МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

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

«До захисту в ЕК»	**«До захисту допущено»**
Директор інституту	Завідувач кафедри
_____ Сергій БЛАЖЕНКО	_____ Олександр ГАВВА
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)	(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)
«_8_» ____06____ 2026 р.	«_8_» ____06____ 2026 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 ферментатора з пристроєм перемішування турбінного типу об'ємом 60 м^3

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

Олійник Владислав Вікторович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник Житнецький Ігор Володимирович _____
(прізвище , ім'я та по батькові) (підпис)

Консультанти Бойко Ю.І. _____
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

_____ _____
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

_____ _____
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент Віктор Сабокінь _____
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

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

Здобувач Владислав Олійник
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Київ – 2026 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут імені акад. І. С. Гулого
Кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв
Освітній ступінь: «Бакалавр»
Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування
Освітньо-професійна програма: Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАХФВ
_____ Олександр ГАВВА
«10» 04 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Олійник Владислав Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Модернізація ферментатора з пристроєм перемішування турбінного типу об'ємом 60 м^3**
Керівник роботи: **доц., к.т.н. Житнецький Ігор Володимирович**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від 10 квітня 2026 р № 237-кс
2. Строк подання здобувачем роботи_ 02 червня 2026 р
3. Вихідні дані до роботи: тип ферментера – вертикальний; об'єм 60 м^3; продукт – суспензія дріжджів.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): зміст; анотація; вступ; порівняльний аналіз технічних рішень; техніко-економічне обґрунтування; характеристика вхідного матеріалу і готової продукції; опис запропонованого технічного рішення, будова та принцип роботи обладнання; розрахункова частина; вибір конструкційних матеріалів; технологічний маршрут виготовлення деталі типу «Кришка»; вимоги щодо монтажу, експлуатації та ремонту; система управління; охорона праці; висновки; література.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Загальний вид – 1 лист; Розрізи, Складальні одиниці обладнання – 3 листи; Технологія машинобудування – 1 лист; презентація – 7 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
7	Бойко Ю.І., доц., к.т.н.	06.05.2026	12.05.2026

7. Дата видачі завдання **10 квітня 2026 р.**

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Анотація, зміст	04.06.2026	Виконано
	Вступ	02.06.2026	Виконано
	Розділ 1. Порівняльний аналіз технічних рішень	17.04.2026	Виконано
	Розділ 2. Техніко-економічне обґрунтування	24.12.2026	Виконано
	Розділ 3. Характеристика вхідного матеріалу і готової продукції	28.04.2026	Виконано
	Розділ 4. Опис запропонованого технічного рішення. будова та принцип роботи обладнання	02.05.2026	Виконано
	Розділ 5. Розрахункова частина	28.04.2026	Виконано
	Розділ 6. Вибір конструкційних матеріалів	05.05.2026	Виконано
	Розділ 7. Технологія виготовлення деталі типу «Кришка»	05.05.2026	Виконано
	Розділ 8. Вимоги щодо монтажу, експлуатації та ремонту	12.05.2026	Виконано
	Розділ 9. Система управління	19.05.2026	Виконано
	Розділ 10. Охорона праці	26.05.2026	Виконано
	Висновки та література	02.06.2026	Виконано

Здобувач освіти: _____ (підпис) Владислав ОЛІЙНИК (ім'я та прізвище)

Керівник роботи: _____ (підпис) Ігор ЖИТНЕЦЬКИЙ (ім'я та прізвище)

«10» 04 2026 р.

ЗМІСТ

ВСТУП……. 6

РОЗДІЛ 1. Порівняльний аналіз технічних рішень……...… 8

1.1. Методи ферментації…….……. 8

1.2. Проєктні рішення для ферментерів, що використовуються в технології біопроцесів…….…… 9

1.3. Ферментери для глибинного культивування…… 10

1.4. Твердофазні ферментери……... 16

1.5. Інші конструкції ферментерів……... 17

РОЗДІЛ 2. Техніко-економічне обґрунтування……. 23

РОЗДІЛ 3. Характеристика вхідного матеріалу і готової продукції … 25

РОЗДІЛ 4. Опис запропонованого технічного рішення. будова та принцип роботи обладнання …….……..… 27

РОЗДІЛ 5. Розрахункова частина…… 31

5.1. Розрахунок ферментатора на механічну міцність……. 32

5.2. Розрахунок корпусу ферментатора на зовнішній тиск…….. 35

5.3. Розрахунок зовнішньої стінки сорочки ферментатора…….. 35

5.4. Розрахунок механічної мішалки ферментатора…….. 36

5.5. Тепловий розрахунок ферментатора…… 40

5.6. Дозатор для піногасіння…….. 41

РОЗДІЛ 6. Вибір конструкційних матеріалів ……..…….. 50

РОЗДІЛ 7. Технологія виготовлення деталі типу «Кришка»……..……. 53

РОЗДІЛ 8. Вимоги щодо монтажу, експлуатації та ремонту……..…….. 69

РОЗДІЛ 9. Система управління…….…….. 81

РОЗДІЛ 10. Охорона праці…….……. 85

ВИСНОВКИ……. 87

ЛІТЕРАТУРА……. 88

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Житнецький І.В.	Вид документа Пояснювальна записка		Статус документа	
Власник документа НУХТ	Розробник документа Олійник В.В.	Назва, додаткова назва Зміст	220727.ДП.04.001.ПЗ		
	Документ затверджено Гавва О.М.		Інд. змін.	Дата видання	Мова UA / Аркуш 3/90

АНОТАЦІЯ

Тема представленого дипломного проєкту: «Модернізація ферментатора з пристроєм перемішування турбінного типу об’ємом 60 м^3». Суть модернізації полягає в оптимізації конструкції турбінної мішалки та валу для покращення процесу перемішування, забезпечення внутрішньої рециркуляції та повторного використання повітря.

У порівнянні з базовим варіантом модернізований ферментатор забезпечує такі переваги: збільшення загальної продуктивності обладнання, покращення якісних характеристик готової продукції та зниження її собівартості за рахунок економії повітря та енергоносіїв, що безпосередньо веде до збільшення чистого прибутку та рентабельності виробництва. Проведена модернізація підтверджена інженерними розрахунками, є економічно доцільною, безпечною в експлуатації та простою в обслуговуванні.

У дипломному проєкті висвітлені питання монтажу, експлуатації та ремонту обладнання, автоматизації технологічного процесу. Здійснено комплексний аналіз сучасних технічних рішень. Наведені техніко-економічні розрахунки підтверджують доцільність впровадження розробки у виробництво.

Дипломний проєкт складається з розрахунково-пояснювальної записки, яка містить 90 сторінок, та графічної частини, виконаної на 5 листах формату А1.

Ключові слова: ферментатор, перемішувальний пристрій, мікроорганізми, турбінна мішалка.

