідність умов взаємозамінності, надійності та довговічності	
7.3. Розробка робочого креслення деталі «Шків»	
7.4. Розроблення технологічного процесу (ТП) виготовлення деталі «Шків»	
Розділ 8. Вимоги щодо монтажу та технічного сервісу	
Розділ 9. Опис системи управління	
Розділ 10. Заходи щодо охорони праці	
Висновки	
Список використаної літератури	
Додатки	

## Вступ

Бактерії, дріжджі, гриби й одноклітинні водорості виробляють білки, жири, полісахариди та широкий спектр біоактивних сполук, особливо тих, що мають лікувальні властивості, які важко або неможливо синтезувати хімічними методами. Ці речовини знаходяться в рідкій частині клітини (цитоплазмі) і клітинній стінці. Клітини можна виділяти та використовувати для виготовлення харчових добавок, кормів, біоплівок, добрив, косметики, фармацевтичних препаратів та біопрепаратів [9, 27, 49].

Зазвичай, для видобування цінних компонентів, клітини мікроорганізмів потрібно зруйнувати, розділити рідку і тверду фази, і далі проводити їх оброблення [21].

Існує багато методів руйнування клітин – руйнування у бісерних млинах, ультразвуковий метод, що полягає в дії ультразвукових хвиль на охолоджену суспензію, у гомогенізаторах високого тиску, заморожування-розморожування та багато інших методів [4].

Найпоширеніший метод – у бісерних млинах.

Одна із проблем під час роботи з бісерним млином – розділення обробленої суспензії від бісеру.

Бувають такі види сепараторів для відділення суспензії від бісеру: відцентровий, гідроциклонний, патронний, магнітний, сітчастий і так далі.

Найпоширенішою комбінацією для розділення бісеру від суспензії є поєднання сепараторів патронного і відцентрового типу.

Такий спосіб ми пропонуємо реалізувати у бісерному млині для руйнування клітин дріжджів під час виробництва бета-глюкану (він накопичується у стінках), або отримання білків (у цитоплазмі), або отримання рекомбінантних білків (у цитоплазмі).

Для реалізації задуму користуємося інформацією та рекламними презентаціями від виробників обладнання, а також науковою літературою.

Впровадження цих заходів дозволить якісно відділити бісер від продукту, а це забезпечить вимоги до безпечності продукту, високу продуктивність процесу, простоту в обслуговуванні.

## Розділ 1

### Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі

#### 1.1. Продукти мікробного синтезу на основі руйнування клітин мікроорганізмів

Руйнування клітин означає процес, за допомогою якого клітини, дріжджі, бактерії або тканини розщеплюються або подрібнюються, щоб вивільнити свій вміст і зробити його доступним. Використовуючи наші бісерні млини з мішалкою (механічний процес), можна досягти найвищої швидкості перетравлення з найменшим споживанням енергії, навіть із стійкими клітинними стінками.

Із різних видів дріжджів (*Saccharomyces cerevisiae*, *S. uvarum*, *S. Carlsbergensis*, *S. cerevisiae* виробляються фермент глюкозо-6-фосфатдегідрогеназа, фермент інвертази та вивільнений розчинний білок, бета-глюкан, біомолекули для синтезу біопалива [8, 8, 21, 51].

Водорості — це мікроскопічні організми, здатні виробляти різноманітні біологічні продукти та сполуки. Руйнування клітин водоростей означає процес, за допомогою якого клітинні стінки або мембрани клітин водоростей руйнуються для доступу до клітинних компонентів, таких як білки, ліпіди, вуглеводи, масла, пігменти та інші молекули. Вони використовуються в різних цілях, таких як біопаливо та біопродукти, дієтичні добавки, фармацевтика, корми для домашніх тварин тощо [52].

І з одноклітинних водоростей виробляють протеїни, ліпіди, білки, рекомбінантні білки, пігменти (хлорофіли та каротиноїди),  $\alpha$ -Токоферол, полісахарид  $\beta$ -1,3-глюкан, метилові ефіри жирних кислот (компоненти біодизелю), вітамін Е, вітаміни групи В, D3 і K2, полінасичені жирні кислоти, зокрема, ейкозапентаєнова кислота, пігмент зеаксантин,  $\alpha$ -Токоферол, вуглеводи, екзополісахариди, сульфатовані полісахариди, антитіла, вакцини, еритропоетин і рекомбінантний білок 28(VP28), рекомбінантні білки HBsAg

і VP,  $\alpha$ -галактозидаза і фітаза, пігменти: бета-каротин, лютеїн, зеаксантин, ейкозапентаєнова кислота, докозагексаєнова кислота, пігмент марренін, пігменти фукоксантин, полісахариди – альгінати, целюлоза, карагенан [1, 20, 20, 33, 35, 36, 41, 43, 44, 45, 46, 48, 50, 51].

Вакцини часто виготовляють з ослаблених або вбитих мікроорганізмів, частин мікроорганізмів або рекомбінантних білків. Щоб використовувати імуностимулюючі компоненти для дії вакцини, їх необхідно виділити з вихідних клітин. Екстракція цих компонентів досягається шляхом руйнування клітин за допомогою бісерної мішалки.

Руйнування клітин бактерій є важливим кроком у мікробіологічних дослідженнях, діагностиці та біотехнологічних застосуваннях. Це стосується процесу руйнування зовнішньої клітинної стінки або мембрани бактерій, щоб отримати доступ до клітинних компонентів, таких як білки, нуклеїнові кислоти, ліпіди та інші молекули. Бісерові млини з мішалкою допомагають зробити руйнування клітин точним, ефективним і відтворюваним, що має велике значення для мікробіологічних досліджень, діагностики та біотехнологічних застосувань [52].

Отже, деякі виробники рекомендують застосування бісерних млинів для руйнування багатьох видів мікроорганізмів – одноклітинних водоростей, бактерій, дріжджів.

На нашу думку, до деяких заяв потрібно віднестися критично, адже фахівці Національного університету харчових технологій досліджують це питання [52], і, на основі літературного аналізу та власних досліджень доводять, що у більшості випадків бактерії та одноклітинні водорості варто руйнувати шляхом гомогенізації під високим тиском у гомогенізаторах щілинного типу [52] або, у разі невеликих об'ємів, у ультразвукових установках [52]. Водночас, клітини дріжджів і деяких мікрководоростей (особливо тих, які мають порівняно великі клітини із міцною стінкою) варто руйнувати на бісерних млинах [52].

## 1.2. Порівняльний аналіз обладнання для надтонкого подрібнення

Станом на сьогодні, для надтонкого подрібнення використовуються такі типи машин: колоїдні млини, трьохвалкові млини, бісерні млини та вібраційні млини.

**Трьохвалкові млини.** Оберткові вали, які рухаються назустріч один одному з різною швидкістю, сприяють переміщенню матеріалу з одного валу на інший. Їх виготовляють із порцеляни, базальту або металу. Для забезпечення стабільної температури під час роботи вали роблять порожнистими, щоб всередину можна було подавати охолоджувальну рідину. Подрібнення суспензії відбувається в зоні дотику валів, після чого вона знімається скребком [23].

Розмір частинок може бути менше 3 мкм.

Переваги: придатність для обробки матеріалів, що мають схильність до налипання; компактна конструкція; можливість інтеграції в безперервний виробничий процес; наявність запобіжних механізмів, що працюють на основі магнітів.

Недоліки: нерівномірне та швидке зношення робочих поверхонь; можливість зміщення валу внаслідок нерівномірного натягу пружин; відносно низька питома продуктивність; зниження продуктивності при досягненні максимальної ступені подрібнення.

Застосовуються для подрібнення кремів, пігментних паст і лініментів у косметичній галузі, а також для виготовлення гомогенізації гелів і мазей у фармацевтичному виробництві.

**Вібраційні млини.** Подрібнення відбувається за рахунок роботи спеціального вібраційного механізму, розташованого на одній осі з електродвигуном, що спричиняє вібрацію барабана. Як робочі тіла використовуються кульки з порцеляни, твердих сплавів або сталі. Барабан заповнюється цими кульками на 80–90% об'єму.

Розмір отриманого після подрібнення продукту становить від 1 до 5 мкм.

Переваги: висока ступінь однорідності частинок та дисперсності досягається за короткий час.

Застосування: призначений для тонкого подрібнення матеріалів з невисокою міцністю.

**Бісерний млин.** Подрібнення здійснюється у вологому середовищі. Конструктивно складається з двох основних частин: подрібнювальної камери з охолоджувальною сорочкою, куди разом із компонентами суміші завантажуються бісер, та ротора, що приводить систему в рух і складається з валу з закріпленими на ньому дисками або стержнями. Робочий об'єм заповнюється бісером зі скла, сталі або базальту на 70–80%. Подрібнення відбувається внаслідок зіткнення частинок бісеру між собою, а також їх взаємодії з ротором і стінками камери. Промислові бісерні млини можуть працювати в безперервному, напівбезперервному або періодичному режимах.

Розмір подрібненого матеріалу може бути меншим за 1 мкм [24].

Переваги: надійність та безпека експлуатації; легкість у обслуговуванні; універсальність застосування; висока продуктивність; стабільна якість подрібнення; проста конструкція; компактні розміри; а також високий рівень герметичності.

Недоліки: низький коефіцієнт корисної дії — близько 15%; можливість спікання та перегріву суспензії при недостатньому охолодженні; не підходять для обробки високов'язких фарб і емалей; високе споживання води та миючих засобів для підготовки обладнання до роботи;

Застосування: використовується для подрібнення кремів і пігментних паст у косметичній галузі, а також для виробництва гелів, мазей, паст, лініментів у фармацевтичній промисловості.

**Колоїдні млини.** Існує багато варіантів конструкції цих млинів. Щоб уникнути злипання частинок, подрібнення здійснюють у присутності дисперсійного середовища. Колоїдне подрібнення здебільшого використовується в дослідницьких цілях, оскільки цей процес є недостатньо вивченим і досить складним.

Розмір частинок після подрібнення становить менше 0,4 мкм.

Переваги: висока ефективність емульгування та диспергування.

Недоліки: значне зношення робочих деталей; обмежене розуміння особливостей процесу.

Застосування: у фармацевтичній промисловості колоїдні млини використовуються для виготовлення мазей, лініментів і паст, а в хімічній — для подрібнення окремих видів мінеральних пігментів.

**Струменеві млини.** У цих млинах подрібнення матеріалу здійснюється в сухому середовищі шляхом зіткнення частинок одна з одною. Джерелом енергії для подрібнення служить стиснене повітря. Обладнання оснащено вбудованим класифікатором, який запобігає проходженню надто великих частинок.

Переваги: процес самоподрібнення виключає зношення робочих елементів і забруднення продукту; можливість ефективного подрібнення твердих, термочутливих або легкоплавких матеріалів завдяки використанню охолодженого газу (близько 20 °С); висока продуктивність.

Недоліки: низька економічність через необхідність використання потужних компресорів для подачі повітря.

Розмір частинок після подрібнення (на прикладі вапняку) становить менше 2 мкм.

Класичний струменевий млин застосовується для виробництва целюлози, какао-порошку, скла, керамічних пігментів та технічної кераміки, а також у фармацевтичній галузі — для виготовлення тонерів, пігментів, цифрових чорнил, матеріалів для акумуляторів (анодів і катодів), агрохімічних засобів а також для обробки мінералів, руди і окремих металів.

Протягом останніх десятиліть були створені нові типи конструкцій струменевих млинів, зокрема парові струменеві млини та спіральні струменеві млини [23].

### 1.3. Конструкції бісерних млинів

За повідомленнями машинобудівної компанії Allwin [2], у комплексі промислових машин бісерний млин виділяється як свідчення людської винахідливості та невпинного прагнення до вдосконалення обробки частинок. Бісерний млин відіграє ключову роль у кількох секторах, від косметики до фармацевтики. Бісерний млин, який був представлений у світі на початку 20 століття, бере свій початок у Європі. Його інноваційно створили інженери, які побачили потенціал використання крихітних кульок (бісеру) як подрібнювачів. Кінетична енергія від руху бісерінок змушує їх стикатися з частинками, що призводить до зменшення їхнього розміру [2].

Руйнування у бісерних млинах клітин мікроорганізмів відбувається в результаті взаємодії з твердими частинками, а саме: бісером, головним чином під дією зсувних і стискаючих напружень. Під руйнуванням клітин мається на увазі порушення цілісності їхніх стінок і мембран. Подальший етап обробки, що полягає в розщепленні клітинних структур на дрібніші частини, можна визначити як подрібнення, однак такий процес є енерговитратним і неефективним [23].

Зазвичай млин має стаціонарну робочу камеру циліндричної форми, яку також називають «стаканом» або «барабаном», у якій бісер – як робочі тіла - приводиться в рух за допомогою ротора. У цьому контексті бісер розглядається як складова частина машини. Як правило, він виготовляється з металу, кераміки або скла. Скляний бісер переважно застосовується в лабораторних млинах або апаратах з невеликим об'ємом. Ротор бісерного млина являє собою вал із робочими елементами, зазвичай у формі пальців або дисків. У більшості випадків ротор обертається з частотою від 500 до 3000 обертів за хвилину [24].

Головною функцією ротора є забезпечення руху всього об'єму бісеру. Варто відзначити, що бісер у робочій камері млина рухається за складною траєкторією. Під час взаємодії з робочими елементами – дисками або

пальцями – бісер набуває руху й під дією відцентрової сили переміщується до стінок млина. У зоні безпосереднього контакту зі структурами ротора швидкість руху бісеру зростає, що спричиняє його інтенсивне просування до периферії. У проміжках між робочими органами, де відстань до їхньої поверхні більша, швидкість руху бісерин зменшується, і вони повертаються в напрямку осі обертання ротора, формуючи циркуляційний потік [11].

Унаслідок циркуляції бісерної маси і неоднорідного розподілу тиску в її об'ємі, бісеринки обертаються з різною частотою та в різних напрямках. Це призводить до виникнення зсувних зусиль між ними, які, у поєднанні зі стисканням, спричиняють розрив клітинних стінок мікроорганізмів, що потрапляють між бісеринками.

У деяких наукових роботах та презентаціях виробників обладнання висувається припущення про наявність ударних навантажень під час руйнування клітин у бісерних млинах. Удар зазвичай визначається як короткочасна взаємодія між двома тілами, що супроводжується великими силами або прискоренням. Однак у бісерному млині не створюються умови для суттєвої різниці швидкостей і прискорень між частинками. Тому автори цієї роботи не вважають удар основним чинником руйнування клітин між бісеринками [14].

Діаметр бісеру, що використовується для руйнування клітин, зазвичай становить від 0,4 до 1,5 мм. Водночас у деяких інших галузях, зокрема в спеціалізованих конструкціях бісерних млинів для синтезу наночастинок, застосовується бісер діаметром менше 0,01 мм, тоді як у виробництві лакофарбових матеріалів розміри бісеру можуть перевищувати 2 мм.

Виробники бісеру зазвичай рекомендують, щоб його діаметр був у 10–20 разів більшим за розмір частинок, які піддаються обробці. Однак на практиці це співвідношення дотримується не завжди [58].

У деяких рекламних матеріалах виробників демонструються нестандартні конструкції бісерних млинів, зокрема моделі з робочими елементами турбіноподібної форми, або апарати без чітко виражених робочих органів, але

з інтенсивним хаотичним рухом невеликих ємностей із бісером (наприклад, флаконів малого об'єму). Хоча детальне технічне обґрунтування таких рішень зазвичай не надається, очевидно, що їх основна мета — активізувати рух і циркуляцію бісеру всередині робочої камери. Це, у свою чергу, дозволяє використовувати бісер значно меншого діаметра — менше ніж 0,3–0,4 мм, що є недоступним для традиційних конструкцій млинів. Завдяки цьому досягається підвищення ефективності руйнування клітин або подрібнення твердих частинок до нанорозмірів. [13].

Метою оброблення клітин є порушення їхньої цілісності з подальшим вивільненням рідкого вмісту, відокремленням його від клітинних стінок, мембран, а також від тілець включень. У науковій літературі не вказується, що саме відцентрові сили в бісерному млині безпосередньо спричиняють вихід вмісту з клітини. Це підтверджується тим, що під час мікроскопічного спостереження практично не виявляються мертві клітини, які мали б забарвлюватися через проникнення барвника. Дослідники, як правило, фіксують на початку процесу живі клітини, а згодом – вже «порожні» клітиноподібні структури, залишки стінок та їх фрагменти. Це дозволяє припустити, що під дією відцентрових сил у бісерному млині рідкий вміст швидко виходить із клітин, в яких порушено цілісність оболонки. Завершальне розділення твердої та рідкої фаз відбувається під час подальшої обробки в центрифугах або сепараторах [42].

Висока швидкість обертання робочих органів, яка зазвичай становить від 1000 до 3000 обертів за хвилину, надає бісерним млинам подібність до центрифуг. У таких умовах відцентрова сила, що впливає на бісер, у десятки або навіть сотні разів перевищує силу тяжіння. Внаслідок цього гравітаційна дія на процес оброблення є незначною порівняно з відцентровою. Таким чином, орієнтація робочої камери — вертикальна чи горизонтальна — практично не впливає на ефективність роботи млина [13].