Відповідальна організація	Технічне узгодження	Вид документа	Статус документа
НУХТ	Житнецький І.В.	Пояснювальна записка	

Власник документа	Розробник документа	Назва, додаткова назва	220727.ДП.04.001.ПЗ			
НУХТ	Олійник В.В.	Анотація	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш
	Документ затверджено Гавва О.М.				UA	4/90

SUMMARY

The theme of the submitted diploma project is "Modernization of a fermenter with a turbine-type mixing device with a volume of 60 m^3". The essence of the modernization is to optimize the design of the turbine agitator and shaft to improve the mixing process, provide internal recirculation, and facilitate the reuse of air.Compared to the basic version, the modernized fermenter provides the following benefits: increased overall equipment productivity, improved quality characteristics of the finished product, and reduced production costs due to air and energy savings, which directly leads to an increase in net profit and enterprise profitability. The implemented modernization is confirmed by engineering calculations and is substantiated by its cost-effectiveness, operational safety, and ease of maintenance.The diploma project highlights the issues of equipment installation, operation and maintenance, as well as process automation. A comprehensive analysis of modern technical solutions has been carried out. The presented technical and economic calculations confirm the feasibility of introducing this development into production.The diploma project consists of an explanatory note containing 90 pages and a graphic part consisting of 5 sheets of A1 format.

Keywords: fermenter, mixing device, microorganisms, turbine mixer.

ВСТУП

Однією з основних передумов створення мікробіологічного виробництва стало стрімке збільшення застосування біологічно активних речовин мікробного походження, які витісняють речовини тваринного і рослинного походження, а також продукти хімічного синтезу. Отримання великої кількості маси мікроорганізмів, що є джерелом для виділення будь-якої біологічно активної речовини є значно простіше і економічніше, ніж виробництво біологічно активних речовин на основі тваринної або рослинної сировини.

Для отримання БАР (біологічно-активних речовин) з мікроорганізмів використовують ферментери (ферментери).

Ферментери - це закриті системи, в яких біологічний процес може здійснюватися за контрольованих умов навколишнього середовища. Це пристрій, у якому низькоцінний субстрат утилізується живими клітинами або ферментами для отримання продукту вищої вартості. Система ферментера складається з самого ферментера, датчиків, системи контролю та програмного забезпечення для моніторингу й регулювання умов усередині ферментера. Ферментери широко використовуються у виробництві фармацевтичних препаратів, біоматеріалів (таких як полімолочна кислота), харчовій промисловості, ферментації, біопаливі, а також в очищенні стічних вод тощо.

Перші справжні великомасштабні асептичні анаеробні ферментаційні апарати були розроблені на базі процесу, створеного (під час Першої світової війни, 1914-1918 рр.) Вейцманом та його колегами з Великобританії для виробництва ацетону шляхом глибинної рідкофазної ферментації з використанням *Clostridium acetobutylicum*. Великомасштабні аеробні ферментаційні апарати вперше були використані в Центральній Європі в

1930-х роках для виробництва пресованих дріжджів; ці ферментери мали великі циліндричні резервуари, в які повітря подавалося в нижню частину через систему перфорованих труб. У пізніших модифікаціях для покращення перемішування живильного середовища (культуральної рідини) та диспергування бульбашок повітря почали використовувати механічні мішалки (імпелери).

До відкриття пеніциліну та його комерціалізації у 1943 році біопроцеси не здійснювалися в промислових масштабах на обладнанні, подібному до того, що використовується на хімічних переробних заводах. Відтоді кількість продуктів, що отримуються шляхом ферментації, зросла, оскільки біопроцеси загалом потребують менше енергії, ніж інші методи, зазвичай використовують недорогу сировину, а іноді дають змогу отримувати продукти, які неможливо створити в інший спосіб. Сучасні продукти включають антибіотики, амінокислоти, ферменти, мономери, білки, харчові культури, біополімери, етанол, ізопропанол, ароматизатори, парфумерні хімікати та інші органічні речовини.

У даному дипломному проєкті представлено вертикальний аеробний ферментатор з механічним перемішуванням типу турбіна загальною місткістю 60 $м^3$, а також розроблено інженерне рішення з його модернізації, спрямоване на інтенсифікацію масообмінних процесів та оптимізацію гідродинамічних умов культивування.

Актуальність: Модернізація зумовлена необхідністю зниження високих енерговитрат на аерацію та усунення «мертвих зон» у великогабаритних ферментерах для підвищення ефективності культивування.

Новизна: Розроблено нову конфігурацію турбінної мішалки та конструкцію валу, що забезпечують оптимізацію гідродинамічних потоків і внутрішню рециркуляцію відпрацьованого повітря для зниження його витрат.

РОЗДІЛ 1.
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

1.1. Методи ферментації

На основі способу подачі субстрату у ферментер розрізняють періодичну ферментацію (batch), безперервну ферментацію (continuous) та напівперіодичну ферментацію з підживленням (fed-batch).

При періодичній ферментації всі матеріали для процесу ферментації, включаючи субстрат, інокулят (посівний матеріал) та всі технологічні параметри, задаються і завантажуються у ферментер, після чого процес запускається; до повного завершення процесу субстрат у ферментер не додається, а продукт з ферментера не вивантажується. Це закрита система.

При безперервній ферментації поживне середовище додається у ферментер безперервно з постійною швидкістю, що підтримує продуцентів в логарифмічній фазі росту, а продукти, що утворюються, виводяться одночасно; у цьому випадку ми отримуємо продукти, утворення яких пов'язане з ростом культури.

У напівперіодичному режимі з підживленням поєднуються ознаки як періодичного, так і безперервного режимів, коли субстрат додається через фіксовані проміжки часу протягом процесу ферментації (5).

Розрізняють аеробну та анаеробну ферментацію.

Аеробна ферментація: багато великомасштабних процесів ферментації здійснюються за аеробних умов, коли вміст ферментера перемішується за допомогою мішалки та завдяки барботерам (spargers) шляхом нагнітання стерильного повітря у ферментер. Існує кілька типів аеробних ферментерів для мікробних клітин: CSTR (реактор із безперервним перемішуванням; суспендовані клітини, механічне перемішування) та ерліфтний ферментер

(Airlift; суспендовані клітини, пневматичне перемішування).

Анаеробна ферментація: за винятком гострої потреби та наявності мішалки й барботера для забезпечення аерації, решта конфігурації ферментера залишається такою ж, як і для аеробної ферментації. Проте наявність мішалки є обов'язковою умовою для рівномірного розподілу температури, pH, в'язкості, поживних речовин тощо по всьому об'єму середовища у ферментері. Анаеробні біореакції використовуються в таких процесах, як виробництво етанолу, виноробство, пивоваріння та очищення стічних вод.

Розрізняють фотоферментацію (у якій можуть брати участь лише фотосинтезуючі бактерії) та темнову ферментацію.

Фотоферментація - це процес перетворення органічних речовин на інші сполуки придатної для використання енергії в результаті серії біохімічних реакцій, що здійснюються специфічною групою бактерій, які називаються фотосинтезуючими бактеріями і життєдіяльність яких відбувається лише за наявності світла.

Темнова ферментація за всіма ознаками подібна до фотоферментації, але в аспекті потреби у світлі темнова ферментація не потребує освітлення для ініціювання реакцій, і в ній задіяна різноманітна група мікроорганізмів.