**Горизонтальний бісерний млин** – це широко використовуване обладнання для мокрого подрібнення твердих матеріалів, призначене для

роботи в горизонтальному положенні. В основному він складається з робочої камери камери, вала та дисперсійного диска. Принцип роботи полягає в обертанні та терті середовища із робочих тіл, як правило, скляних, керамічних або металевих кульок (бісеру), щоб подрібнити частинки матеріалів до бажаної дрібності або зруйнувати клітини [2].

Технічний термін «горизонтальний подрібнювальний верстат» (англ. *horizontal grinding machine*) зазвичай відноситься до горизонтального бісерного млина. Завдяки своїй горизонтально орієнтованій камері подрібнення, він є пріоритетним у багатьох галузях промисловості [2].

Обертаний вал із перемішувачами дисками перемішує бісер, створюючи всередині бурхливе середовище. Руйнування відбувається завдяки силі, створюваній цими швидкими рухами подрібнювального середовища. Постійні зіткнення — кулька з кулькою і кулька з частинками — призводять до руйнування частинок [2].

Бісерні млини широко використовуються в таких галузях, як акумуляторні матеріали, промислова кераміка, виробництво діоксиду титану, покриття, чорнила, пігменти, барвники, косметика, продукти харчування, фармацевтика, пестициди, MLCC/LTCC, металеві руди, неметалічні мінерали та хімічна інженерія [2].

Порівняно з традиційними методами сухого помелу, горизонтальні бісерні млини використовують підхід мокрого помелу, що зменшує знос і накопичення тепла. Це допомагає запобігти окисленню та погіршенню частинок матеріалів, забезпечуючи якість кінцевого продукту [2].



**Рис. 1.1. Горизонтальний бісерний млин DYNO-Mill KD 45 D [17]**

Млини цього типу оснащуються робочими органами у вигляді дисків чи пальців, які закріплені на валу (роторі), що здебільшого обертається з приблизною частотою 1000–2000 об/хв. Оброблювана суспензія подається безперервно через вхідний патрубок і виводиться через вихідний. Перед виходом вона проходить через спеціальні пристрої для відділення бісеру – зокрема, відцентрові або патронні сепаратори. Охолоджувальна рідина також циркулює безперервно через охолоджувальну сорочку, надходячи й виходячи через відповідні патрубки.

Високошвидкісне обертання шліфувального валу та бісеру усередині камери для руйнування (подрібнення) в горизонтальній бісерній млині сприяє ефективному та рівномірному суспендуванню частинок, забезпечуючи стабільність і консистенцію кінцевого продукту. Таким чином, горизонтальні бісерні млини відіграють вирішальну роль у мокрому подрібненні та диспергуванні частинок матеріалів. Їх висококонтрольований діапазон тонкості та різноманітне застосування роблять їх незамінним основним обладнанням у різних галузях промисловості [2].

Горизонтальні машини мають горизонтальну трубчасту камеру помелу з мішальним валом і дисками. Енергія передається від диска до рідини в млині, і продукт розрізається поверхнею середовища, а не дисками. Ця конструкція забезпечує ефективне використання невеликих обсягів носія, гнучкість його розміру, значне зменшення втрат продукту, максимальну інтенсивність кольору, стійкість глянцею, продуктивність і стабільну продуктивність. На ефективність таких машин впливають такі фактори, як швидкість ротора, розмір і тип кульок, що використовуються, і твердість частинок. Незважаючи на це, горизонтальний тип млинів широко використовується в таких галузях промисловості, як фармацевтична, косметична та харчова [25].

Перевагами цих конструкцій є забезпечення безперервної обробки, можливість регулювання інтенсивності подрібнення частинок суспензії або руйнування клітин мікроорганізмів, ефективна організація зовнішнього контуру циркуляції суспензії та мінімізація утворення застійних зон.

З недоліків таких млинів – займає більше виробничого простору, потребує більше часу для вивантаження залишків бісеру і суспензії.

**Вертикальні бісерні млини**, мають вертикальне розташування робочої камери, як правило вони періодичної дії.

Принцип роботи вертикального бісерного млина (рис. 1.2.): завантаження сировини, аналогічно до горизонтального бісерного млина, суміш та подрібнювальні тіла подаються у вертикальну камеру.

Експлуатаційні відмінності від горизонтальної конструкції. Визначальною рисою принципу роботи вертикального бісерного млина є обертання вертикального вала, оснащеного перемішувачами пальцями чи дисками. Вертикальний рух та розбиття частинок, на відміну від горизонтальних рухів, бісер у вертикальному млині рухаються вгору та вниз. Ці вертикальні зіткнення та перемішування призводять до бажаного руйнування частинок [37].



**Рис. 1.2. Вертикальний бісерний млин Stainless Steel SL – 300 [26]**

Млини цього типу характеризуються невеликим об'ємом робочої камери (1–5 дм<sup>3</sup>) і використовуються переважно в лабораторних умовах або у виробництвах із низькою продуктивністю.

Вертикальні машини складаються з великої вертикальної подрібнювальної камери з центрально розташованою мішалкою і кількома подрібнюючими дисками. Попередньо змішаний матеріал надходить знизу, зрізається обертовими дисками та виходить через сепараційний пристрій у верхній частині. Незважаючи на здатність виконувати такі точні завдання, як свердління, різання, розточування та подрібнення, вертикальні верстати можуть бути обмежені проблемами об'єму завантаження середовища та псевдозрідженням, пов'язаними з використанням тонкого шліфувального середовища. Крім того, кінцевий розмір частинок часто обмежений приблизно

5 мікронами. У таких галузях, як керамічні чорнила, цифрові чорнила, обробка пігментів, частіше використовуються вертикальні бісерні млини [25].

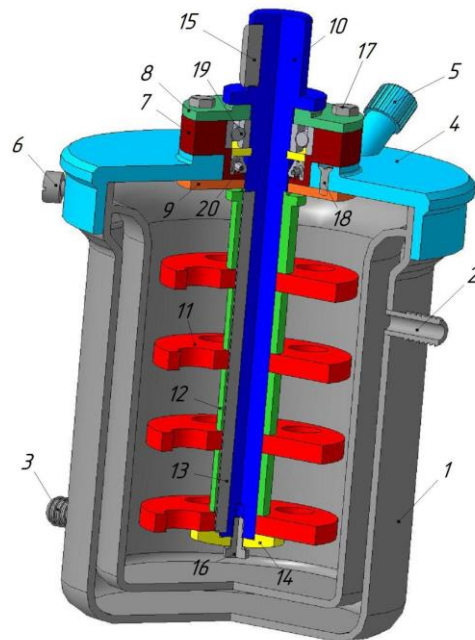
У робочій камері вертикального бісерного млина розміщується вал із закріпленими на ньому робочими елементами – дисками чи пальцями, частоту обертання якого можна регулювати в діапазоні від 130 до 2700 об/хв за допомогою частотного перетворювача. У стакан завантажуються бісер та оброблювана суспензія. Після цього стакан герметично закривається кришкою, яка одночасно утримує підшипниковий вузол із валом. Хвостова частина вала з'єднується з приводною муфтою, а сама робоча камера фіксується на станині млина. Тепло, що утворюється в процесі обробки, відводиться крізь охолоджувальну сорочку, розташовану всередині стакана.

З недоліків таких млинів – потреба у розбиранні робочої камери для видалення вмісту з метою відокремлення обробленої суспензії від бісеру та подальшого промивання бісеру. У процесі цього значна кількість продукту залишається на поверхні бісеру і під час промивання втрачається. Пускова потужність є вищою, оскільки робочі органи навантажені масою бісеру. Процес заміни деталей та ремонту окремих вузлів є більш трудомістким і складним.

Розглядаючи подрібнювальне обладнання для конкретного застосування, основним рішенням є орієнтація конструкції – вертикальна чи горизонтальна. Кожен тип представляє унікальні атрибути та переваги залежно від конкретного випадку використання.

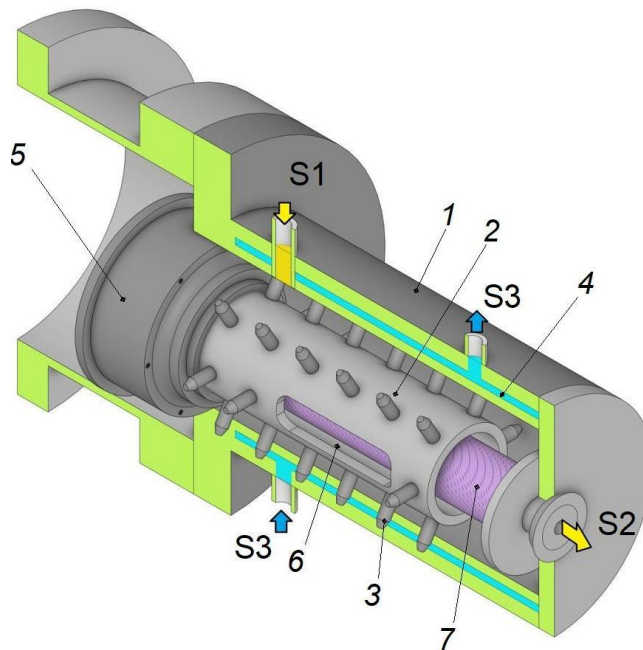
**Вертикальний млин.** Вертикальні млини містять розташовану по центру мішалку з декількома подрібнюючими дисками на вертикальній осі. Камера подрібнення містить мішалку та балансирний шків у основі, який спрямовує потік продукту. Ця конфігурація дозволяє виконувати такі точні завдання, як свердління, розточування, фрезерування та різання. Матеріал надходить знизу, піддається зсуву обертовими дисками та виходить через сепараційний пристрій у верхній частині. Однак вертикальні машини також мають обмеження. Їхня конструкція робить їх менш придатними для завантаження

носіями великого об'єму, насамперед через флотацію та стирання носія під дією сили тяжіння. Крім того, отримання наддрібних частинок може стати проблемою. Традиційне вертикальне обладнання часто досягає кінцевого розміру частинок близько 5 мікрон, що вимагає ретельного вибору розміру носія [25].



**Схема робочої камери лабораторного бісерного млина вертикального типу**

1 – стакан; 2, 3 – патрубки для охолоджувальної рідини; 4 – кришка; 5 – пробовідбірник; 6 – фіксатор кришки; 7 – підшипниковий вузол; 8 – кришка; 9 – шайба; 10 – вал; 11 – диск; 12 – втулка; 13 – шпонка; 14 – шайба; 15 – шпонка; 16–18 – гвинти; 19 – підшипник.

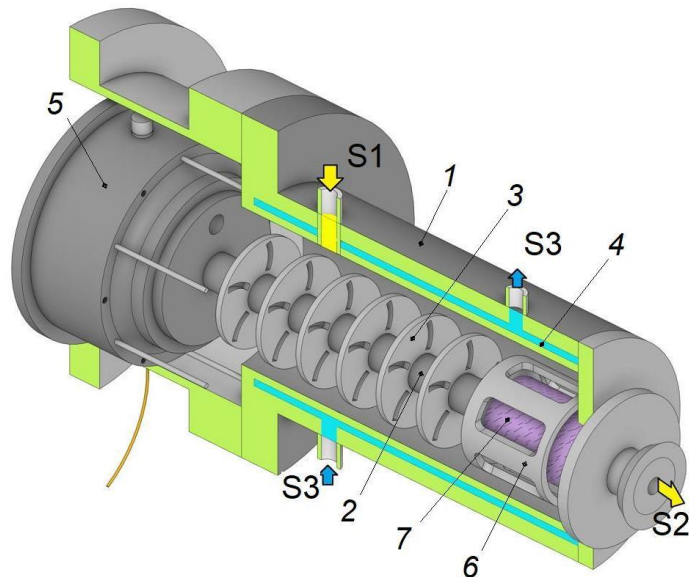


**Бісерний млин вертикальний з пальцевими робочими органами:**

1 – стакан; 2 – вал (ротор); 3 – робочі органи (пальці); 4 – сорочка охолоджувальна; 5 – вузол підшипниковий з ущільненнями; 6 – сепаратор бісеру відцентровий; 7 – сепаратор бісеру патронний;  
Патрубки: S1, S2, S3 – вводу, виходу суспензії і входу і виходу рідини у охолоджувальну сорочку.

**Горизонтальний млин.** Горизонтальні млини з горизонтальною трубчастою камерою подрібнення пропонують явні переваги для мокрого подрібнення. Вал мішалки з дисками розташований по центру, передача енергії відбувається від середовища до рідини, а не дисками, що призводить до рівномірного розподілу середовища та мінімізації фізичного стирання. Такі машини мають ряд переваг у мокрому подрібненні [25]:

- Ефективне використання малих носіїв, від 0,25 мм до 2 мм
- Значне зниження втрат продукції
- Покращена стійкість кольору, стійкість блиску та продуктивність
- До 300% скорочення часу процесу
- Близько 5% зниження витрат на сировину
- Мінімальне забруднення, втрата розчинника та очищення
- Стійкість до стирання
- Низькі вимоги до експлуатації, контролю та обслуговування
- Послідовна та передбачувана продуктивність



**Бісерний млин горизонтального типу з дисковими робочими органами**

1 – стакан; 2 – вал (ротор); 3 – робочі органи (диски); 4 – сорочка охолоджувальна; 5 – вузол підшипниковий з ущільненнями; 6 – сепаратор бісеру відцентровий; 7 – сепаратор бісеру патронний;  
Патрубки: S1, S2, S3 – вводу, виходу суспензії і входу і виходу рідини у охолоджувальну сорочку.

Вибір між вертикальними та горизонтальними млинами залежить від конкретного застосування.

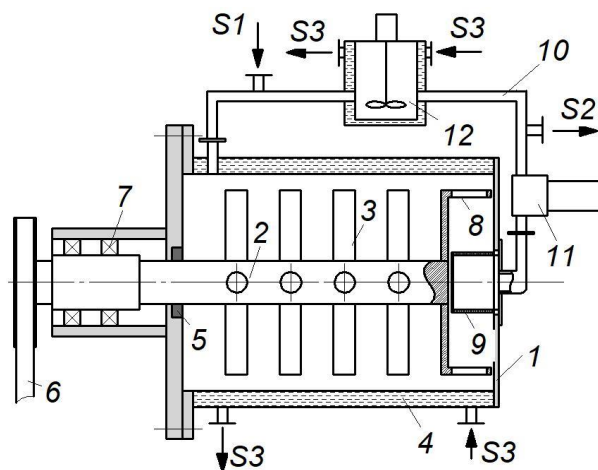
Горизонтальні, як правило, перевершують застосування вологого помелу завдяки їх ефективному використанню середовищ і надзвичайному зменшенню втрат продукту. І навпаки, вертикальні моделі можуть бути кращим вибором для завдань, що вимагають високої точності.

**1.4. Сепаратори суспензії від бісеру**

Інноваційні млини безперервної дії мають пристрої для відділення суспензії з клітинами (або твердими частинками) від бісеру. Без сепаратора неможливо забезпечити безперервне руйнування клітин, робочу камеру потрібно розбирати і відділяти на ситі суспензію від бісеру (Hrininh et al., 2018a). Значка кількість цінного продукту залишається на поверхні бісеринок і втрачається під час миття [24].

Найпростіший сепаратор бісеру – **щілинний**: між патрубком відведення і пластиною гвинтовим механізмом встановлюється зазор для проходження частинок суспензії з рідиною і не пропускання бісеру. Такі конструкції зараз маловживані. Щілинні сепаратори можуть закупорюватися грубими частинками.

Сепаратор (або фільтр) **патронного** типу виконується із пористого матеріалу, або дроту, який намотується на перфоровану трубку. Використовується для бісеру діаметром понад 0.1 мм. Такі рішення є не ефективними при значній концентрації бісеру в зоні розділення [13].



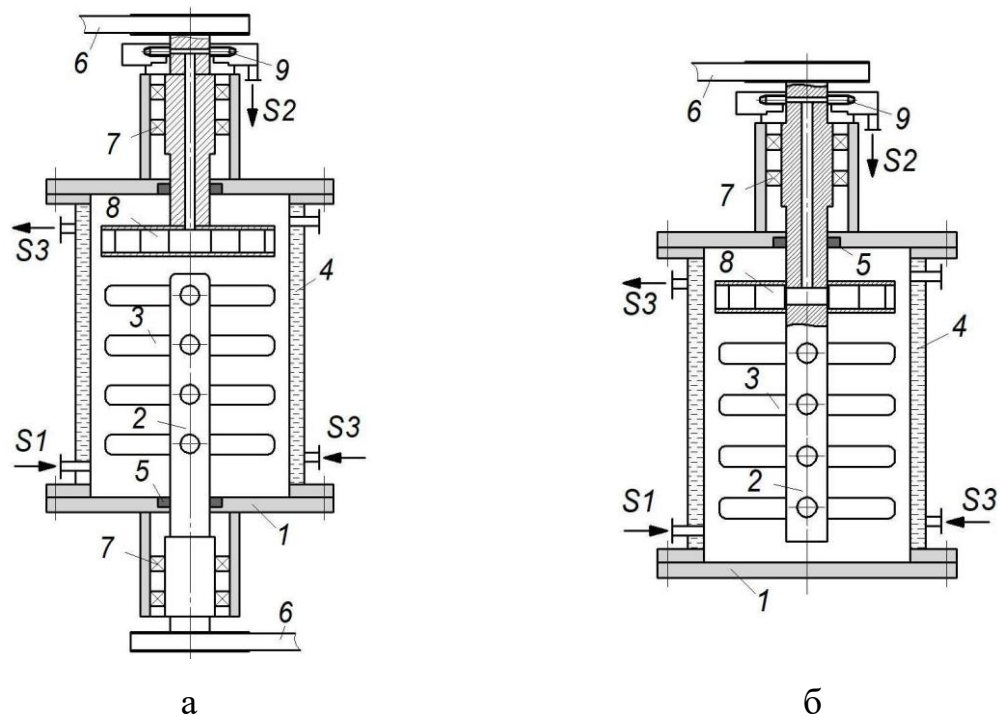
**Рис. 9. Бісерний млин з патронним (9) і відцентровим (8) сепараторами**

**Відцентровий** сепаратор (рис. 9) є ефективним порівняно із щілинним або патронним. Дозволяє відділяти найдрібніший бісер, до 15 мкм [13].

Сепаратор виготовляється в вигляді турбінни (колеса), насадженої на ротор млина. На зовнішній поверхні колеса є вікна, де потрапляє суспензія з продуктом або зруйнованими клітинами, і відводиться через ротор.

Умова роботи для відцентрового сепаратора: витрата суспензії має бути така, щоб її швидкість руху вглиб була більшою ніж швидкість руху часточок до стінок робочої камери під дією відцентрової сили. Бісер рухається назовні швидше, ніж частинки суспензії, та викидатися із сепаратора. Частинки разом з рідиною відводяться через пустотілий вал. Конструкція, де сепаратор

приводиться у рух від окремого приводу, є раціональною: це дозволяє налаштувати раціональні режими оброблення та відділення бісеру [32].



**Рис. 9. Конструкції сепараторів бісерних млинів:**

а – вертикальний млин із спільним приводом ротора і відцентрового сепаратора.

б – вертикальний млин із окремим приводом відцентрового сепаратора;

Отже, відцентровий сепаратор дозволяє якісно розділити оброблювальну суспензію від бісеру при раціональному виборі швидкості обертання.

## 1.5. Узагальнення будови бісерних млинів

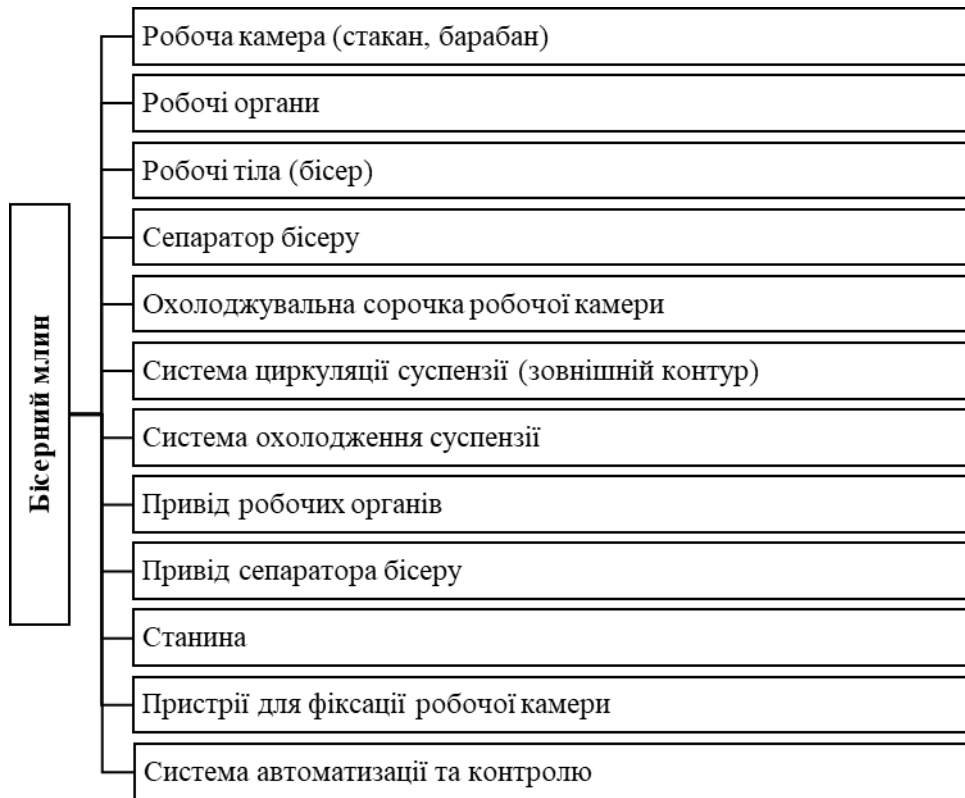


Рисунок 11. Структура млина



Рисунок 12. Робочі камери бісерних млинів

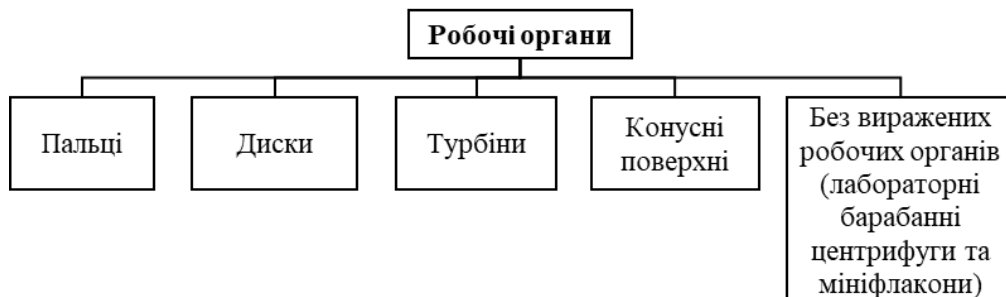
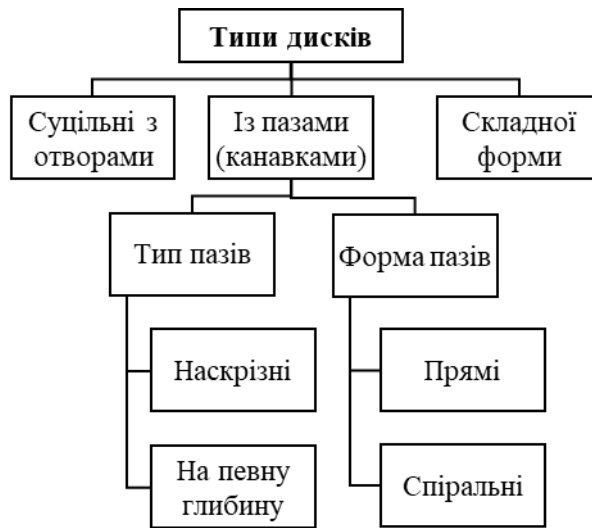
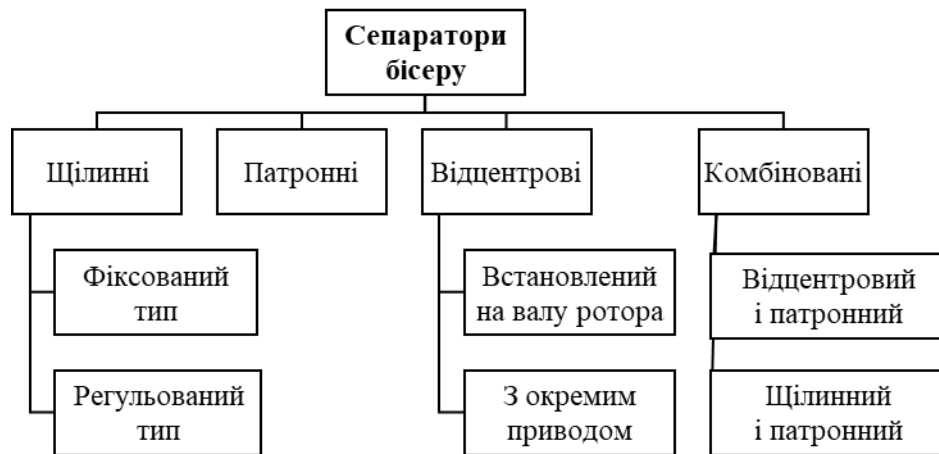


Рисунок 13. Робочі органи бісерних млинів



**Рисунок 14. Дисківі робочі органи**



**Рисунок 15. Сепаратори бісеру**

Пропонуємо як об'єкт модернізації взяти млин бісерний із горизонтальною робочою камерою, дисківими робочими органами, поєднанням відцентрового і атронного сепаратора, із зовнішнім контуром циркулювання оброблювальної суспензії. Тип бісеру – скляний, діаметр бісеру – 0.5 мм.

## Розділ 2

### Техніко-економічне обґрунтування

Клітини дріжджів, міцеліальних грибів, бактерій та одноклітинних водоростей містять у оболочці або цитоплазмі цінні компоненти, зокрема, полісахариди, білки, ферменти, ліпіди, біорозкладні полімери, амінокислоти, вітаміни, а також виробляють речовини з різними терапевтичними властивостями. Спосіб руйнування клітин у бісерних млинах використовується в основному для дріжджів і міцеліальних грибів, іноді – для деяких видів одноклітинних водоростей, із метою їх наступного розділення на тверду і рідку фази та отримання цінних компонентів [28].

Існують проблеми оброблення клітин мікроорганізмів у бісерних млинах, наприклад, організація безперервного процесу, очищення млина від залишків. Значна кількість цінного продукту може змиватися водою під час миття бісеру.

Щоб уникнути цих проблем, ми рекомендуємо встановити у робочій камері *сепаратор бісеру відцентрового типу*. Це дозволить:

- Безперервний відвід суспензії
- Якісне відділення суспензії від бісеру
- На відміну від інших сепараторів, не відбувається закупорення фільтрувальних елементів бісером та частинками суспензії.

Як результат:

- Бісерний млин не потрібно розбирати і промивати після кожного циклу оброблення
- Не втрачається цінний компонент під час миття бісеру
- Підвищується продуктивність праці, тому що відпадає необхідність розбирання і складання млина для видалення обробленого продукту, промивання та ТО.
- Млин можемо підключити до системи очищення СІР
- Млин можна підключити у поточковій лінії виробництва продукції мікробіологічного синтезу.

## Розділ 3

### Характеристика вихідної сировини і готового продукту

Бісерний млин призначений для руйнування клітин багатьох видів мікроорганізмів, зокрема, дріжджів, міцеліальних грибів, одноклітинних водоростей. Проте, наведемо приклад конкретного застосування.

#### Вхідна сировина:

Водна суспензія дріжджів. Концентрація – 5% (за сухим продуктом) або 25% (за пресованими дріжджами) [28].

#### Робочі тіла:

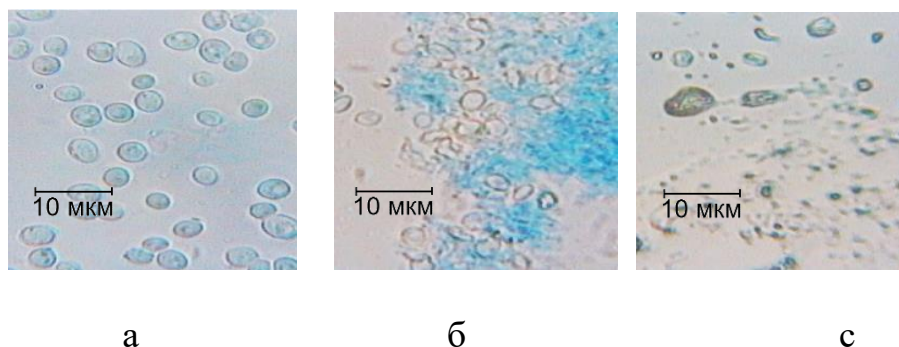
Бісер скляний або металевий. Заповнення робочої камери бісером – 80%.  
Діаметр бісеру – 0.5 мм (або фракція 0.4–0.6 мм).

#### Вихідний продукт:

Суспензія зруйнованих дріжджових клітин.

Клітини не мають бути розірвані, а лише зруйновані (рис. 3.1, б).

Під мікроскопом це виглядає так (рис. 3.1) [42 ]:



**Рис. 3.1. Клітини дріжджів на різних руйнування [ 42]:**

**а – цілі клітини;**

**б – зруйновані клітини, але не розірвані;**

**в – фрагменти клітин**

Розривати клітини до стану окремих фрагментів нераціонально, тому що на це витрачається зайва енергія та час.

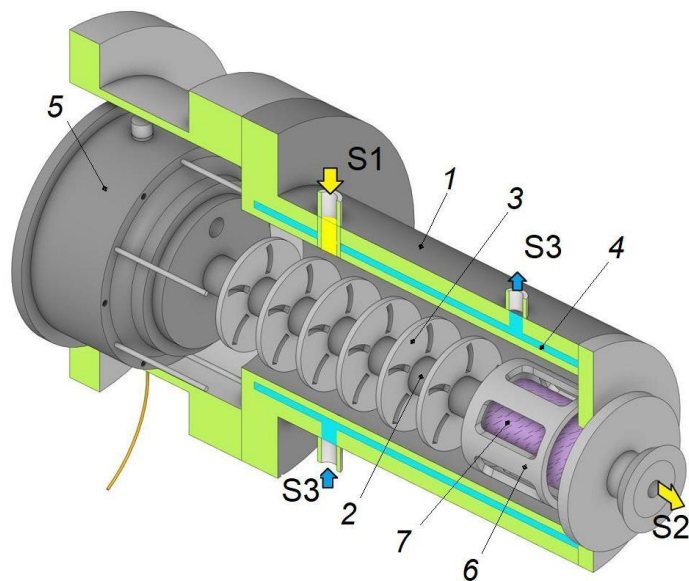
Далі, із зруйнованих клітин видаляємо рідку фазу на центрифuzі трьохколонній фільтрувальній, а далі з клітинних стінок видобуваємо бета-глюкан методом екстагування у лужному середовищі [5 ].

## Розділ 4

### Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи обладнання

#### 4.1. Схема обладнання

Зобразимо запроповану конструкцію бісерного млина схематично (рис. 4.1).



**Рис. 4.1. Бісерний млин горизонтального типу з дисковими робочими органами [28]**

1 – стакан; 2 – вал (ротор); 3 – робочі органи (диски); 4 – сорочка охолоджувальна; 5 – вузол підшипниковий з ущільненнями; 6 – сепаратор бісеру відцентровий; 7 – сепаратор бісеру патронний;  
Патрубки: S1, S2, S3 – вводу, виходу суспензії і входу і виходу рідини у охолоджувальну сорочку.

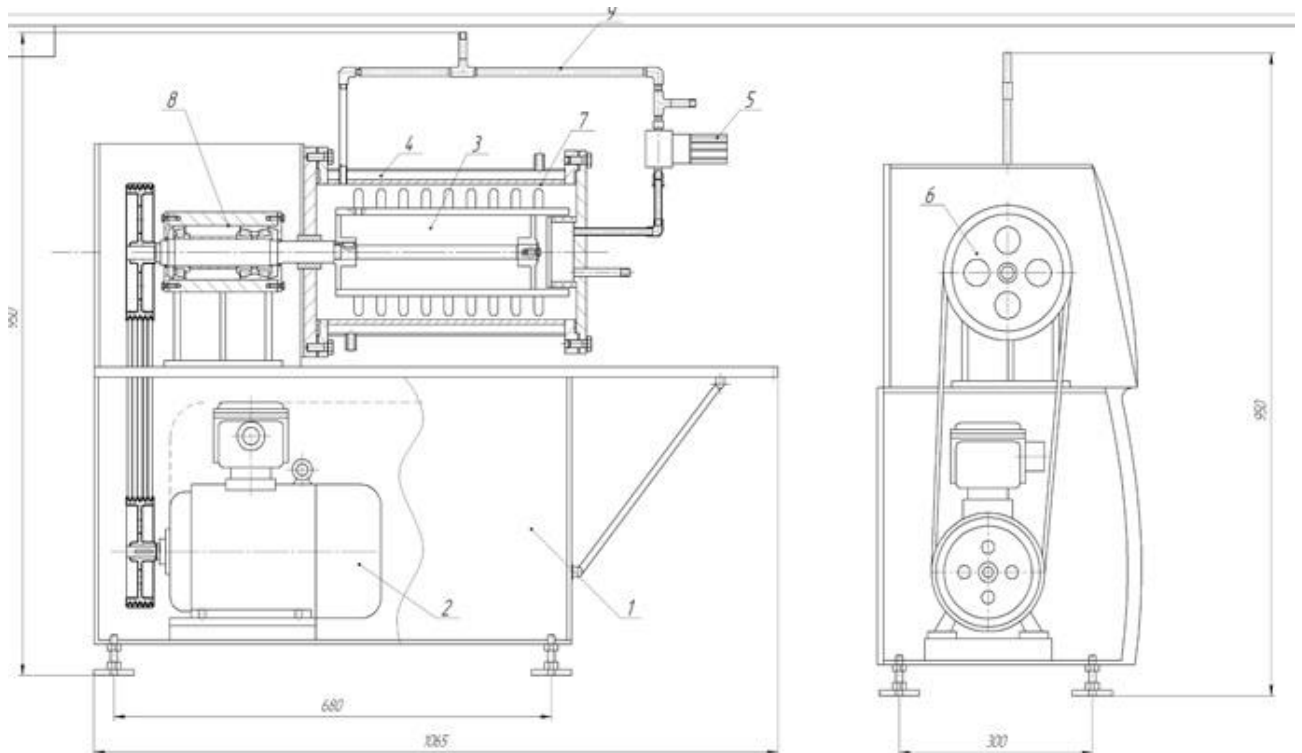
Диски 3 кріпляться на роторі 2 за допомогою шпонок і втулок. Частота обертання ротора – 1000–2000 об/хв (регулюється перетворювачем частоти). Суспензія дріжджів безперервно подається у патрубок S1 і відводиться через S2. Перед відведенням дріжджова суспензія проходить пристрій для відділення бісеру – сепаратори відцентровий 6 і патронний 7. Сепаратор

виготовлений у вигляді окремого турбінного колеса, яке надягається на торець ротора.