1.2. Проєктні рішення для ферментерів, що використовуються в технології біопроцесів

Проєктування системи ферментера охоплює механічну, електричну інженерію, а також інженерію біопроцесів. Процес проєктування організовується таким чином, щоб системи могли експлуатуватися в умовах найсуворішого регулювання.

Однією із систем, у якій наразі застосовується ця технологія, є ферментер із крапельним (зрошуваним) шаром (trickle bed bioreactor).

Подібно до певних типів біофільтрів, що традиційно використовуються для контролю викидів, ця система містить сітку (екран), на якій адгезований та іммобілізований фермент, і крізь яку пропускають розчин субстрату для перетворення. Для систем іммобілізованих біореакцій також пройшли випробування мембрани та порожнисті волокна. Прикладом є порожнисті волокна з ферментами інтегрованими в їхні стінки. Дифузія субстрату крізь стінку трубки забезпечує його контакт із гелеподібним ферментом та перетворення на продукт. Подальша дифузія продукту забезпечує розділення, необхідне для його виділення. Під дією перепаду тиску (диференціального тиску) крізь стінку трубки продукт надходить усередину трубки, щоб зрештою збиратися в багатрубному колекторі.

У технології біопроцесів використовуються такі різні типи ферментерів: ферментери для глибинного культивування (Submerged Culture Bioreactors). Основними типами ферментерів для глибинного культивування є:

- Ферментери з безперервним перемішуванням (Continuous Stirred Tank Bioreactors),
- Барботажні колони (Bubble Column Bioreactors),
- Ерліфтні ферментери (Airlift Bioreactors),
- Ферментери з киплячим (псевдозрідженим) шаром (Fluidized Bed Bioreactors),
- Ферментери з крапельним (зрошуваним) шаром (Trickle Bed bioreactors).
- Твердофазні ферментери (Solid State Bioreactors).

1.3. Ферментери для глибинного культивування

Ферментер із безперервним перемішуванням (Continuous Stirred Tank Bioreactor) - є йпоширенішим типом аеробного ферментера, який використовується сьогодні, що може мати специфічну внутрішню конфігурацію, розроблену для забезпечення певної схеми циркуляції.

Більшість виробничих потужностей та схвалених FDA (Управлінням з продовольства і медикаментів США) процесів виробництва біофармацевтичних препаратів базуються на реакторах із перемішуванням. Зазвичай апарат має індекс форми (співвідношення висоти до діаметра, aspect ratio) від 1:1,5 (для культури клітин ссавців) до 1:3 (для мікробної ферментації). Відбійники (перегородки, що покращують перемішування) зазвичай мають ширину в одну десяту від діаметра резервуара. Мішалка (імпелер) може бути або пропелерною (морського типу) для аксіального перемішування культури клітин з діаметром від однієї третини до половини діаметра резервуара, або складатися з кількох турбін Раштона для диспергування газових бульбашок та аксіального перемішування в мікробних культурах. Газ зазвичай подається нижче мішалки, а додавання рідини здійснюється зверху ферментера. Ферментери з перемішуванням доступні об'ємом від 0,05 літра до 100 кубічних метрів.

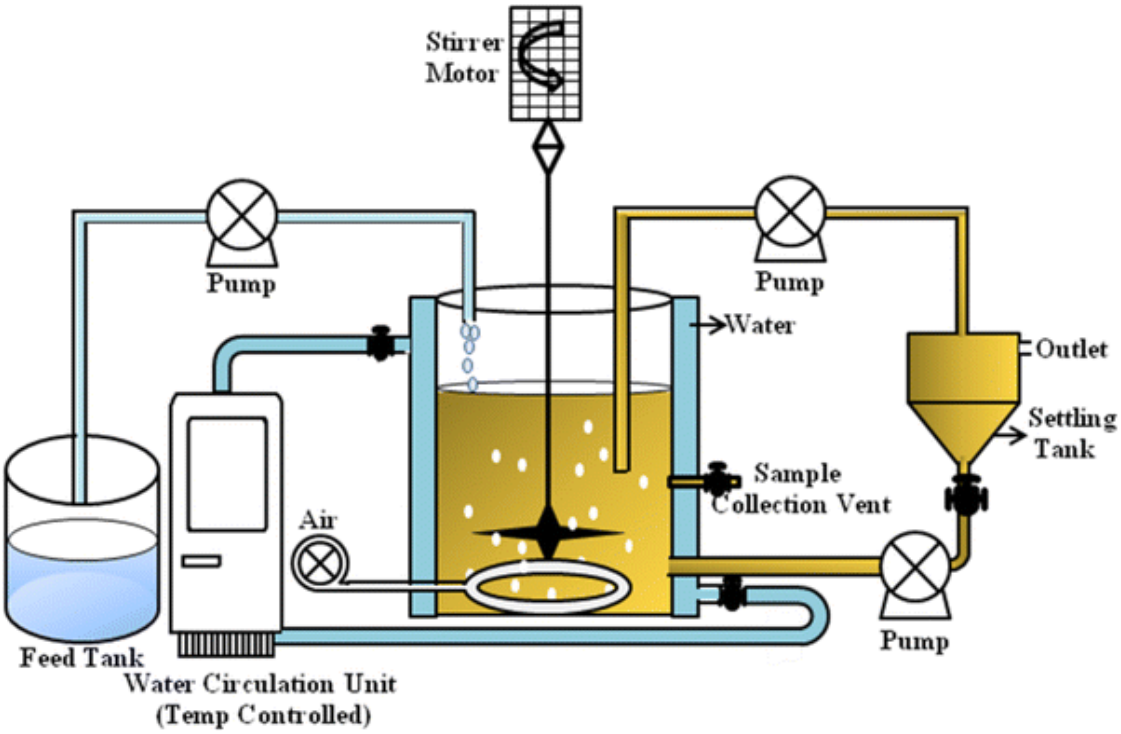


Рис.1.3.1. Ферментер із безперервним перемішуванням (Continuous Stirred Tank Bioreactor)

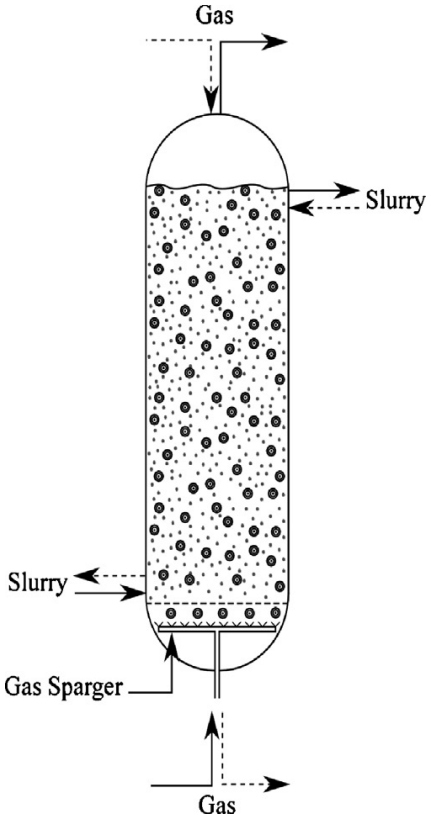


Рис. 1.3.2. Барботажна колона (Bubble Column Bioreactor)

Барботажні колони (Bubble Column Bioreactors). Це найпростіший тип колонних ферментерів; вони складаються зі скляних або металевих труб, у нижню частину яких повітря подається через перфоровані труби, пластини або металевий мікропористий барботер для забезпечення перемішування та аерації. Використовувалися ферментери об'ємом від 3 л до 950 л, а індекс форми (співвідношення висоти до діаметра) може становити до 16:1. Ці колонні ферментери використовуються для виробництва лимонної кислоти та тетрацикліну, а також для низки інших процесів ферментації на основі міцеліальних грибів.