Охолоджувальна рідина подається і відводиться з охолоджувальної сорочки через патрубки S3.

#### 4.2. Опис бісерного млина

Для модернізації обрано бісерний млин горизонтального типу (рис. 4.2)



**Рис 4.2. Горизонтальний бісерний млин:**

- 1 – станина; 2 - електродвигун; 3 – ротор;
- 4 - диски; 5 –насос циркуляційний;
- 6 - шків; 7 - сепаратор; 8 - підшипниковий вузол;
- 9 – циркулярний контур.

Корпус бісерного млина спирається на опори 1.

Суспензія надходить у млин через патрубки в кришці, і клітини руйнуються між бісерниками. Готовий продукт проходить через відцентровий сепаратор, сітчастий патронний фільтр і видаляється з млина.

Оберткові диски і сепаратор розташовані на роторі 3, який закріплений в підшипниковому вузлі 8. Вал обертається від шківів 6, який отримує рух від двигуна через пасову передачу.

Використовуємо бісер склінний або сталевий діаметром 0.5 мм.

### **4.3. Опис модернізації**

Модернізацію проводимо за рахунок удосконалення системи відділення дріжджової суспензії від бісеру.

До встановленого патронного сепаратора, додатково встановлюємо сепаратор відцентрового типу.

Відцентрова сила, створювана відцентровим сепаратором у вигляді турбінного колеса, викидає бісер назовні сепаратора. Дрібні частинки дріжджів і рідина під напором потрапляють всередину і відводяться через патронний сепаратор та ідуть далі у систему циркуляції.

Модернізація дозволяє забезпечити:

- Безперервний відвід суспензії
- Якісне відділення суспензії від бісеру
- На відміну від інших сепараторів, не відбувається закупорення фільтрувальних елементів бісером та частинками суспензії.

Як результат:

- Бісерний млин не потрібно розбирати і промивати після кожного циклу оброблення
- Не втрачається цінний компонент під час миття бісеру
- Підвищується продуктивність праці, тому що відпадає необхідність розбирання і складання млина для видалення обробленого продукту, промивання та ТО.
- Млин можемо підключити до системи очищення СІР
- Млин можна підключити у потоковій лінії виробництва продукції мікробіологічного синтезу.

## Розділ 5

### Вибір конструкційних матеріалів

Вибираємо такі матеріали для деталей і вузлів бісерного млина (таблиця 5) [71, 72].

Таблиця 5

#### Вибір конструкційних матеріалів деталей бісерного млина

Деталь (вузол)	Матеріал
Рама	СЧ 20
Шків	Сталь 45
Підшипниковий вузол	Сталь 45 (загартована)
Корпус (робоча камера) млина Диски Сепаратор бісеру Ротор	Сталь нержавіюча, загартована 12X18H10T
Бісер	Скло
Кожухи	Ст. 3
Трубопроводи циркуляційні	Сталь нержавіюча 12X18H10T
Кріпильні елементи – болти, шайби, гайки робочої камери	Сталь нержавіюча 12X18H10T
Кріпильні елементи – болти, шайби, гайки робочої камери, які не контактують з оброблювальним середовищем	Сталь 45
Патрубки для суспензії та охолоджувальної рідини	Сталь нержавіюча 12X18H10T

## Розділ 6

### Розрахункова частина

#### 6.1. Розрахунок продуктивності

Продуктивність – 15.0 кг/год.

Час оброблення – 60 хв.

Маса бісеру у робочій камері – 10 кг.

Густина пасти – 900 кг/м<sup>3</sup>

Густина бісеру – 4100 кг/м<sup>3</sup>

Об'єм бісеру і суспензії:

$$V = m_{\text{п}}/\rho_{\text{п}} + m_{\text{б}}/\rho_{\text{б}} = 15/900 + 10/4100 = 0,0191 \text{ м}^3$$

Отже, об'єм барабана має бути 0,00191 м<sup>3</sup>

Приймаємо внутрішній діаметр барабана – 200.0 мм.

Діаметр валу – 70.0 мм.

Довжина барабану для забезпечення заданої продуктивності:

$$L = \frac{4V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0.0191}{\pi \cdot 0.2^2} = 0.6 \text{ м}$$

#### 6.2. Розрахунок потужності приводу

Робота на надання швидкості [24]:

$$A_1 = \frac{m_p \cdot R^2 \cdot \omega^2}{2} = \frac{12 \cdot 0,01^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1000}{30}\right)^2}{2} = 644 \text{ Дж.}$$

1. N<sub>1</sub> – розганяння ротора (вал, диски, шків);
2. N<sub>2</sub> – на розгін суспензії та бісеру.

Потужність на розгін ротору:

$$N_1 = \frac{A_1}{1000\tau} = \frac{644}{1000 \cdot 1} = 0,65 \text{ кВт,}$$

де  $m_p$  – маса ротора, кг;

$R$  – радіус ротора;

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

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

$\tau$  – час розгону ротора, сек.

Робота на надання кінетичної енергії суспензії та бісеру [40]:

$$A_2 = \frac{m_c \cdot (R^2 - r^2) \omega^2}{4} = \frac{9 \cdot (0,12^2 - 0,025^2) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1000}{30}\right)^2}{4} = 333 \text{ Дж.}$$

Тоді

$$N_2 = \frac{A_2}{1000 \tau \eta} = \frac{333}{1000 \cdot 1 \cdot 0,5} = 0,67 \text{ кВт,}$$

де  $R$  і  $r$  – зовнішній і внутрішній радіуси;

$\eta$  – коефіцієнт перемішування;

$\eta = 0,5$ .

Загальна потужність:

$$N = \frac{N_1 + N_2}{\eta_{\text{пр}}} = \frac{0,65 + 0,67}{0,9} = 1,46 \text{ кВт.}$$

Враховуючи рекомендації для проектування бісерних млинів, для млину малої продуктивності ( $m = 15$  кг/год) приймаємо  $N_{\text{двигуна}} = 5,5$  кВт.

### 6.3. Кінематичний розрахунок

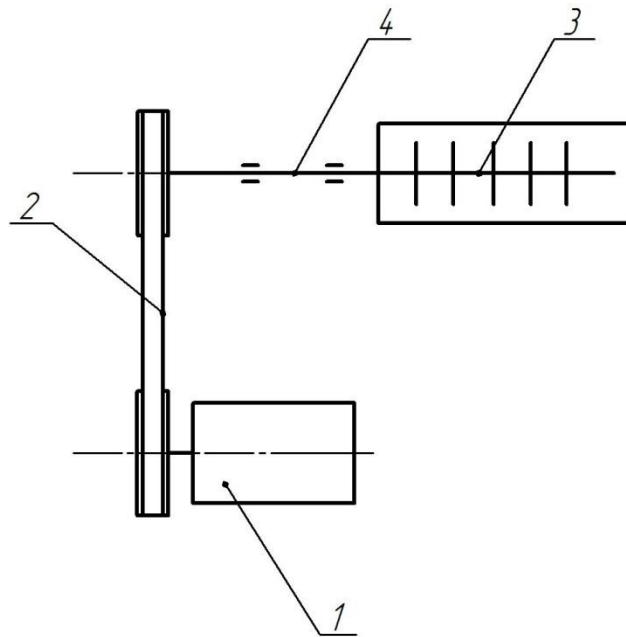


Рис. 6.1. Кінематична схема приводу млина:

1– двигун; 2– пасова передача; 3– ротор; 4– підшипниковий вузол

$n_2$  - 1000 об/хв.;  $n_1$  – 1000 об/хв.

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

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

$$T = \frac{9580 N}{n} = \frac{9580 \cdot 1,5}{1000} = 14,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### 6.4. Розрахунок вузлів і деталей на міцність

#### 6.4.1. Розрахунок пасової передачі

Для розрахунку візьмемо наступні початкові дані  $N_{об}=0,285$  кВт,  
 $n_{об}=1485$  об/хв,  $U_{н.н.}=2$ .

Крутній момент на валу двигуна:

$$T_1 = \frac{9550 \cdot N_{\text{дв}}}{n_{\text{дв}}} = \frac{9550 \cdot 0,266}{985} = 14,3, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

де  $N_{\text{дв}}$  – потужність на валу двигуна (14,3 кВт);

$n_{\text{дв}}$  – кількість обертів на валу двигуна (985 об/хв).

Вибираємо переріз паса „О” з розмірами :  $b_p=8,5$  мм,  $h=6$  мм,  $b_0=10$  мм,  $y_0=2,1$  мм,  $F_1=0,47$  см<sup>2</sup>,  $q=0,07$  кг/м[31,36,38,41,42].

Діаметр меншого шківів у відповідності з рекомендаціями табл. 2.12, приймаємо  $d_{p \text{ min}}=63$  мм.

Діаметр більшого шківів, знаходимо за формулою:

$$d_{p2} = d_{p1} \cdot U \cdot (1 - \varepsilon) = 63 \cdot 2,5 \cdot (1 - 0,02) = 154,35, \text{ мм};$$

де  $d_{p1}$  – діаметр ведучого шківів (160 мм);

$U$  – передаточне число пасової передачі (1);

$\varepsilon$  – коефіцієнт проковзування пасів по шківів (0,02).

Стандартний діаметр  $d_{p2}$  вибираємо з ряду стандартних значень за ГОСТом 17883-73 (табл. 2.21)  $d_{p2}=160$  мм.

Після знаходження фактичних розмірів шківів, розрахуємо фактичне передаточне число:

$$U_p = \frac{d_{p2}}{d_{p1} \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{160}{160 \cdot (1 - 0,02)} = 1,02;$$

де  $d_{p2}$  – діаметр веденого (другого) шківів (160 мм)

$d_{p1}$  – діаметр ведучого (першого) шківів (160 мм)

$\varepsilon$  – коефіцієнт проковзування пасів по шківів (0,02).

Це число допускається оскільки відхилення від заданого  $U=1$  в межах 5 %.

Швидкість паса:

$$V = \frac{\pi \cdot d_{p1} \cdot n_1}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 160 \cdot 1485}{60 \cdot 1000} = 4,890, \text{ м/с};$$

де  $d_{p1}$  – діаметр ведучого шківів (160 мм);

$n_1$  – кількість обертів на першому валу (1485 об/хв).

Частота обертання веденого вала:

$$n_{P2} = \frac{d_{P1} \cdot n_1 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{P2}} = \frac{63 \cdot 985 \cdot (1 - 0,02)}{160} = 573, \text{ об/хв};$$

Значення  $n_{P2}$  входить в поле допустимих значень 5 %.

Міжосьова відстань:

$$a = 0,95 \cdot d_{P2} = 0,95 \cdot 160 = 152, \text{ мм};$$

За таблицею 2.14 вибираємо співвідношення веденого вала да міжосьової відстані – 1,5, тоді приймаємо міжосьову відстань  $a=240$  мм.[67]

Розрахункова довжина паса:

$$L = 2 \cdot a + \frac{\pi}{2} (d_{P1} + d_{P2}) + \frac{(d_{P2} - d_{P1})^2}{4 \cdot a} =, \text{ мм};$$

де  $a$  – міжосьова відстань (240 мм);

$d_{P1}$  – діаметр ведучого шківa (63 мм);

$d_{P2}$  – діаметр веденого шківa (160 мм).

$$L = 2 \cdot 240 + \frac{3,14}{2} \cdot (63 + 160) + \frac{(160 - 63)^2}{4 \cdot 240} = 839 \approx 830, \text{ мм}.$$

Стандартна величина  $L=830$  мм.

Початкова потужність при  $d_{P1}=63$  мм і  $V=4,89$  м/с ,  $N_0=0,285$  кВт.

Кут охоплення на меншому шківу

$$\alpha_1^0 = 180^\circ - 60^\circ \cdot \frac{d_{P2} - d_{P1}}{a}$$

де  $d_{P1}$  – діаметр ведучого шківa (63 мм);

$d_{P2}$  – діаметр веденого шківa (160 мм);

$a$  – міжосьова відстань (240 мм).

$$\alpha_1^0 = 180^\circ - 60^\circ \cdot \frac{160 - 63}{240} = 155^\circ [\alpha] = 110^\circ$$

Коефіцієнт кута охоплення  $C_a=0,925$ .

Поправка до крутного моменту на передаточне число  $\Delta T_i=0,50$  Н·м.

Поправка до потужності:

$$\Delta N_i = 0,0001 \cdot \Delta T_i \cdot n_1 = 0,0001 \cdot 0,5 \cdot 1485 = 0,07425, \text{ кВт};$$

де  $\Delta T_i$  – поправка до крутного моменту (0,5 Н·м);

$n_1$  – кількість обертів на першому валу (1485 об/хв).

Коефіцієнт режиму роботи  $C_p=0,87$ .

Допустима потужність на пас:

$$[N] = (N_0 \cdot C_\alpha \cdot C_L + \Delta N_i) \cdot C_p, \text{ кВт};$$

де  $N_0$  – початкова потужність при  $d_{PI}=63$  мм і  $V = 4,89$  м/с ;  $N_0=0,285$  кВт;

$C_\alpha$  – коефіцієнт кута охоплення (0,925);

$C_L$  – коефіцієнт довжини (0,89);

$C_p$  – коефіцієнт режиму роботи (0,87);

$N_0$  – початкова потужність (0,285 кВт);

$\Delta N_i$  – поправка до потужності (0,07425 кВт).

$$[N] = (0,285 \cdot 0,925 \cdot 0,89 \cdot 0,07425) \cdot 0,87 = 0,015, \text{ кВт}.$$

Розрахункове число пасів:

$$Z = \frac{N}{[N]}, \text{ шт.};$$

де  $N$  – потужність яку потрібно передати пасовою передачею  
 $N=0,07425$  кВт

$[N]$  – допустима потужність на один пас (0,06 кВт).

$$Z = \frac{0,07425}{0,06} = 1,8, \text{ шт}.$$

Коефіцієнт враховуючий нерівномірність навантаження  $C_z=0,9$ .

Дійсне число пасів у передачі:

$$Z' = \frac{Z}{C_z} = \frac{1,8}{0,9} = 2, \text{ шт}.$$

Приймаємо число пасів  $Z'=2$  шт.

#### 6.4.2. Розрахунок валу

Виконаємо розрахунок валів у небезпечних перерізах. Із попередніх розрахунків маємо:

$$Q_{пас} = 750 \text{ Н};$$

$$P_{нат} = 500 \text{ Н};$$

$$a=0,94 \text{ мм};$$

$$b=0,6 \text{ мм};$$

$$c=0,7 \text{ мм};$$

Розрахунок проводимо з побудовою епюр згинальних моментів:

Знаходимо реакції у опорах:

Вертикальна площина: xz

$$\sum M(B)=0 \quad R_{cz} \cdot b + F_i \cdot (b+c) = 0 \quad R_{cz} = \frac{F_n \cdot (b+c)}{b} = \frac{500 \cdot (60+70)}{60} = 1083 \text{ Н}$$

$$\sum M(c)=0 \quad R_{Bz} \cdot b + F_n \cdot c = 0 \quad R_{Bz} = \frac{F_n \cdot c}{b} = \frac{500 \cdot 70}{60} = 583 \text{ Н}$$

Горизонтальна площина: xy

$$\sum M(B)=0 \quad F_{nac} \cdot a - R_{cx} \cdot b = 0 \quad R_{cx} = \frac{F_{nac} \cdot a}{b} = \frac{750 \cdot 94}{60} = 1175 \text{ Н}$$

$$\sum M(C)=0 \quad R_{Bx} \cdot b + F_{nac} \cdot (a+b) = 0 \quad R_{Bx} = \frac{F_{nac} \cdot (a+b)}{b} = \frac{750 \cdot (94+60)}{60} = 1925 \text{ Н}$$

Визначаємо момент згинання

$$M_{3z} \text{ площа } xz \quad M_A = M_{|B|} = M_{|\Delta|} = 0 \text{ Нм} \quad M_c = F_n \cdot c = 500 \cdot 70 = 35 \text{ Нм}$$

$$M_{3z} \text{ площа } xy \quad M_A = M_c = M_D = 0 \text{ Нм} \quad M_B = -F_{nac} \cdot a = -750 \cdot 94 = -70,5 \text{ Нм}$$

Сумарна епюра згинальних моментів:

$$M_{\text{сум}}^B = \sqrt{0^2 + 70,5^2} = 70,5 \text{ Нм}; \quad M_{\text{сум}}^c = \sqrt{35^2 + 0^2} = 35 \text{ Нм}$$

$$\dot{O}_{\delta\delta} = 8,44 \dot{I}$$

Розраховуємо сумарна епюру згинальних моментів для характерних точок валу:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{M_{\text{сум}}^2 + (IT)^2}; \quad M_{\text{екв}}^A = \sqrt{0 + (8,44)^2} = 8,44 \text{ Нм};$$

$$M_{\text{екв}}^B = \sqrt{(70,5)^2 + (8,44)^2} = 71 \text{ Нм}; \quad M_{\text{екв}}^C = \sqrt{35^2 + 8,44^2} = 36 \text{ Нм};$$