Ерліфтні ферментери (Air lift Bioreactors): Подібно до барботажних колон, ці апарати відрізняються тим, що містять внутрішню циркуляційну (дифузорну) трубу. Існує два типи циркуляційних труб: внутрішня труба (ерліфтний ферментер із внутрішнім контуром циркуляції) або зовнішня труба (ерліфтний ферментер із зовнішнім контуром циркуляції). Циркуляційна труба покращує циркуляцію та масообмін кисню, а також вирівнює зсувні зусилля в реакторі. Повітря зазвичай подається через барботерне кільце в нижню частину центральної циркуляційної труби, яка контролює циркуляцію повітря та середовища. Повітря рухається вгору по трубі, утворюючи бульбашки, а відпрацьований газ відокремлюється у верхній частині колони. Потім дегазована рідина тече вниз, і продукт

зливається з резервуара. Ерліфтні ферментери доступні від лабораторних масштабів до повноцінного промислового виробництва.

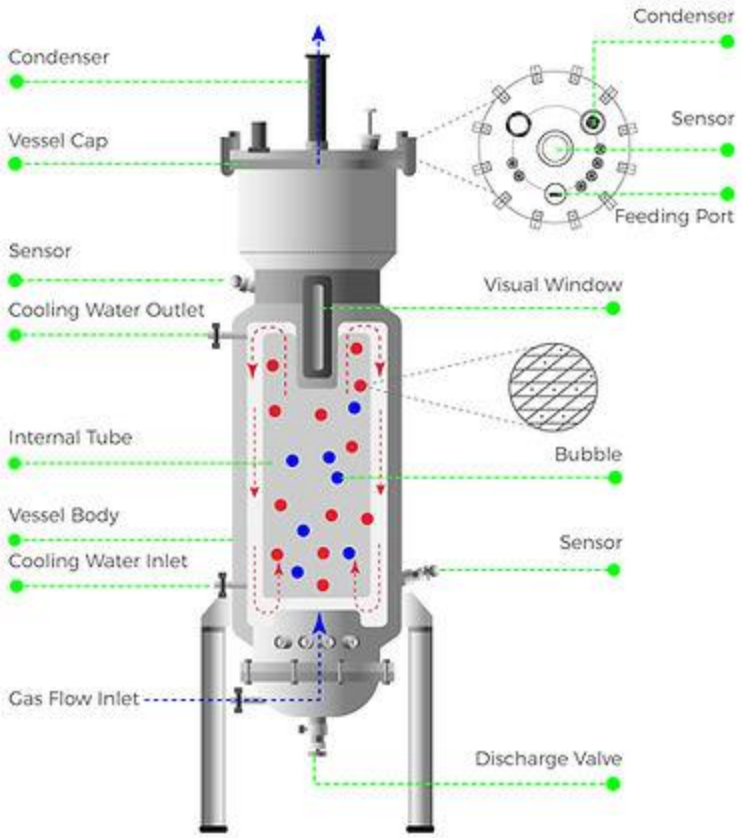


Рис. 1.3.3. Ерліфтні ферментери (Air lift Bioreactors) компанії Lab1st (Labfirst Scientific), Китай.

Ферментери з іммобілізованими ферментами та клітинами: До цієї категорії належать *ферментери з киплячим (псевдозрідженим) шаром (Fluidized bed bioreactors) та ферментери зі щільним (нерухомим) шаром (Packed bed bioreactors*). Ферментер із киплячим шаром схожий на барботажну колону, за винятком того, що верхня частина розширена для зниження швидкості руху рідини.

Конструкція **ферментерів із киплячим шаром** (розширена верхня частина та вузька реакційна колона) є такою, що тверді частинки утримуються в реакторі, тоді як рідина витікає. Ці ферментери підходять для проведення реакцій за участю текучих суспендованих біокаталізаторів, таких

як іммобілізовані ферменти, іммобілізовані клітини та мікробні флокули (пластівці). Для ефективної роботи киплячих шарів подається газ для створення належного газо-рідинно-твердофазного киплячого шару. Необхідно також переконатися, що суспендовані тверді частинки не є занадто легкими або занадто щільними (занадто легкі можуть спливати, тоді як занадто щільні можуть осідати на дно), і що вони перебувають у стані стійкої суспензії. Рециркуляція рідини є важливою для підтримання безперервного контакту між вмістом реакційного середовища та біокаталізаторами. Це забезпечує високу ефективність біопроцесу.