Звідки знаходимо значення реакції в опорі А:

$$R_A^{\text{сop}} = \frac{Q_{nac} \cdot (a+b+c+d)}{b+c+d} = \frac{750 \cdot 0,771}{0,657} = \frac{578,25}{0,657} = 880,1, \text{ Н};$$

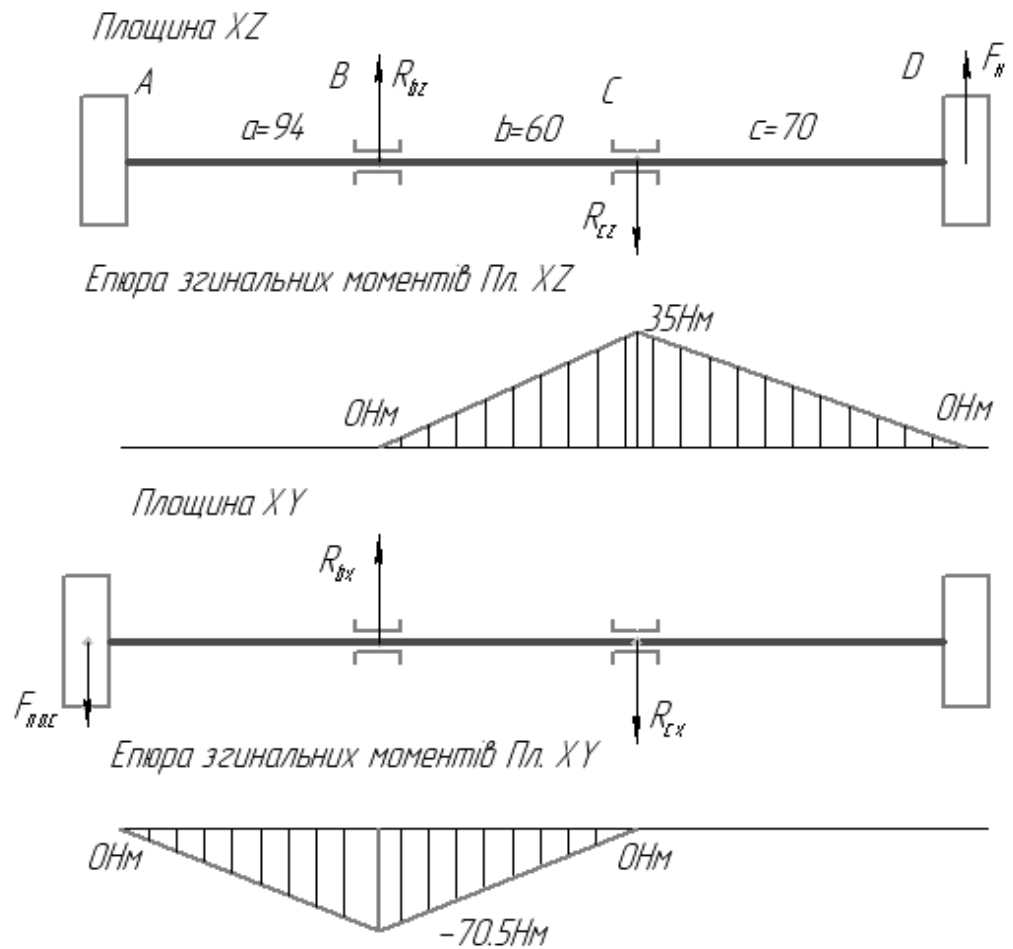
$$M_{екв}^D = \sqrt{0 + 8,44^2} = 8,44 \text{ Нм};$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{екв}}{0,1 \cdot [\sigma]}} \quad d_A = \sqrt[3]{\frac{8,44 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 55}} = 11,5 \text{ мм} \Rightarrow d_A = 25 \text{ мм}$$

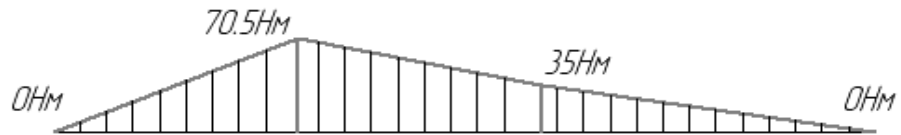
$$d_B = \sqrt[3]{\frac{71 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 55}} = 23,46 \text{ мм} \Rightarrow d_B = 40 \text{ мм}$$

$d_C = d_B = 40 \text{ мм}$  - розмір під підшипники

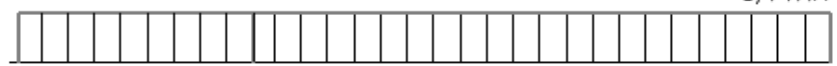
$$d_D = \sqrt[3]{\frac{8,44 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 55}} = 11,5 \text{ мм} \Rightarrow d_0 = 48 \text{ мм}$$



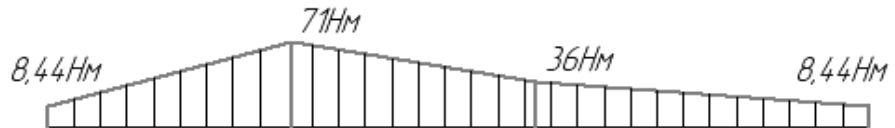
Елюра сумарних згинальних моментів



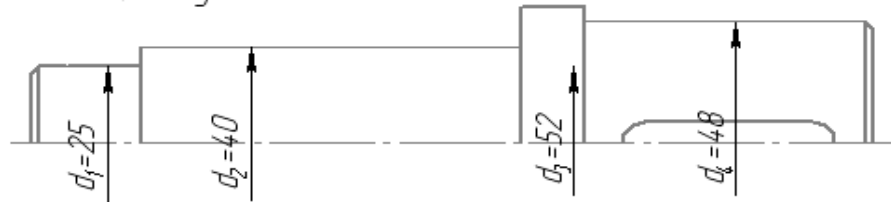
Елюра крутних моментів



Елюра еквівалентних моментів



Ескіз валу



### 6.5.1. Розрахунок шпонкових з'єднань

Крутний момент на валу двигуна:

$$T_1 = \frac{9550 \cdot N_{np}}{n_{ос}} = \frac{9550 \cdot 1,5}{985} = 14,3, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Вал	$n$ , об/хв	$N$ , кВт	$T$ , Н·м
1 двигун	985	1,5	14,3

Небезпечна деформація шпонок і пазів - змінання від крутного моменту [67].

Матеріал шпонки Сталь 45. Допустиме напруження змінання  $[\sigma_{зм}] = 170$  МПа.

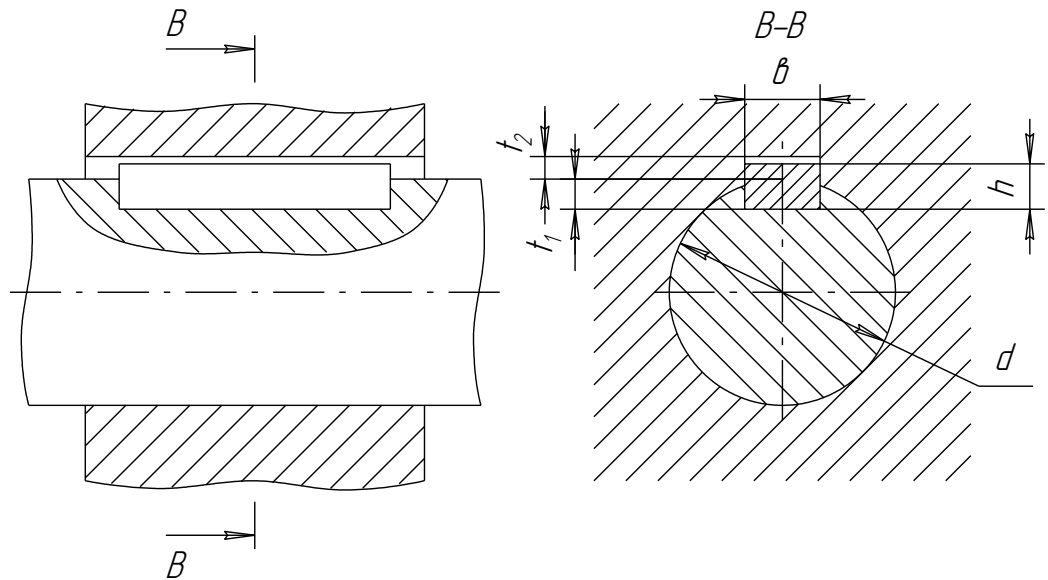


Рис.6.3. Ескіз шпонкового з'єднання

За діаметром  $d=50$  мм (вал барабана) вибираємо такі розміри з'єднання:

ширина шпонки  $b=14.0$  мм;

висота шпонки  $h=9.0$  мм;

глибина пазу на валу  $t_1=5,50$  мм;

глибина пазу у маточині колеса  $t_2=3,80$  мм;

довжина шпонки  $l=1370$  мм (приймаємо  $l=55.0$  мм);

Визначаємо робочу довжину шпонки:

$$l_p = l - b = 55 - 14 = 41, \text{ мм};$$

Перевіряємо міцність з'єднання на зминання:

$$\sigma_{зм} = \frac{2T_2}{d l_p (h - t_1)} = \frac{2 \cdot 8,44 \cdot 10^3}{50 \cdot 41 \cdot (14 - 5,5)} = 0,97 \leq [\sigma_{зм}], \text{ МПа};$$

Розраховуємо робочу довжину шпонки[29, 36, 39,40]:

$$l'_p \geq \frac{2T_2}{d(h - t_1)[\sigma_{зм}]} = \frac{2 \cdot 8,44 \cdot 10^3}{50 \cdot (14 - 5,5) \cdot 170} = 0,23, \text{ мм};$$

приймаємо  $l_p=41$  мм.

Міцність з'єднання достатня, вибираємо шпонку призматичну 14\*9\*55

## 6.5.2. Розрахунок та підбір підшипників

Необхідно, щоб виконувалась умова [67]:

$$C_{розр} = C_{кат};$$

де  $C_{кат}$  – динамічна вантажопідйомність підшипників за каталогом — це таке радіальне навантаження, при якому група підшипників відпрацьовує ресурс у 1 мільйон обертів, при надійності не менше 90 %;

$C_{розр}$  – розрахункова вантажопідйомність підшипників:

$$C_{розр} = P_{екв} \sqrt[L]{L};$$

де  $L$  – довговічність;

$$P = 3,33;$$

$P_{екв}$  – еквівалентне радіальне навантаження на підшипник:

$$P_{екв} = (XV F_r + Y F_a) K_\sigma K_T;$$

де  $X, Y$  – коефіцієнти відповідно радіального і осьового навантаження на підшипник, залежать від співвідношення радіальної і осьової сил;

$V$  – коефіцієнт кільця ( $V=1$  – оберт. внутрішнє кільце,  $V=1,2$  – оберт. зовнішнє кільце);

$K_\sigma$  – коефіцієнт безпеки (залежить від виду машини ( $1 \leq K_\sigma \leq 4$ ));

$K_m$  – залежить від температури підшипника ( $K_m=1$ , до  $T \leq 120^\circ \text{C}$ );

$F_r$  – радіальна сила ( $F_r = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ );

$F_a$  – осьове зусилля [29, 36, 39, 40].

Розглянемо особливості розрахунку осьових зусиль для радіально упорних підшипників.

$$F = 0,83e F_r;$$

де  $e$  – коефіцієнти осьового навантаження;

$V$  – коефіцієнт кільця ( $V=1$  – оберт. внутрішнє кільце,  $V=1,2$  – оберт. зовнішнє кільце);

Підберемо підшипники, для цього знайдемо радіальні сили в опорах [29, 36, 39, 40]:

$$F_{rA} = \sqrt{(R_A^{всрм})^2 + (R_A^{зоп})^2} = \sqrt{500^2 + 880^2} = 1012,1 \text{ Н};$$

$$F_{rB} = \sqrt{(R_B^{всрм})^2 + (R_B^{зоп})^2} = \sqrt{500^2 + 130^2} = 516,6 \text{ Н};$$

$$F_{ас} = 0, \text{ Н}.$$

Приймаємо попередньо підшипник серії 7606 ГОСТ 333 – 79.

- діаметр вала під підшипник  $d=50 \text{ мм}$ ;
- частота обертів вала  $380 \text{ об/хв}$ ;
- коефіцієнт обертів кільця  $V=1$ ;
- коефіцієнт безпеки  $K_{\sigma}=1,2$ ;
- довговічність  $L_h=35000$ ;

Осьові складові радіальних навантажень:

$$F_{SA} = 0,83eF_{r1} = 0,83 \cdot 0,32 \cdot 1012,1 = 268,8, \text{ Н};$$

$$F_{SB} = 0,83eF_{r2} = 0,83 \cdot 0,32 \cdot 516,6 = 137,2, \text{ Н};$$

Розрахункове осьове навантаження:

$$\text{для підшипника I: } F_{a1} = F_{S1} = 268,8, \text{ Н};$$

$$\text{для підшипника II: } F_{a2} = F_{S2} + F_{ас} = 137,2 + 0 = 137,2, \text{ Н};$$

Знаходимо відношення  $\frac{F_a}{VF_r}$ :

$$\text{для підшипника I: } \frac{F_{a1}}{VF_{r1}} = \frac{268,8}{1,0 \cdot 1012,1} = 0,27 < e = 0,32;$$

$$\text{для підшипника II: } \frac{F_{a2}}{VF_{r2}} = \frac{137,2}{1,0 \cdot 516,6} = 0,27 < e = 0,32;$$

Приймаємо  $X=0,4$ ,  $Y=1$ . Оскільки для обох опор підшипники вибирають однакові, то розрахунок ведемо по більш навантаженому з підшипнику:

$$P_{екв} = [XF_{r1} + YF_{a2} - (F_{ас} - F_2)]K_{\sigma}K_T, \text{ Н};$$

$$P_{екв} = [0,4 \cdot 1012,1 + 1,0 \cdot 137,2 - (0 - 500)] \cdot 1,05 \cdot 1,2 = 1312,9, \text{ Н};$$

$$L = \frac{60nt_{екв}}{10^6} = \frac{60 \cdot 970 \cdot 14600}{10^6} = 849,72, \text{ год};$$

$$C_{розр} = P_{екв} \sqrt[3,33]{L} = 1312,9 \cdot \sqrt[3,33]{849,72} = 9951,6;$$

$$C_{розр} < C_{кат} (9951,6 < 61300) ;$$

Отже, приймаємо підшипник на вал барабану серії 7606 ГОСТ 333-79.

Визначимо кількість замін підшипників за весь термін служби привода

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left( \frac{C_{кат}}{P_{екв}} \right)^P = \frac{10^6}{60 \cdot 970} \cdot \left( \frac{61300}{1312,9} \right)^{3,33} = 6217403 ;$$

$$\frac{t_{екв}}{L_h} = \frac{14600}{6217403} = 0,002,$$

Отже, підшипники підібрані правильно.

## Розділ 7

### Технологічний маршрут виготовлення деталі

#### 7.1. Вибір деталі та обґрунтування вибору матеріалів

Шків не піддається впливу агресивного середовища, і повинен забезпечувати тривалу безперебійну роботу. Оптимальним варіантом для виготовлення заготовки є лиття. Враховуючи умови експлуатації, а також властивості різних матеріалів, доцільно використати сталь 45Л — ливарну конструкційну сталь. Рекомендований режим термічної обробки заготовки: загартування при 860–880 °С та відпуск при 550–600 °С.

#### 7.2. Перевірка деталі «Шків» на відповідність умов взаємозамінності, надійності та довговічності

Конструкція деталі «Шків» дозволяє виконувати її обробку на універсальному верстатному обладнанні з використанням стандартного різального інструменту. За результатами проведеного якісного та кількісного аналізу технологічності, дана деталь визнана технологічною. Вона має достатній запас міцності та жорсткості, що забезпечує можливість надійного закріплення як у патроні, так і за допомогою прижимних пристроїв під час механічної обробки.

Однією з основних причин поломки «шківа» є сильна перевантаження, що йде від приводного ременя. Таку перевантаження викликають несправності деталей ремінного приводу двигуна . Види руйнування шківа:

- 1) Значна перегрузка шківа, викликана дуже швидким рухом ременя.
- 2) Регулювання зміни навантаження на шків, викликана сильним коливанням швидкості обертання
- 3) Надмірне навантаження на шків , викликане збільшеним крутним моментом двигуна.

4) Підвищене тертя поршневого механізму компресора в результаті використання масла неправильної специфікації.

### 7.3. Розробка робочого креслення деталі «Шків»

Заготовку отримуємо литвом.

Припуск на підрізання торців становить  $1,5 \cdot 2 = 3$  мм.

Отже, заготовка являє собою  $\varnothing 203$  мм і довжиною 48 мм.

Розрахунок загального припуску литої заготовки ведемо за найточнішим розміром  $\varnothing 17$  Н7.

Припуск на чистове розвертання:

$$2Z_{4\min} = 2(R_{z_3} + D_3 + \sqrt{Tnp_3^2 + E_{y4}^2})$$

$R_{z_3}, D_3, Tnp_3$  - відповідно висота мікронерівностей, глибина дефектного шару і сумарне значення просторових відхилень при чистовому розвертанні.

$E_{y4}$  - похибка установки деталі під час нормального розвертання.  $R_{z_3} = 5$  мкм,  $D_3 = 10$  мкм.

При установленні деталі  $Tnp_3 = 100$  мкм,  $E_{y4} = 100$ .

$$\text{Тоді } 2Z_{4\min} = 2(5 + 10 + \sqrt{100^2 + 100^2}) = 312,8 \text{ мкм, } 2Z_{4\max} = 2Z_{4\min} + T_3 - T_4$$

$T_3$  - допуск при чорновому розвертанні,  $T_3 = IT8 = 33$  мкм,

$T_4$  - допуск при чистовому розвертанні,  $T_4 = IT7 = 21$  мкм.

$$2Z_{4\max} = 312,8 + 33 - 21 = 324,8 \text{ мкм}$$

$$2Z_{4ном} = \frac{2Z_{4\max} + 2Z_{4\min}}{2} = \frac{324,8 + 312,8}{2} = 318,8 \text{ мкм}$$

Припуск на чорнове розвертання:

$$2Z_{3\min} = 2(R_{z_2} + D_2 + \sqrt{Tnp_2^2 + E_{y3}^2})$$

$R_{z_2}, D_2, Tnp_2$  - відповідно висота мікронерівностей, глибина дефектного шару і сумарне значення просторових відхилень при чорновому розвертанні.

$E_{Y3}$  - похибка установки деталі під час чорнового розвертання.  $Rz_2=20$  мкм,  $D_2=25$  мкм .

При установленні деталі в патроні  $Tnp_2=100$  мкм,  $E_{Y3}=100$ .

Тоді  $2Z_{3min} = 2(20 + 25 + \sqrt{100^2 + 100^2}) = 372,8$  мкм,  $2Z_{3max} = 2Z_{3min} + T_2 - T_3$

$T_2$  - допуск при чистовому розточуванні,  $T_2 = IT10 = 84$  мкм,

$T_3$  – допуск при нормальному розвертання,  $T_3 = IT8 = 33$  мкм.

$$2Z_{3max} = 372,8 + 84 - 33 = 423,8 \text{ мкм}$$

$$2Z_{3ном} = \frac{2Z_{3max} + 2Z_{3min}}{2} = \frac{423,8 + 372,8}{2} = 398,3 \text{ мкм}$$

Припуск на чистове розточування:

$$2Z_{2min} = 2(Rz_1 + D_1 + \sqrt{Tnp_1^2 + E_{y2}})$$

$Rz_1, D_1, Tnp_1$  - відповідно висота мікронерівностей, глибина дефектного шару і сумарне значення просторових відхилень при свердлінні.

$E_{Y2}$  - похибка установки деталі під час розточуванні.  $Rz_2=50$  мкм,  $D_2=50$  мкм . При установленні деталі в патроні  $Tnp_1=100$  мкм,  $E_{Y2}=100$ .

Тоді  $2Z_{2min} = 2(50 + 50 + \sqrt{100^2 + 100^2}) = 482,8$  мкм,  $2Z_{2max} = 2Z_{2min} + T_1 - T_2$

$T_1$  - допуск при чорновому розточуванні,  $T_1 = IT12 = 210$  мкм,

$T_2$  – допуск при чистовому розточуванні  $T_2 = IT10 = 84$  мкм.

$$2Z_{2max} = 482,8 + 210 - 84 = 608,8 \text{ мкм}$$

$$2Z_{2ном} = \frac{2Z_{2max} + 2Z_{2min}}{2} = \frac{608,8 + 482,8}{2} = 545,8 \text{ мкм}$$

Припуск на чорнове розточування:

$$2Z_{1min} = 2(Rz_0 + D_0 + \sqrt{Tnp_0^2 + E_{y1}^2})$$

$Rz_0, D_0, Tnp_0$  - відповідно висота мікронерівностей, глибина дефектного шару і сумарна просторова похибка відливої заготовки.

$Rz_0=200$  мкм;  $D_0=300$  мкм;  $Tnp_0=520$  мм;

$E_{y1}$  - похибка установлення при чорновому точінні.

Під час установлення деталі в патрон  $E_{y1}=100$  мкм

$$2Z_{1\min} = 2(200 + 300 + \sqrt{520^2 + 100^2}) = 2059,1 \text{ мкм}$$

Загальний припуск

$$2Z_{\text{сум}} = \sum_1^i 2Zi_{\text{ном}} = 318,8 + 398,3 + 545,8 + 2059,1 = 3322 \text{ мкм}$$

Приймаємо  $2Z_{\text{сум}}=3,5$  мм.

Коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_M = \frac{M_{\text{дет}}}{M_{\text{заг}}} = \frac{8,2}{11,4} = 0,72$$

### 3. Технологічний маршрут виготовлення шківів

№	Назва операції, переходу	Технологічне обладнання, інструмент оброблюваний, контрольний
10	Заготівельна	Лиття в земляну форму.
10.1	Відлити заготовку	Ø203 мм, L=48 мм. СЧ 20 ГОСТ 1412-79
20	Токарна (УЗЗ)	Токарно-гвинторізний верстат 16К20, 3-ок кулачковий патрон
20.1	Торцювати пов.(1) z=1,5 мм., начорно.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
20.2	Точити пов.(2) Ø272 <sup>-1,0</sup> , начорно	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
20.3	Точити пов.(3) Ø62 <sup>-0,62</sup> , начорно.	Різець розточний ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=95°, γ=10°, φ=45° з заокругленою кромкою R1,6.
20.4	Свердлити отв. Ø20 <sup>+0,43</sup> , пов.(4)	Свердло Ø20, Р6М5
30	Токарна (УЗЗ)	Токарно-револьверний верстат 16К20, 3-ок кулачковий патрон
30.1	Торцювати пов.(1) z=1,5 мм, начорно.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
30.2	Точити пов.(2) витримуючи розмір L=42 <sup>-0,64</sup> мм. начорно.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1

30.3	Точити пов.(3) Ø62 <sub>-0,62</sub> , начорно.	Різець розточний ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=95°, γ=10°, φ=45° з заокругленою кромкою R1,6. ШЦ1
40	Токарна (УЗЗ)	Токарно-гвинторізальний верстат 16К20, 3-ок кулачковий патрон.
40.1	Торцювати пов.(1) z=1 мм., начисто.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
40.2	Точити пов.(2) Ø270h9, начисто.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
40.3	Розточити пов.(3) Ø60h11.	Різець розточний ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=95°, γ=10°, φ=45° з заокругленою кромкою R1,6. ШЦ1
40.4	Розточити пов.(4) Ø220 мм.	Різець розточний ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=95°, γ=10°, φ=45° з заокругленою кромкою R1,6. ШЦ1
40.5	Розточити отв. Ø29,8 мм. пов. (5)	Різець розточний ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=95°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
40.6	Розвернути отв. Ø29,94 пов.(5)	Чорнова розвертка Ø29,94
40.7	Розвернути отв. Ø30H7 пов.(5)	Чистова розвертка Ø30H7, калібр пробка Ø30H7
40.8	Знятя фаску 1,5x45° пов.6.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
40.9	Знятя фаску 2x45° пов.7.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45° ШЦ1
40.10	Попереднє проточування канавок, пов.8.	Різець канавочний, ВК8 В×Н×L=16×25×140мм, b=6 мм, γ=10°, φ=90° ШЦ1
40.11	Попереднє проточування канавок, пов.9.	Різець канавочний, ВК8 В×Н×L=16×25×140мм, b=10 мм, γ=10°, φ=90° ШЦ1

40.12	Чистове проточування профільних канавок під клиновий ремінь, пов.10	Різець канавочний, ВК8 В×Н×L=16×25×140мм, $\gamma=18^\circ$ , $\varphi=90^\circ$ ШЦ1
50	Токарна (УЗЗ)	Токарно-гвинторізальний верстат 16К20, 3-ок кулачковий патрон.
50.1	Торцювати пов.(1) z=1 мм., начисто.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, $\alpha=8^\circ$ , $\gamma=10^\circ$ , $\varphi=45^\circ$ ШЦ1
50.2	Точити пов.(2) начисто, витримуючи розмір L=40 <sub>-0,62</sub> мм.	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, $\alpha=8^\circ$ , $\gamma=10^\circ$ , $\varphi=45^\circ$ ШЦ1
50.3	Розточити пов.(3) Ø60h11.	Різець розточний ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, $\alpha=95^\circ$ , $\gamma=10^\circ$ , $\varphi=45^\circ$ з заокругленою кромкою R1,6. ШЦ1
50.4	Розточити пов.(4) Ø220 мм.	Різець розточний, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, $\alpha=95^\circ$ , $\gamma=10^\circ$ , $\varphi=45^\circ$ з заокругленою кромкою R1,6.
50.5	Зняти фаску 2x45° пов.(5).	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, $\alpha=8^\circ$ , $\gamma=10^\circ$ , $\varphi=45^\circ$ ШЦ1
50.6	Зняти фаску 1,5x45° пов.(6).	Різець прохідний відігнутий правий, ВК8, В×Н×L=16×25×140мм, $\alpha=8^\circ$ , $\gamma=10^\circ$ , $\varphi=45^\circ$ ШЦ1
60	Прогягувальна (УЗЗ)	Горизонтально-протяжний верстат.
60.1	Протягнути шпонковий паз b=8 мм.	
70	Балансування	Балансувальний станок
70.1	Статистичне балансування шківів	
80	Мийна	Мийна машина
80.1	Промити деталь	
90	Слюсарна	Верстак
90.1	Зняти задирки і притупити гострі кромки	
100	Контрольна	Стіл контролера

## Розрахунок операції

### Токарна операція

#### Перехід 20.1 Торцювати пов. 1 начорно.

Загальна глибина різання при обробці заданої поверхні  $t = 1,5$  мм. Подача табл. №19  $S = 0,290,39$  мм/об. Звіряємо з паспортними даними верстата і приймаємо  $S = 0,35$  мм/об.

Визначаємо швидкість різання табл. №20

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,2}} = \frac{365}{60^{0,2} \cdot 1,5^{0,15} \cdot 0,35^{0,2}} = 187,3 \text{ м/хв}$$

Потрібна частота обертів шпинделя верстата

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_3} = \frac{1000 \cdot 187,3}{3,14 \cdot 137,5} = 433,8 \text{ об/хв}$$

Приймаємо ближчу меншу частоту обертів шпинделя верстата  $n_B = 400$  об/хв. Дійсна швидкість різання при таких обертах шпинделя

$$V_D = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 137,5 \cdot 400}{1000} = 172,7 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина оброблення для переходу

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 137,5 + 2 + 1,5 = 141 \text{ мм}$$

$l_{ДЕТ}$  - довжина деталі  $l_{ДЕТ} = 137,5$  мм

$l_1$  - підвід інструменту  $l_1 = 2$  мм

$l_2$  - врізання інструменту  $l_2 = 1,5$

$l_3$  - перебіг інструменту  $l_3 = 0$

Основний час на виконання переходу

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{141}{400 \cdot 0,35} = 1,01 \text{ хв}$$

Допоміжний час на виконання переходу

$$t_D = t_1 + t_2 + t_3 = 0,11 + 0,12 = 0,23 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,11$  хв – допоміжний час, пов'язаний безпосередньо з переходом для поперечного обточування з установленням різця по упору (табл. 26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$  хв. – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі.

$T_3 = 0$  хв – заміна різця.

### **Перехід 20.2 Точити пов.(2) Ø200-1,0, начорно.**

Приймаємо глибину різання  $t = \frac{203 - 200}{2} = 1,5$  мм.

Подача табл.. №17  $S = 1,0 \div 1,4$  мм/об. Звіряємо з паспортними даними верстата і приймаємо  $S_6 = 1,2$  мм/об .

Визначаємо швидкість різання табл.. №20

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,4}} = \frac{304}{60^{0,2} \cdot 1,5^{0,15} \cdot 1,2^{0,4}} = 116,9 \text{ м/хв}$$

Потрібна частота обертів шпинделя верстата

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_3} = \frac{1000 \cdot 116,9}{3,14 \cdot 275} = 135,5 \text{ об/хв}$$

Приймаємо ближчу меншу частоту обертів шпинделя верстата  $n_B = 125$  об/хв. Дійсна швидкість різання при таких обертах шпинделя

$$V_D = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 275 \cdot 125}{1000} = 107,9 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина оброблення для переходу

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 43,5 + 2 + 1,5 = 47 \text{ мм}$$

$l_{ДЕТ}$  - довжина деталі  $l_{ДЕТ} = 43,5$  мм

$l_1$  - підвід інструменту  $l_1 = 2$  мм

$l_2$  - врізання інструменту  $l_2 = 1,5$

$l_3$  - перебіг інструменту  $l_3 = 0$

Основний час на виконання переходу

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{47}{125 \cdot 1,2} = 0,3 \text{ хв}$$

Допоміжний час на виконання переходу

$$t_D = t_1 + t_2 + t_3 = 0,11 + 0,12 + 0,7 = 0,93 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,11$  хв – допоміжний час, пов’язаний безпосередньо з переходом для поперечного обточування з установленням різця по упору.

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$  хв – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі.

$T_3 = 0,7$  хв. – заміна різця.

## Токарна операція

### Перехід 30.1 Торцювати пов.1.

Загальна глибина різання при обробці заданої поверхні  $t = 1,5$  мм. Подача табл.. №19  $S = 0,290,39$  мм/об. Звіряємо з паспортними даними верстата і приймаємо  $S = 0,35$  мм/об.

Визначаємо швидкість різання табл.. №20

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,2}} = \frac{365}{60^{0,2} \cdot 1,5^{0,15} \cdot 0,35^{0,2}} = 187,3 \text{ м/хв}$$

Потрібна частота обертів шпинделя верстата

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_3} = \frac{1000 \cdot 187,3}{3,14 \cdot 17} = 3508,8 \text{ об/хв}$$

Приймаємо ближчу меншу частоту обертів шпинделя верстата  $n_B = 1600$  об/хв. Дійсна швидкість різання при таких обертах шпинделя

$$V_D = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 17 \cdot 1600}{1000} = 85,4 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина оброблення для переходу

$$L = l_{DET} + l_1 + l_2 + l_3 = 17 + 2 + 1,5 = 20,5 \text{ мм}$$

$l_{DET}$  - довжина деталі  $l_{DET} = 17$  мм

$l_1$  - підвід інструменту  $l_1 = 2$  мм

$l_2$  - врізання інструменту  $l_2 = 1,5$

$l_3$  - перебіг інструменту  $l_3 = 0$

Основний час на виконання переходу

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{20,5}{1600 \cdot 0,35} = 0,04 \text{ хв}$$

Допоміжний час на виконання переходу

$$t_D = t_1 + t_2 + t_3 = 0,11 + 0,12 = 0,23 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,11 \text{ хв}$  – допоміжний час, пов'язаний безпосередньо з переходом для поперечного обточування з установленням різця по упору (табл.26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12 \text{ хв.}$  – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі.

$T_3 = 0 \text{ хв}$  – заміна різця.

## Токарна операція

### Перехід 40.1 Торцювати пов.(1) до дзеркальної чистоти.

Загальна глибина різання при обробці заданої поверхні  $t = 1 \text{ мм}$ . Подача табл.. №19  $S = 0,290,39 \text{ мм/об}$ . Звіряємо з паспортними даними верстата і приймаємо  $S = 0,35 \text{ мм/об}$ .

Визначаємо швидкість різання табл.. №20

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,2}} = \frac{365}{60^{0,2} \cdot 1^{0,15} \cdot 0,35^{0,2}} = 198,5 \text{ м/хв}$$

Потрібна частота обертів шпинделя верстата

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_3} = \frac{1000 \cdot 198,5}{3,14 \cdot 136} = 464,8 \text{ об/хв}$$

Приймаємо ближчу меншу частоту обертів шпинделя верстата  $n_B = 400 \text{ об/хв}$ . Дійсна швидкість різання при таких обертах шпинделя

$$V_D = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 136 \cdot 400}{1000} = 170,8 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина оброблення для переходу

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 136 + 2 + 1 = 139 \text{ мм}$$

$l_{ДЕТ}$  - довжина деталі  $l_{ДЕТ} = 136 \text{ мм}$

$l_1$  - підвід інструменту  $l_1 = 2$  мм

$l_2$  - врізання інструменту  $l_2 = 1$

$l_3$  - перебіг інструменту  $l_3 = 0$

Основний час на виконання переходу

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{139}{400 \cdot 0,35} = 0,99 \text{ хв}$$

Допоміжний час на виконання переходу

$$t_d = t_1 + t_2 + t_3 = 0,11 + 0,12 = 0,23 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,11$  хв – допоміжний час, пов'язаний безпосередньо з переходом для поперечного обточування з установленням різця по упору (табл..26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$  хв. – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі.

$T_3 = 0$  хв – заміна різця.

## Токарна операція

### Перехід 50.1 Торцювати пов.(1)

Загальна глибина різання при обробці заданої поверхні  $t = 1$  мм. Подача табл.. №19  $S = 0,290,39$  мм/об. Звіряємо з паспортними даними верстата і приймаємо  $S = 0,35$  мм/об.