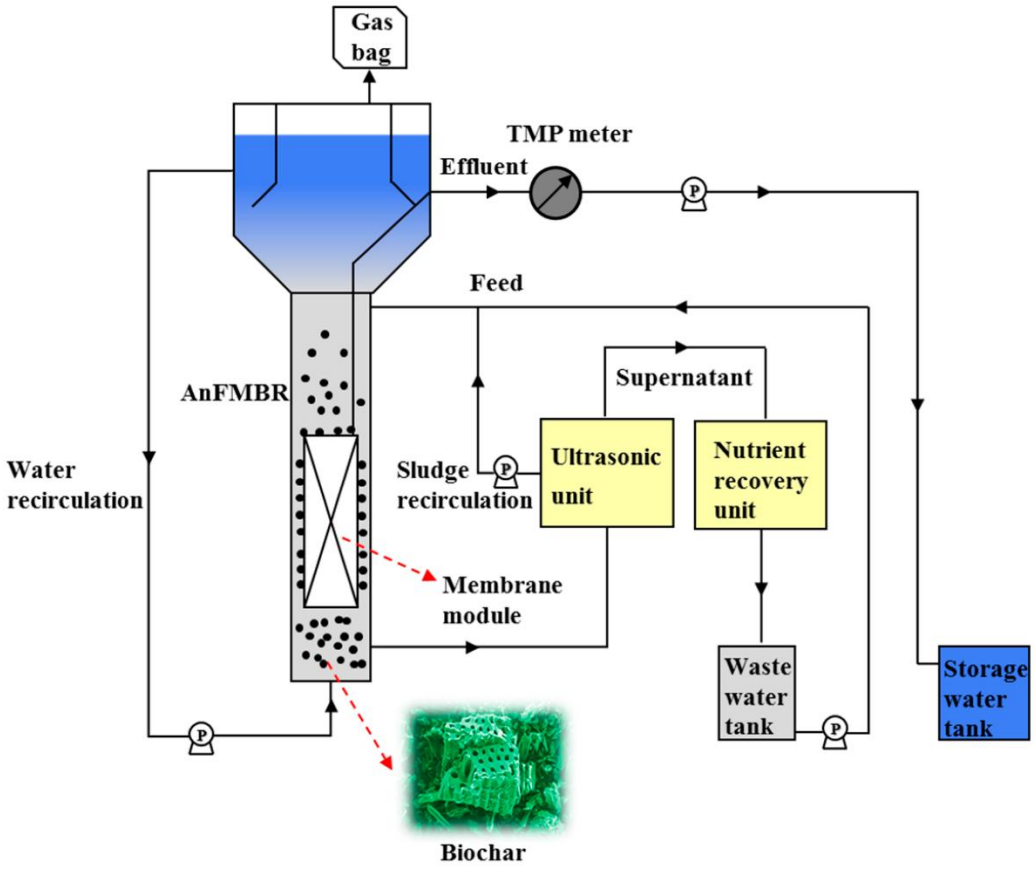


Рис. 1.3.4. Ферментер з киплячим (псевдозрідженим) шаром (Fluidized bed bioreactors)

У випадку **ферментерів зі щільним (нерухомим) шаром** (Packed Bed Bioreactors), шар твердих частинок із біокаталізаторами на поверхні або всередині твердої матриці, упакований у колону, утворює ферментер зі

щільним шаром. Тверді частинки, що використовуються, можуть бути пористими або непористими гелями, а за своєю природою вони можуть бути стисливими або жорсткими. Живильне середовище безперервно тече над іммобілізованим біокаталізатором. Продукти, отримані в ферментері зі щільним шаром, виділяються в рідину і вимиваються. Хоча рух рідини може бути спрямований як вгору, так і вниз, низхідному потоку під дією сили тяжіння віддають перевагу; концентрацію поживних речовин (і, отже, кількість утворених продуктів) можна збільшити шляхом підвищення швидкості потоку живильного середовища. Через погане перемішування в ферментерах зі щільним шаром досить важко контролювати pH, що здійснюється додаванням кислоти або лугу. Проте цим ферментерам віддають перевагу в технологіях біопроцесів, що включають реакції з інгібуванням продуктом. Ферментери зі щільним шаром не дозволяють продуктам накопичуватися в будь-якій значній кількості.

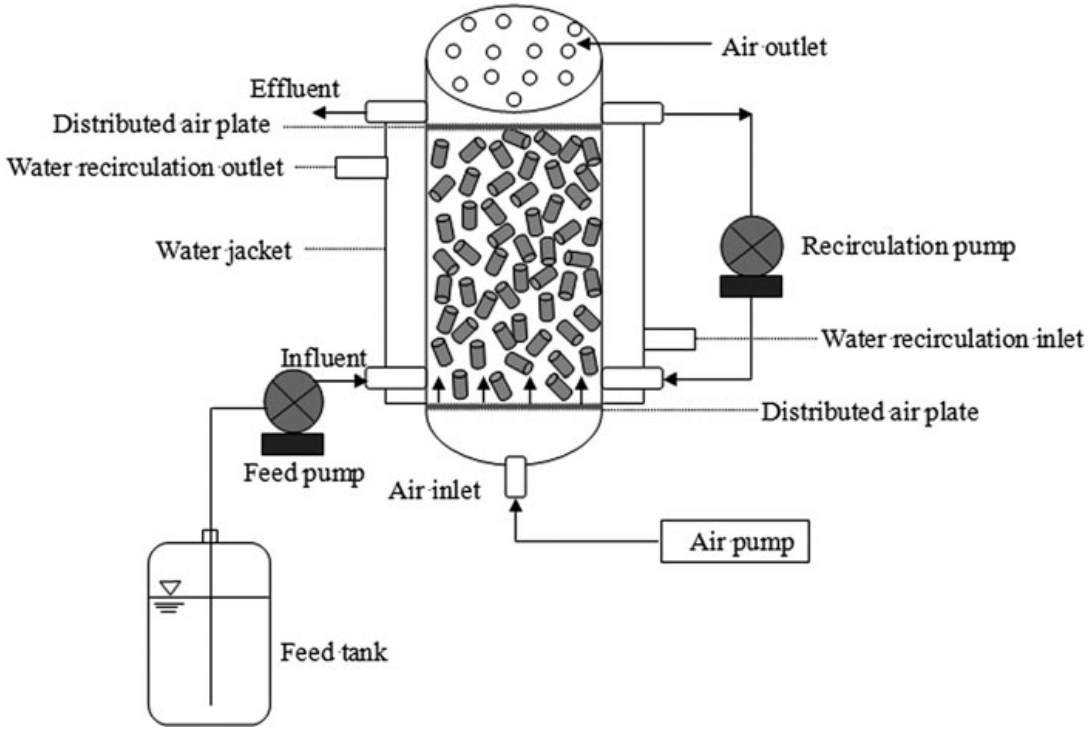


Рис. 1.3.5. Ферментер зі щільним (нерухомим) шаром (Packed Bed Bioreactors)

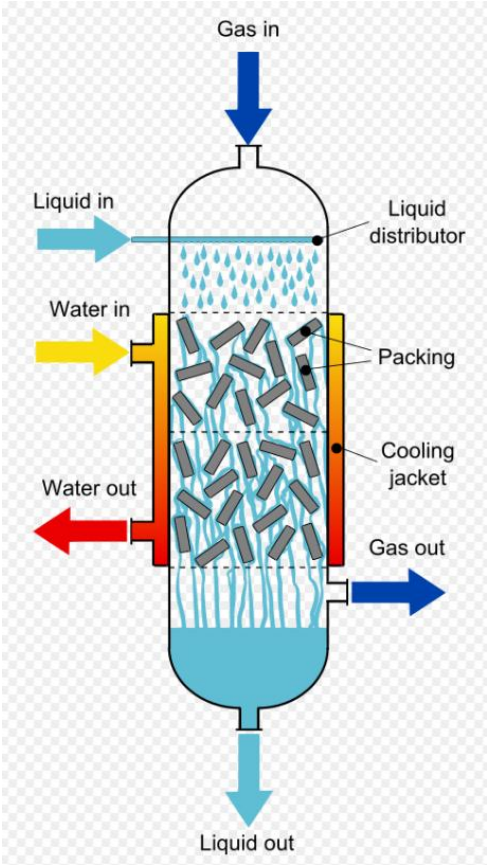


Рис. 1.3.6. Ферментер із крапельним (зрошуваним) шаром (Trickle Bed Fermenter)

Ферментер із крапельним (зрошуваним) шаром (Trickle Bed Fermenter). Вони складаються з циліндричного резервуара, заповненого опорним матеріалом (носієм) (наприклад, тріскою, камінням або пластиковими структурами). Носій має великі відкриті простори для протікання рідини та газу і росту мікроорганізмів на твердій опорі. Рідке живильне середовище розпилюється на верхню частину носія і стікає краплями вниз по шару. Повітря може рухатися вгору по шару протитоком до руху рідини. Ці ферментери використовуються у виробництві оцту, а також в інших процесах. Вони підходять для рідин із низькою в'язкістю та малою кількістю суспендованих твердих частинок.