Визначаємо швидкість різання табл.. №20

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,2}} = \frac{365}{60^{0,2} \cdot 1^{0,15} \cdot 0,35^{0,4}} = 243,6 \text{ м/хв}$$

Потрібна частота обертів шпинделя верстата

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_s} = \frac{1000 \cdot 243,6}{3,14 \cdot 62} = 1251,3 \text{ об/хв}$$

Приймаємо ближчу меншу частоту обертів шпинделя верстата  $n_B = 1250$  об/хв. Дійсна швидкість різання при таких обертах шпинделя

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 62 \cdot 1250}{1000} = 243,4 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина оброблення для переходу

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 62 + 2 + 1 = 65 \text{ мм}$$

$l_{ДЕТ}$  - довжина деталі  $l_{ДЕТ}=62$  мм

$l_1$  - підвід інструменту  $l_1 = 2$  мм  $l_2$  - врізання інструменту  $l_2 = 1$

$l_3$  - перебіг інструменту  $l_3=0$

Основний час на виконання переходу

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{65}{1250 \cdot 0,35} = 0,15 \text{ хв}$$

Допоміжний час на виконання переходу

$$t_D = t_1 + t_2 + t_3 = 0,11 + 0,12 = 0,23 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,11$  хв – допоміжний час, пов'язаний безпосередньо з переходом для поперечного обточування з установленням різця по упору (табл..26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$  хв. – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі.

$T_3=0$  хв – заміна різця.

Якщо виходити з річної програми 2000 деталей на рік, яка виконується помісячно 10 раз по 200 шт, то

$T_K=3,53+22/200=3,64$  хв. Норма виробітку за 1 год становить:

$N=60/T_K=60/3,64=16$  деталей.

## **Розділ 8**

### **Вимоги щодо монтажу і технічного сервісу**

Розробляємо інструкцію із експлуатації обладнання [2, 3].

#### **1. Монтаж**

Бісерний млин встановлюється без фундаменту. Проте потрібно виставити рівень опор за допомогою гвинтового механізму.

Для вивантаження млина із транспортного засобу використовуємо таль, лебідку або підйомник електричний.

Млин у цеху можна переміщати візком із гідро або механічним механізмом піднімання.

#### **2. Передстартові перевірки**

Переконайтеся, що стиснене повітря, охолоджуюча вода та джерело живлення увімкнені та працюють належним чином.

Перевірте напрямок обертання двигуна.

Перевірте манометри тиску в балоні та температуру на виході.

Переконайтеся, що тиск у системі механічного ущільнення знаходиться в межах нормального діапазону.

Забезпечте належну циркуляцію ущільнювальної рідини, щоб запобігти витoku або пошкодженню ущільнення.

#### **3. Завантаження продукту**

Завантажуйте бісер поступово:

Додайте початкову порцію та стежте за струмом і температурою.

Поступово додавайте більше бісеру, якщо потрібно, щоб підтримувати стабільну роботу.

#### **4. Пуск і налаштування обладнання**

Спочатку запустіть насос, а потім головний двигун.

Налаштуйте швидкість потоку на основі моніторингу струму, температури та тиску в реальному часі.

Контролюйте потік ущільнювальної рідини та переконайтеся, що температура та потік залишаються нормальними.

## **5. Контроль процесу руйнування**

Регулярно перевіряйте температуру суспензії, щоб уникнути перегріву.

Слідкуйте за споживанням бісеру і за необхідності замініть його

## **6. Зупинка машини після руйнування клітин**

Перед вимкненням переконайтеся, що камера звільнена від продукту.

Дайте машині працювати, доки матеріал не перестане витікати, щоб мінімізувати залишки всередині.

## **6. Очищення обладнання**

Ретельно очищуйте після кожної партії, щоб запобігти затвердінню матеріалу та засміченню.

### **Етапи очищення:**

Прокачайте очисний розчинник через систему до повного очищення.

Продовжуйте накачування, поки з вихідного отвору не потече лише прозора рідина.

Тримайте контактні частини вологими, щоб запобігти затвердінню залишків.

## **7. Вимкнення обладнання**

Після завершення подрібнення вимкніть охолоджуючу воду.

Вимкніть живлення та забезпечте повне вимкнення.

## 8. Технічний сервіс

Регулярне технічний сервіс продовжує термін служби обладнання та підтримує ефективність руйнування клітин.

Періодично перевіряйте та замінійте ущільнювальну рідину, щоб запобігти витoku. Регулярно очищайте сітку екрана, щоб запобігти засміченню. Перевірте натяг ременя та за необхідності відрегулюйте або замініть його. Забезпечте достатній потік охолоджувальної води, щоб запобігти перегріву. Перевірте диспергатор і шліфувальний циліндр на знос і замініть їх, якщо необхідно. Регулярно очищайте бісер, щоб видалити пошкоджені або деформовані бісеринки.

Таблиця 8.1

### Несправності: причини виникнення і способи усунення

Несправності	Причини виникнення	Способи усунення
Насос не працює або зупиняється	1) Показники приладу перевищують допустимі значення 2) Несправність електромагнітного клапана 3) Недостатній тиск стисненого повітря 4) Перегорілий запобіжник	1) Скиньте налаштування приладу 2) Перевірте електромагнітний клапан 3) Відрегулюйте тиск повітря 4) Замініть запобіжник
Головний двигун не запускається або зупиняється	1) Несправність системи блокування 2) Показники приладу перевищують допустимі значення 3) Перегорів запобіжник	1) Перевірте систему блокування 2) Скиньте налаштування приладу 3) Замініть запобіжник
Головний двигун працює, але вал не обертається	1) Ослаблений ремінь 2) Заклинив шпindel	1) Відрегулюйте натяг ременя 2) Усуньте блокування шпинделя
Зниження вирибничих потужностей	1) Надмірний знос диспергатора 2) Надмірний знос або поломка бісеру	1) Замініть диспергатор 2) Замініть бісер

## Розділ 9

### Опис системи управління

Керування роботою бісерного млина відбувається оператором із автоматизованого пульта [57].

Передбачено керування такими елементами млина:

1. Вмикання-вимикання двигуна для приведення у рух ротора.
2. Вмикання-вимикання циркуляційного насоса для приведення у рух системи зовнішньої циркуляції оброблювальної суспензії.
3. Вмикання-вимикання двигуна системи подачі води в охолоджувальну сорочку.

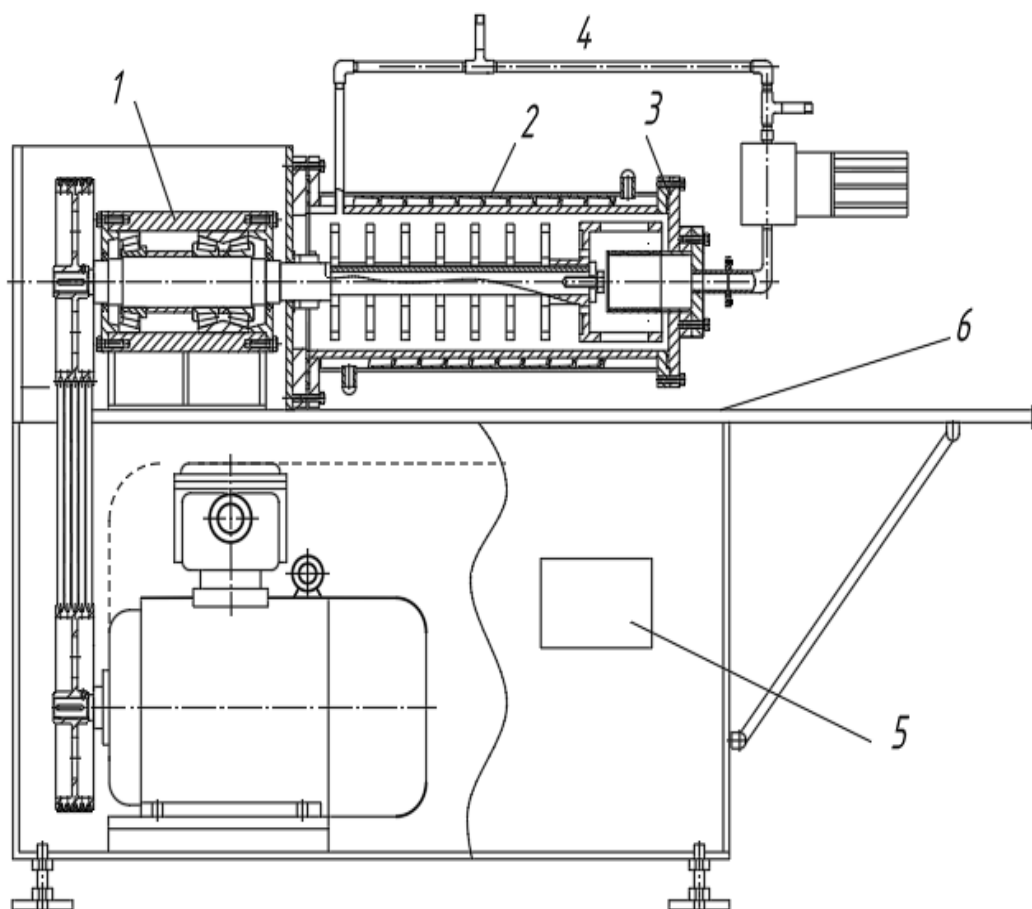
Передбачено системи запобігання аваріям, зокрема:

Система вимикання двигуна приводу ротора у разі перевищення потужності.

Система вимикання двигуна приводу ротора у разі перегрівання середовища робочої камери. Для цього у робочій камері передбачено встановлення датчика температури, який передає сигнал на пульт керування.

## Розділ 10

### Заходи щодо охорони праці



**Рис. Небезпечні зони обладнання**

1. Рухомі робочі органи;
2. Корпус. Гаряча поверхня. Опіки;
3. Герметичні затвори. Небезпечне вилітання бісеру під дією відцентрових сил. Смертельна небезпека;
4. Потрапляння небезпечних речовин у навколишнє середовище;
5. Електрощиток. Небезпечне ураженням струмом;
6. Важкі деталі і вузли. Травмування.

Для розроблення заходів із охорони праці та безпеки життєдіяльності під час експлуатації бісерного млина було використано набір рекомендацій від провідних виробників технологічного обладнання [52].

#### **Техніка безпеки перед початком роботи**

##### **1. Перевірка обладнання**

Перевірте, чи надійно встановлені різні компоненти бісерного млина, особливо ключові частини, такі як камера подрібнення, перемішувач, система подачі та вивантаження.

Переконайтеся, що кількість робочих тіл відповідає вимогам, щоб запобігти переповненню камери під час роботи.

Перевірте, чи герметична кришка робочої камери щільно закрита, щоб запобігти розбризкуванню бісеру під час процесу помелу. **УВАГА – бісеринки під дією відцентрової сили можуть вилетіти із негерметично закритої робочої камери, поранити або смертельно травмувати. УВАЖНО відноситися до перевірки герметичності робочої камери перед увімкненням млина.**

Перевірте, чи двигун і його електропроводка справні, переконайтеся в хорошій електричній ізоляції та уникайте нещасних випадків із ураженням електричним струмом. У той же час перевірте, чи нормально працює пристрій розсіювання тепла двигуна, щоб уникнути перегріву двигуна та спричинення збоїв.

Перевірте, чи немає перешкод у системі охолодження, наприклад, чи щільно з'єднані водопровідні труби системи водяного охолодження, чи немає витoku води та чи не закриті вентиляційні отвори системи повітряного охолодження. Оскільки процес шліфування виділяє тепло, збій у системі охолодження може призвести до перегріву та пошкодження обладнання. **Увага. Продукт у робочій камері бісерного млина може значно нагріватися. Перегрітий недостатньо зволожений продукт є вибухонебезпечним. Обслуговування деталей і вузлів млина без попереднього охолодження може призвести до опіків.**

## **2. Підготовка засобів індивідуального захисту**

Оператори повинні носити відповідні засоби індивідуального захисту, включаючи:

захисні окуляри, щоб запобігти бризкам матеріалів в очі під час подрібнення;

захисні рукавички для запобігання контакту рук із потенційно корозійними матеріалами або подряпин від бісеру;

робочий одяг, бажано з довгими рукавами та довгі штани, щоб запобігти потраплянню на шкіру тіла назовні та травмуванню.

## **2. Точки безпеки під час експлуатації**

### **1. Безпека запуску та експлуатації**

Під час запуску бісерного млина переконайтеся, що поблизу обладнання немає нікого, щоб уникнути травм, спричинених вібрацією під час запуску обладнання або можливими ненормальними умовами (наприклад, раптовий рух мелючого середовища).

Під час роботи бісерної млини не торкайтеся за бажанням робочих частин обладнання, таких як перемішувач, вал двигуна тощо. Ці частини мають

велику кінетичну енергію під час роботи на високій швидкості, і контакт може спричинити серйозні механічні пошкодження.

Контролюйте швидкість подачі та швидкість потоку строго відповідно до робочих процедур обладнання. Надто швидка подача може спричинити надмірний тиск у камері подрібнення, переповнення матеріалу або перевантаження двигуна; надто повільна подача вплине на ефективність подрібнення. У той же час переконайтеся, що матеріал для подачі є однорідним, щоб уникнути впливу на ефект подрібнення або пошкодження обладнання через локальне накопичення матеріалу.

Звертайте особливу увагу на робочі параметри обладнання, такі як струм і температура двигуна, температура і тиск у камері подрібнення тощо. Якщо виявлено будь-які ненормальні параметри (наприклад, раптове збільшення струму двигуна, занадто висока температура в камері подрібнення), обладнання слід негайно зупинити та знайти причину. Наприклад, надмірний струм двигуна може бути спричинений заклиненим перемішувальним пристроєм або несправністю двигуна, а надмірна температура в камері подрібнення може бути спричинена несправністю системи охолодження або надмірним навантаженням подрібнення.

## 2. Запобігайте витоку матеріалу та бризкам

Переконайтеся, що шліфувальна камера добре герметична, і регулярно перевіряйте, чи ущільнювальний пристрій (наприклад, механічне ущільнення) є нормальним. Якщо виявлено витік матеріалу, обладнання слід негайно зупинити та усунути проблему ущільнення, перш ніж його можна буде використовувати знову. Оскільки витік матеріалу може бути корозійним, токсичним або легкозаймистим, він завдасть шкоди оператору та навколишньому середовищу.

Деякі матеріали можуть утворювати піну або бризки під час процесу подрібнення, тому будьте уважні та вживайте відповідних заходів захисту. Піну та розбризування можна зменшити, регулюючи швидкість подачі, швидкість перемішування або додаючи піногасники.

## 3. Питання безпеки після обслуговування та зупинки обладнання

### 1. Безпека технічного обслуговування

Перед виконанням технічного обслуговування обладнання (наприклад, чищення, заміна шліфувальних матеріалів, ремонт деталей тощо) необхідно спочатку вимкнути джерело живлення та повісити на вимикачі живлення попереджувальний знак «Технічне обслуговування, заборонено закривати», щоб інші не могли помилково запустити обладнання.

Якщо необхідно відкрити шліфувальну камеру для технічного обслуговування, перед відкриттям зачекайте, поки шліфувальна камера повністю припинить рух і шліфувальні матеріали та матеріали всередині

стануть стабільними. Після відкриття обережно вийміть шліфувальний матеріал, щоб уникнути падіння кульок і травмування людей.

Під час очищення обладнання використовуйте відповідні інструменти та засоби для чищення. Якщо ви очищаєте залишки матеріалів, що містять хімічні речовини, будьте обережні, щоб уникнути хімічних реакцій між очисним засобом і залишками матеріалів з утворенням токсичних або шкідливих газів.

## 2. Безпека після відключення

Після вимкнення дайте обладнанню охолонути природним шляхом.

## Висновок

- Модернізовано бісерний млин безперервної дії із робочою камерою горизонтального типу та дисковими робочими органами. Бісер – скляний, з фракцією бісеринок діаметром 0.4–0.6 мм. Оброблювальний продукт – водна суспензія клітин мікроорганізмів, зокрема дріжджів, які необхідно зруйнувати з метою отримання біологічно цінних метаболітів, наприклад полісахариду бета-глюкану.
- Пропонується оснастити бісерний млин для руйнування клітин мікроорганізмів системою сепараторів для якісного відділення обробленої суспензії зруйнованих мікроорганізмів від бісеру.
- Як прототип використано інноваційні розробки вчених НУХТ. На валу бісерного млина додатково встановлюємо відцентровий сепаратор у вигляді турбінного колеса із отворами. За рахунок відцентрової сили бісер буде викидатися із вікон до стінок робочої камери, а суспензія зі зруйнованими клітинами мікроорганізмів під створеним напором буде безперервно відводитися через патронний фільтр. Такий ефект досягається за рахунок того, що швидкість осідання частинок більшого діаметру у графітаційному або відцентровому полях більша, ніж швидкість осідання дрібних мікроскопічних частинок.
- Суспензія після виходу із млина через зовнішній циркуляційний контур багатократно повертається у робочу камеру, поки не досягнемо повного руйнування клітин.
- Технічний ефект полягає у якісному відділенні бісеру від оброблювальної суспензії та можливості організації безперервного процесу руйнування клітин при невеликих початкових інвестиціях.
- Модернізовано бісерний млин безперервної дії із робочою камерою горизонтального типу та дисковими робочими органами. Бісер – скляний, з фракцією бісеринок діаметром 0.4–0.6 мм. Оброблювальний продукт – водна суспензія клітин мікроорганізмів, зокрема дріжджів, які необхідно

зруйнувати з метою отримання біологічно цінних метаболітів, наприклад полісахариду бета-глюкану.

- Пропонується оснастити бісерний млин для руйнування клітин мікроорганізмів системою сепараторів для якісного відділення обробленої суспензії зруйнованих мікроорганізмів від бісеру.
- Як прототип використано інноваційні розробки вчених НУХТ. На валу бісерного млина додатково встановлюємо відцентровий сепаратор у вигляді турбінного колеса із отворами. За рахунок відцентрової сили бісер буде викидатися із вікон до стінок робочої камери, а суспензія зі зруйнованими клітинами мікроорганізмів під створеним напором буде безперервно відводитися через патронний фільтр. Такий ефект досягається за рахунок того, що швидкість осідання частинок більшого діаметру у графітаційному або відцентровому полях більша, ніж швидкість осідання дрібних мікроскопічних частинок.
- Суспензія після виходу із млина через зовнішній циркуляційний контур багатократно повертається у робочу камеру, поки не досягнемо повного руйнування клітин.
- Технічний ефект полягає у якісному відділенні бісеру від оброблювальної суспензії та можливості організації безперервного процесу руйнування клітин при невеликих початкових інвестиціях.

## Списки використаної літератури

1. Alavijeh, R.S., Karimi, K., Wijffels, R.H., van den Berg, C., Eppink, M. (2020). Combined bead milling and enzymatic hydrolysis for efficient fractionation of lipids, proteins, and carbohydrates of *chlorella vulgaris* microalgae. *Bioresource Technology*, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123321>.
2. Allwin (2025), Bead mill working principle, Режим доступу: <https://lockerz.com/bead-mill-working-principle/>
3. Allwin (2025c), How to Use a Bead Mill Efficiently, Режим доступу: <https://www.allwin-grinding.com/how-to-use-a-bead-mill-efficiently/>
4. Aryal S. (2021). Cell disruption – definition, methods, types, significance. *Microbe Notes*. Режим доступу: <https://microbenotes.com/cell-disruption-methods/>
5. Avramia I., Sonia A. (2022a). A simple and efficient mechanical cell disruption method using glass beads to extract  $\beta$ -glucans from spent brewer's yeast, *Applied Sciences*, 12(2), 648.
6. Avramia, I. (2022). Research on the extraction of  $\beta$ -glucans from spent brewer's yeast and their valorization in bioactive films. Doctoral thesis. Suceava: "Ștefan cel Mare" University Of Suceava.
7. Avramia, I., Amariei, S. (2021). Spent brewer's yeast as a source of insoluble  $\beta$ -glucans, *International Journal of Molecular Sciences*, 22. 825. <https://doi.org/10.3390/ijms22020825>
8. Avramia, I., Amariei, S. (2022). A simple and efficient mechanical cell disruption method using glass beads to extract  $\beta$ -glucans from spent brewer's yeast. *Applied Sciences*, 12(2). 648. <http://dx.doi.org/10.3390/app12020648>
9. Bajhaiya A.K. (2012), Approaches and prospectives for algal fuel, In: *The Science of Algal Fuels*, ed. Gordon Richard, Seckbach Joseph, Springer.
10. Batt C.A. *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)* / C.A. Batt. – Elsevier, 2017. – 110 p.
11. Boyee (2025). Boyee NANO bead mill machine for laboratory-boyee patent turbine rotor structure. Boyee. Режим доступу: <https://www.boyee-mill.com.cn/boyee-nmm-laboratory-bead-mill-multi-functional-experimental-bead-mill-1-2l-turbine-rotor.html>
12. Brennan J. G.. *Food Processing Handbook, 2nd Edition* / James G.B., Alistair S.G. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2011. – 826 p.
13. Chemtech (2025). *Bead Mill – Grinding & Dispersing*. Chemtech division. Режим доступу: <http://www.hiroshimamm-chemtech.com/en/knowledge/detail01/>
14. ELE (2025). Bead Mill. ELE® company. Режим доступу: <https://www.ele-mix.com/bead-mill/bead-mills.html>
15. ELE (2025a). Disc Type Bead Mill. ELE® company. Режим доступу: <https://www.ele-mix.com/bead-mill/disc-type-bead-mill.html>
16. ELE (2025b). Working Principle Of Bead Mill. ELE® company. Режим доступу: <https://www.ele-mix.com/news/working-principle-of-bead-mill-24426552.html>

17. Eskens group (2025), DYNOR®-MILL ECM AP grinding mills, Режим доступу: <https://www.eskens.com/en/process-solutions/processing-liquids/wet-grinding-mills-and-mill-pearls>
18. Fellows P. Food processing technology. Principles and Practice. Second Edition / P. Fellows. – CRC Press, 2000. – 591 p.
19. Georgianna, D.R. , M.J. Hannon, M. Marcuschi, S. Wu, K. Botsch, A. J. Lewis, J. Hyun, M. Mendez, S.P. Mayfield (2013). Production of recombinant enzymes in the marine alga *Dunaliella tertiolecta*. *Algal Research*, 2(1). 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2012.10.004>.
20. Godbey W.T. An Introduction to Biotechnology. The Science, Technology and Medical Applications. 1st Edition. Academic Press. 2014
21. Gomes, T.A., Zanette, C.M., Spier, M.R. (2020). An overview of cell disruption methods for intracellular biomolecules recovery. *Preparative Biochemistry Biotechnology*, 50(7). 635–654 <https://doi.org/10.1080/10826068.2020.1728696>
22. Gupta V., Sengupta M., Prakash J., Tripathy B.C. An Introduction to Biotechnology. Basic and Applied Aspects of Biotechnology. 2016. 23:1–21. doi: 10.1007/978-981-10-0875-7\_1
23. Hrininh, K., Hordeichuk, R., Gubenia, O. (2018). Comparative analysis of equipment and research the superfine grinding process of titanium dioxide and quinacridone red suspensions in the bead mill. *Ukrainian Journal of Food Science*. 6(1). 82–94
24. Hrininh, K., Hordeichuk, R., Gubenia, O. (2018a). Investigation the process of superfine grinding of components of pharmaceutical and cosmetic products on the bead mill. *Proceedings of University of Ruse*, 57(10.3). 41–45.
25. Imagup (2025), Bead Mill Working Principle: How do Horizontal and Vertical Bead Mills Work, Режим доступу: <https://www.imagup.org/horizontal-and-vertical-bead-mills-work/>
26. Indiamart (2025), Stainless Steel Vertical Bead Mill, Режим доступу: <https://www.indiamart.com/proddetail/vertical-bead-mill-27506820748.html>
27. Ivanov, V., Shevchenko, O., Marynin, A., Stabnikov, V., Gubenia, O., Stabnikova, O., Shevchenko, A, Gavva, O., Saliuk, A. (2021). Trends and expected benefits of the breaking edge food technologies in 2021-2030. *Ukrainian Food Journal*, 10(1). pp. 7–36. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-1-3>
28. Kasyniuk M., Hrininh K., Ponomarenko A., Gubenia O., Omelianenko K. Bead mills for destruction of microbial cells in production of microbial synthesis products. *Food Industry*. 2025. #37. Pp. 190-218 DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-20
29. Kateryna Hrininh, Kostiantyn Omelianenko, Artem Ponomarenko, Oleksii Gubenia. Change of viscosity of a suspension of cosmetic products during ultrafine grinding in bead mill. 8th Edition of the International Conference, 15th December 2023 «Biotechnologies, present and perspectives». Suceava, Romania. 2023. P. 70.

30. Khavari, F., Saidijam, M., Taheri, M., Nouri, F. (2021). Microalgae: therapeutic potentials and applications. *Molecular Biology Reports*, 48(5). 4757–4765. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06422-w>
31. 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
32. Kozytskyi, K., Osadchyi, D., Omelianenko, K., Hrininh, K. (2025). Improvement of the separation device of the bead mill. *91st International scientific conference of young scientist and students "Youth scientific achievement to the 21st century nutrition problem solution"*, April, 7–11, 2025. *Book of Abstract. Part 2*. Kyiv: NUFT. 45.
33. Lee, J.Y., Yoo, C., Jun, S.Y., Ahn, C.Y., Oh, H.M. (2010). Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresource Technology*, 101, 75–77. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.058>.
34. Lelieveld H. Handbook of Hygiene Control in the Food Industry (Second Edition) / H. Lelieveld, J. Holah, D. Gabrić. – Elsevier, 2016. – 736 p.
35. Liu, S., Gifuni, I., Mear, H., Frappart, M., Couallier, E. (2021). 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*, 108. 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.021>.
36. Ljubic, A., Thulesen, E.T., Jacobsen, E.T., Jakobsen, J. (2021). UVB exposure stimulates production of vitamin D3 in selected microalgae. *Algal Research*, 59. 102472. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102472>.
37. Lockerz (2025), Bead Mill Working Principle: How Do Bead Mills Work?, Режим доступу: <https://lockerz.com/bead-mill-working-principle/>
38. Maksym Kasyniuk, Artem Ponomarenko, Ihor Zhytnetskyi. Water treatment in the food industry: modern technologies and perspectives. Proceedings of the International Conference "Modern Technologies in the Food Industry-2024". 17-18 October 2024, Chisinau. P. 51.
39. 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
40. 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
41. Montalescot, V., Rinaldi, T., Touchard, R., Jubeau, S., Frappart, M., Jaouen, P., Bourseau, P., Marchal, L. (2015). Optimization of bead milling parameters

- for the cell disruption of microalgae: process modeling and application to *Porphyridium cruentum* and *Nannochloropsis oculata*. *Bioresource Technology*, 196. 339-346. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.075>
42. Omelianenko, K., Kasyniuk, M., Gubenia, O., Avramia, I. (2025). Assessment of destruction of microorganism cells during processing in bead mill. *91st International scientific conference of young scientist and students "Youth scientific achievement to the 21st century nutrition problem solution"*, April, 7–11, 2025. *Book of abstract. Part 2*, Kyiv: NUFT. 43.
43. Quesada-Salas, M., Delfau, G., Willig, G., Pr at, N., Allais, F., Ioannou, I. (2021). Article optimization and comparison of three cell disruption processes on lipid extraction from microalgae. *Processes*, 9(2). 369, <https://doi.org/10.3390/pr9020369>
44. Rahman M.M., Hosano N., Hosano H. (2019), Recovering microalgal bioresources: a review of cell disruption methods and extraction technologies. *Molecules*, 27(9), 2786. <https://doi.org/10.3390/molecules27092786>
45. Rahman, M.M., Hosano, N., Hosano, H. (2022). Recovering microalgal bioresources: a review of cell disruption methods and extraction technologies. *Molecules*, 27(9). 2786. <https://doi.org/10.3390/molecules27092786>
46. Ramana, K.V., Xavier, J.R., Sharma, R.K. (2017). Recent trends in pharmaceutical biotechnology, *Pharmaceutical Biotechnology: Current Research*, 1(5). Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8142882>
47. Ramanan, R.N., Ling, T.C., Ariff, A.B. (2008). The performance of a glass bead shaking technique for the disruption of *Escherichia coli* cells. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 13. 613–623. <https://doi.org/10.1007/s12257-008-0047-y>
48. Razaghi, A., Godhe, A., Albers, E. (2014). Effects of nitrogen on growth and carbohydrate formation in *Porphyridium cruentum*. *Open Life Sciences*, 9(2). 156–162. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0248-z>
49. R sch C., Ro mann M., Weickert S. (2018). Microalgae for integrated food and fuel production, *GCB Bioenergy*, 11, pp. 326–334, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12579>
50. Safi, C., Frances, C., Ursu, A.V., Laroche, C., Pouzet, C., Vaca-Garcia, C., Pontalier, P.-Y. (2015). Understanding the effect of cell disruption methods on the diffusion of *Chlorella vulgaris* proteins and pigments in the aqueous phase, *Algal Research*, 8. 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.01.002>
51. van Gaver, D., Huyghebaert, A. (1991). Optimization of yeast cell disruption with a newly designed bead mill. *Enzyme and Microbial Technology*, 13(8). 665–671. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(91\)90082-L](https://doi.org/10.1016/0141-0229(91)90082-L).
52. WAB (2025), Bead mill, Режим доступу: <https://www.wab-group.com/en/solutions/industries/cell-disruption>
53. Wuxi Transocean International Trading Co (2025), What safety precautions should be taken during the use of the bead mill?, Режим доступу: <https://www.mixerbeadmill.com/info/what-safety-precautions-should-be-taken-during-102522275.html>

54. Yan, N., Fan, C., Chen, Y., Hu, Z. (2016). The potential for microalgae as bioreactors to produce pharmaceuticals, *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6). 962. <https://doi.org/10.3390/ijms17060962>
55. Yiu H. Hui. Handbook of Food Science, Technology, and Engineering. / H. Hui Yiu. – CRC Press, 2006. – 928 p.
56. Буценко, Л. М. Технології мікробного синтезу лікарських засобів [Текст] : навч. посіб. / Л. М. Буценко, Ю. М. Пенчук, Т. П. Пирог ; Нац. ун-т харч. технол. — К. : НУХТ, 2010. — 323 с.
57. Гончаренко Б.М. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій: підручник / Б.М. Гончаренко, А.П. Ладанюк. – Київ: НУХТ, 2014. – 530 с.
58. Грінінг, К.Р., Пономаренко, А.М., Губеня, О.О (2023а). Робочі тіла бісерних млинів. *Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції: матеріали 12-ї Міжн. спеціалізованої науково-практичної конференції, 20 вересня 2023 р., м. Київ*. Київ: НУХТ. 187–192
59. Заплетніков, І. М. Експлуатація і обслуговування технологічного обладнання харчових виробництв [Текст] : навч. посібник / І. М. Заплетніков, В. Г. Мирончук, В. М. Кудрявцев ; Нац. ун-т харч. технол., Донец. нац. ун-т екон. і торг. — Київ : Кафедра, 2018. — 344 с.
60. Історичні фрагменти розвитку кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв НУХТ [Текст] / В. Таран, О. Гавва, В. Теличкун, О. Губеня, Решетняк В. // *Ukrainian food journal*. — 2013. — vol. 2, issue 4. — С. 618-624.
61. Малезик І. Ф., Зав'ялов В. Л., Шевченко О.Ю. та ін. (2021). Процеси і апарати харчових виробництв / за ред. І. Ф. Малезика; Київ : НУХТ, 2021. – 419 с.
62. Монтаж і технічний сервіс обладнання [Текст] : підручник / В. Г. Мирончук, М. В. Якимчук, Д. М. Люлька, С. О. Володін ; Національний університет харчових технологій. — Київ : НУХТ, 2024. — 267 с.
63. Нормативно-правове регулювання діяльності біотехнологічних і фармацевтичних підприємств [Текст] : підручник / М. В. Стасевич, А. М. Кричковська, Б. П. Громовик та ін. ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". — Львів : Новий світ-2000, 2018. — 288 с.
64. Омеляненко, К.А. (2024). Механічні способи руйнування клітин мікроорганізмів у виробництві продукції біотехнологічного синтезу. *Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції: матеріали 13-ї Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 17 вересня 2024 р., м. Київ*. Київ: НУХТ, 2024. 228–234.
65. Омеляненко, К., Осадчий, Д., Грінінг, К., Губеня, О. (2025). Вплив типу робочих органів на продуктивність руйнування клітин мікроорганізмів у бісерному млині. *91st International scientific conference of young scientist and students "Youth scientific achievement to the 21st century nutrition problem solution", April, 7–11, 2025. Book of Abstract. Part 2*. Kyiv: NUFT. 50.

66. Охорона праці у фармацевтичній галузі [Текст]: навч. посіб. / О. В. Жуковина, О. І. Зайцев, О. І. Жуковін, Г. А. Грецька. — К.: Медицина, 2009. — 432 с.
67. Павлице, В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин [Текст]: Підруч. / В. Т. Павлице. — 2-ге вид., перероб. — Львів: Афіша, 2003. — 560 с.
68. Пирог Т. П. Загальна біотехнологія [Текст]: підручник / Т. П. Пирог, О. А. Ігнатова; МОН України; Нац. ун-т харч. технол. — Київ: НУХТ, 2009. — 336 с.
69. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості [Текст]: Навч. посіб. / В. Г. Мирончук, Л. О. Орлов, А. І. Українець та ін.; Нац. ун-т харч. технол. — Вінниця: Нова книга, 2004. — 288 с.
70. Сидоров, Ю. І. Процеси і апарати хіміко-фармацевтичної промисловості [Текст]: навч. посіб. / Ю. І. Сидоров, В. І. Чуєшов, В. П. Новіков. — Вінниця: Нова книга, 2009. — 816 с.
71. Сухенко Ю. Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: підручник / Ю. Г. Сухенко, О. А. Литвиненко, В. Ю. Сухенко. — Київ: НУХТ, 2010. — 547 с.
72. Технологічне обладнання фармацевтичної та біотехнологічної промисловості [Текст]: підручник / С. Т. Стасевич, А. О. Милянч, Л. С. Стрельников та ін.; Нац. ун-т "Львів. політехніка", Нац. фармац. ун-т. — Львів: Новий світ-2000, 2017. — 500 с.
73. Технологічне обладнання харчових виробництв [Текст]: навч. посібник / В. Теличкун, Ю. Теличкун, О. Губеня та ін. — Київ: Сталь, 2023. — 634 с.
74. Технологічні комплекси харчових виробництв [Текст]: навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін.; Нац. ун-т харч. технол. — Київ: Сталь, 2017. — 456 с.