1.4. Твердофазні ферментери

Твердофазні ферментери (Solid State Bioreactors) використовуються для процесів, де мікроорганізми вирощуються на вологих твердих частинках. Простори між частинками містять безперервну газову фазу та мінімальну кількість води. Апарати для твердофазної ферментації (ТФФ / SSF) варіюються за технічною складністю: від дуже примітивних обгорток із бананового листя, бамбукових кошиків і куп субстрату до високоавтоматизованих машин, що використовуються переважно в Японії.

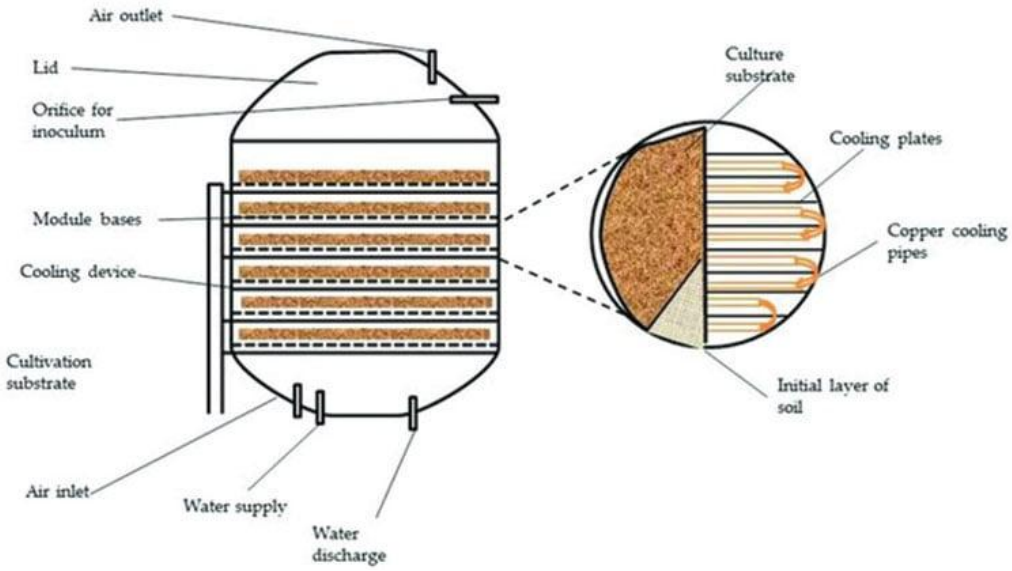


Рис. 1.4.1. Твердофазні ферментери (Solid State Bioreactors)

Більшість процесів твердофазної ферментації (ТФФ) включають нитчасті (міцеліальні) гриби, хоча деякі також задіюють бактерії або дріжджі. ТФФ переважно використовується в харчових процесах (8). Використання судин під тиском не є нормою для твердофазної ферментації. Зазвичай використовуються такі пристрої: лотковий ферментер (Tray fermenter), ферментер зі статичним шаром (Static bed fermenter), тунельний ферментер (Tunnel fermenter), ротаційний дисковий ферментер (Rotary disc fermenter), ротаційний барабанний ферментер (Rotary drum fermenter), ферментер із резервуаром із перемішуванням (Agitated tank fermenter) та шнековий ферментер безперервної дії (Continuous screw fermenter).

1.5. Інші конструкції ферментерів

Фотоферментери (Photo Bioreactors): Це ферментери, спеціалізовані для ферментації, яка може здійснюватися як під впливом сонячного світла, так і штучного освітлення. Оскільки штучне освітлення є дорогим, перевагу віддають відкритим (зовнішнім) фотоферментерам. Зазвичай вони використовуються для культивування фотосинтезуючих організмів (рослин,

водоростей та бактерій). Промислові фотоферментери також можуть мати вигляд відкритих ставкових систем, а тому вони є більш чутливими до впливу навколишнього середовища. Вони виготовляються зі скла або більш поширеного прозорого пластику. Набір трубок або плоских панелей утворює світлоприймальні системи (сонячні приймачі). Культура може циркулювати через сонячні приймачі за допомогою таких методів, як використання відцентрових або ерліфтних насосів. Важливо, щоб клітини перебували в постійній циркуляції без утворення осадів. Крім того, слід підтримувати належне проникнення сонячного світла. Трубки також слід охолоджувати для запобігання підвищенню температури. Фотоферментери зазвичай експлуатуються в безперервному режимі за температури в діапазоні 25-40°C. Зазвичай використовуються мікроводорості та ціанобактерії (Cyanobacteria). Організми ростуть у світлий час доби, тоді як продукти утворюються вночі. Певні важливі сполуки виробляються саме з використанням фотоферментерів, наприклад, β-каротин, астаксантин.

Рис.1.5.1. Фотоферментери (Photo Bioreactors)

Ферментери для стовбурових клітин (Stem Cell Bioreactors): Останньою розробкою є ферментер для стовбурових клітин, які є дуже

перспективними для регенеративної медицини, скринінгу лікарських засобів та біомедичного застосування. Ці клітини мають необмежену здатність до самовідновлення та дивовижну спроможність диференціюватися у зрілі клітини зі спеціалізованими функціями, такі як клітини крові, клітини серцевого м'яза або нервові клітини.

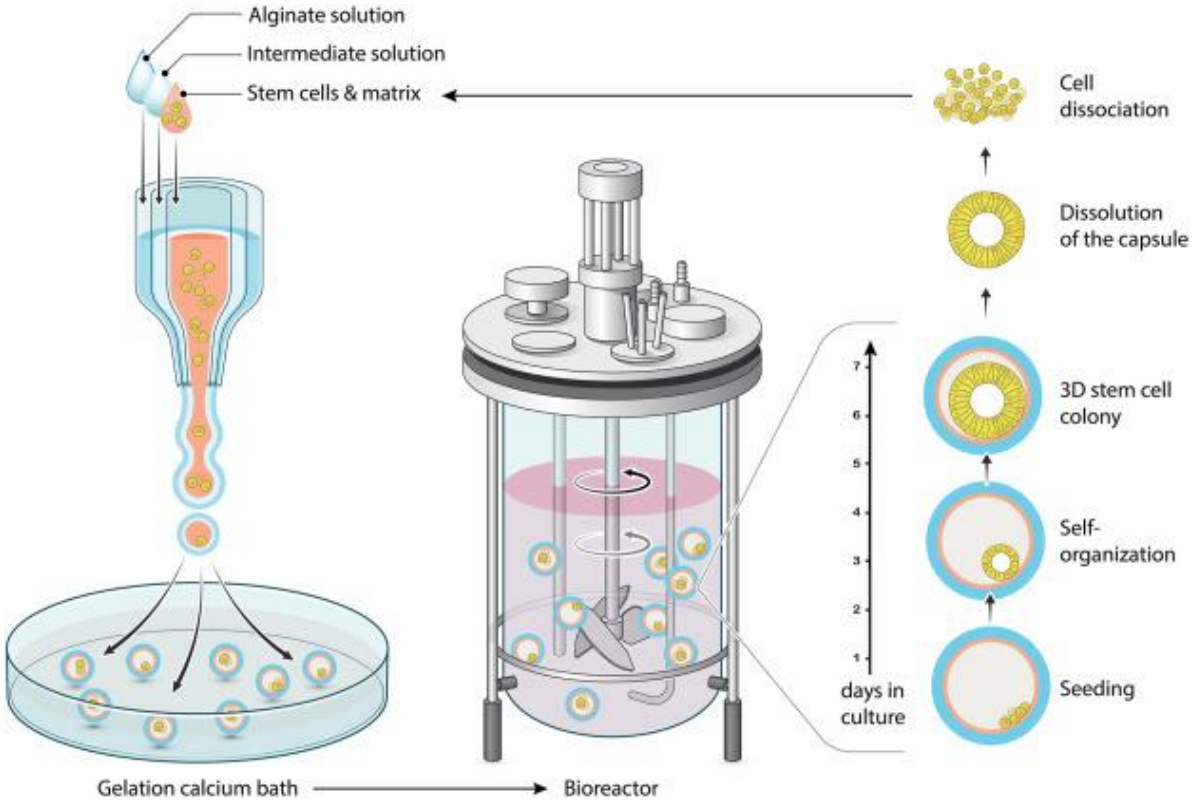


Рис. 1.5.2. Ферментери для стовбурових клітин (Stem Cell Bioreactors)

Однак реальна кількість клітин, яку можна отримати від наявних донорів, є дуже низькою. Одним із можливих рішень для отримання відповідної кількості клітин є масштабування культивування цих клітин *in vitro*. Кілька спільних дослідницьких програм між промисловим сектором та університетами зосереджені на розробці систем ферментерів для стовбурових клітин. Компанія Applikon Biotechnology взяла участь у кількох таких проєктах і розробила низку успішних конструкцій.

Картриджі з порожнистими волокнами (Hollow Fiber Cartridges): Порожнисті волокна - це невеликі трубчасті фільтри, запаяні в корпус картриджа таким чином, що середовище для культивування клітин, яке

прокачується через кінець картриджа, буде протікати всередині волокна, тоді як клітини вирощуються на зовнішній стороні волокна. Порожнисті волокна забезпечують величезну площу поверхні в малому об'ємі.

Клітини ростуть на волокнах та навколо них із щільністю понад $1 \cdot 10^8$ клітин на мл. Культивування клітин у порожнистих волокнах - це єдиний спосіб вирощування клітин із щільністю, близькою до умов *in vivo*. Культивування клітин із високою щільністю дозволяє досягти в 10-100 разів вищої концентрації секретованого продукту порівняно з класичними періодичними процесами.

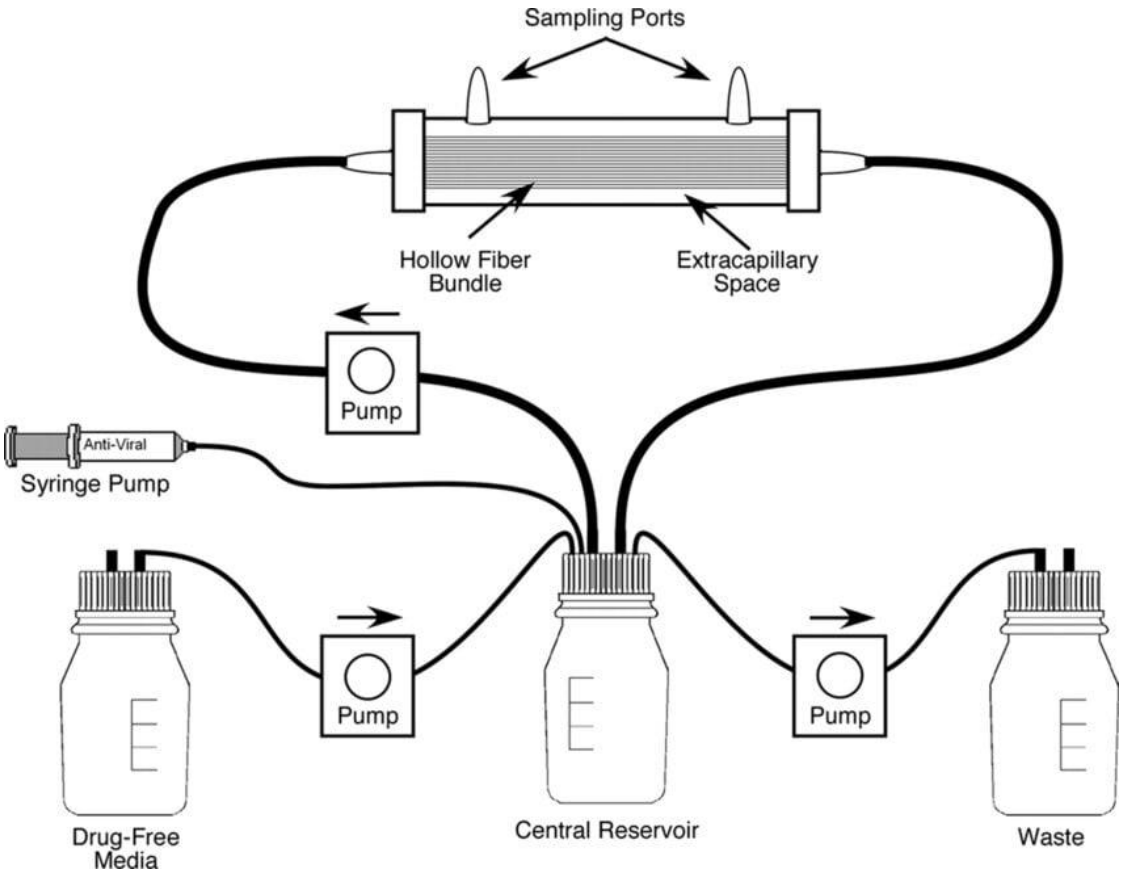


Рис. 1.5.3. Картриджі з порожнистими волокнами (Hollow Fiber Cartridges)

Проте масштабованість систем із порожнистими волокнами є обмеженою, і тому такі типи ферментерів використовуються переважно в лабораторних масштабах. Менші ферментери з порожнистими волокнами часто застосовуються для відбору та оптимізації клітинних ліній перед

переходом до більших систем культивування клітин (Gramer and Britton, 2000). Нещодавно ферментери з порожнистими волокнами були протестовані як новітні платформи для комерційного виробництва вірусу грипу А з високим титром.

Ферментери з коливальними мішками (Rocking Bag Bioreactors): Ця система базується на коливальному русі тримача ферментера для перемішування об'єму рідини, що міститься в пластиковому мішку. Цей тип ферментера переважно використовується для культивування клітин, що зумовлено низькою швидкістю масообміну кисню та обмеженою охолоджувальною здатністю таких систем.

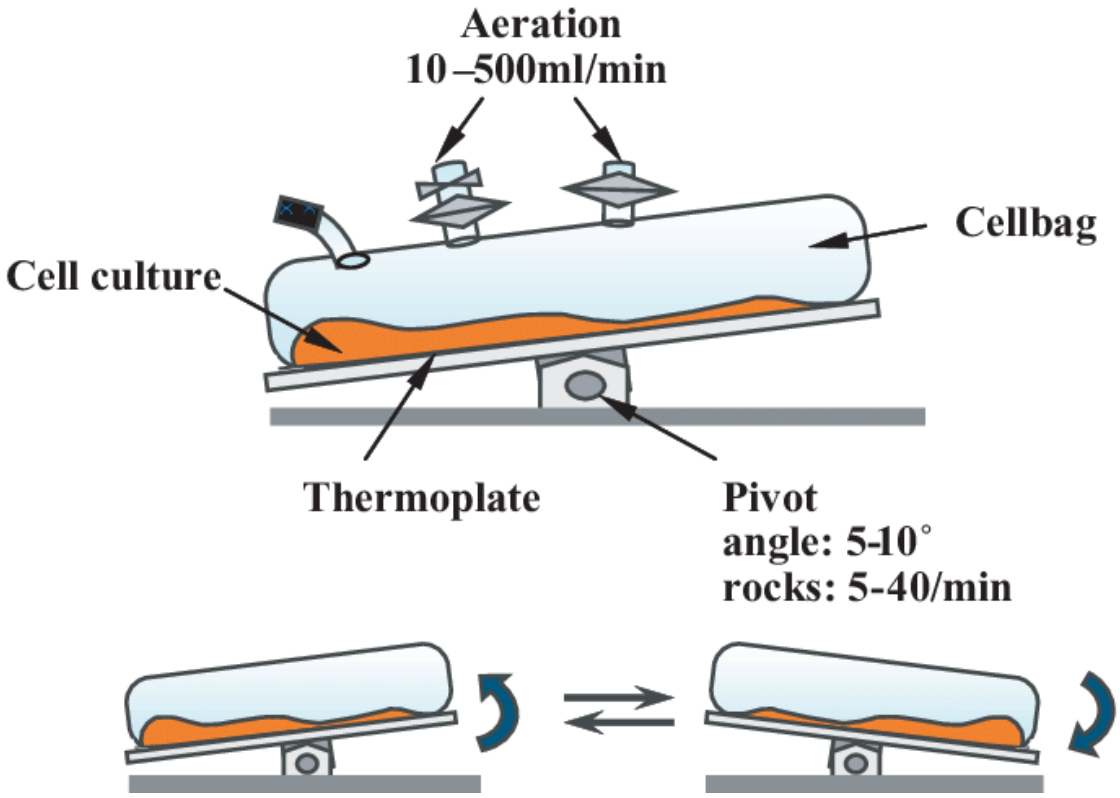


Рис. 1.5.4. Ферментери з коливальними мішками (Rocking Bag Bioreactors)

Загалом, ферментери є невід'ємною складовою для розробки багатьох нових високоцінних продуктів та заміни існуючих великотоннажних хімічних процесів. Правильний вибір та конструкція ферментера визначатимуть оптимальний комерційний біопроцес та відповідні капітальні інвестиції. Ферментер слід розглядати не як відокремлену одиницю, а як частину інтегрованого комплексу технологічних операцій, що охоплює як початкові стадії - підготовку (upstream), так і кінцеві стадії - розділення й очищення (downstream).

РОЗДІЛ 2.
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

В дипломній роботі розглядається модернізація вертикального ферментатора з механічним перемішуванням турбінного типу геометричним об’ємом 60 м^3. Базова конструкція апарата передбачає використання стандартних багатоярусних турбінних мішалок (зокрема, типу Раштона).

Для підвищення ефективності масообмінних процесів та зниження енергетичних витрат, об’єктом модернізації було обрано конструкцію мішалки. Пропонується заміна стандартних чотирилопатевих турбінних мішалок на інноваційну дволопатеву конструкцію. Нові лопаті мають форму прямокутного паралелепіпеда з наскрізними внутрішніми вирізами прямокутної форми.

Головною конструктивною особливістю модернізованого вузла є інтеграція системи рециркуляції газу безпосередньо у перемішувальний пристрій. На робочих поверхнях лопатей виконано перфорацію (дискретні отвори), а центральний вертикальний вал мішалки спроєктовано порожнистим, із відповідними перепускними отворами у зоні над рівнем культурної рідини.

Під час обертання валу мішалки навколо лопатей утворюються зони зниженого тиску (кавітаційні або розріджені зони). Відпрацьоване повітря (або газова суміш), що знаходиться у верхній частині апарата, під дією утвореного перепаду тиску всмоктується через технологічні отвори у порожнистий вал. Далі газова фаза транспортується всередину лопатей і під дією відцентрової сили ежектується назад у товщу культурального середовища через перфорацію на лопастях. Така конструкція забезпечує внутрішню самовсмоктувальну рециркуляцію повітря без використання

додаткових компресорних потужностей.

Забезпечуються такі техніко-економічні переваги:

- Інтенсифікація масообміну (покращення перемішування): Прямокутна форма лопатей із наскрізними вирізами забезпечує високий рівень турбулізації потоку, подрібнення газових бульбашок та рівномірний розподіл мікроорганізмів і поживних речовин по всьому робочому об’єму ферментатора, виключаючи утворення застійних зон.
- Зниження енерговитрат на перемішування: Зменшення кількості лопатей з чотирьох до двох та наявність наскрізних вирізів суттєво знижують лобовий гідродинамічний опір середовища, що дозволяє зменшити крутний момент на валу та знизити споживання електроенергії.
- Ресурсозбереження та повторне використання газу: Завдяки ефекту самовсмоктування відпрацьоване кисневмісне повітря з газової подушки повертається в цикл ферментації. Це суттєво зменшує загальну потребу в подачі свіжого стерильного повітря від зовнішньої компресорної станції та знижує навантаження на систему повітряних фільтрів.
- Зростання продуктивності апарата: Оптимізація масообміну кисню безпосередньо стимулює кінетику росту біомаси, що скорочує тривалість одного циклу культивування та збільшує річну продуктивність.
- Зниження собівартості готової продукції: Економічний ефект, отриманий від економії електроенергії, зниження витрат на підготовку (стиснення та стерилізацію) повітря, а також інтенсифікація процесу культивування, сумарно забезпечують значне зниження частки загальновиробничих витрат у собівартості кінцевого продукту.

Висновок: Таким чином, економічна ефективність, технічна доцільність та інноваційність запропонованої модернізації перемішувального пристрою ферментатора об’ємом 60 $м^3$ є очевидною, що детально підтверджується подальшими інженерно-технологічними розрахунками.

РОЗДІЛ 3.
ХАРАКТЕРИСТИКА ВХІДНОГО МАТЕРІАЛУ І ГОТОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

Мікроорганізми є універсальними продуцентами широкого спектра біологічно активних речовин і цінної сировини для різних галузей промисловості. Зокрема, дріжджові клітини слугують багатим джерелом ензимів, протеїнів та вуглеводів, які застосовуються у синтезі біопалива, полісахаридів та β-глюканів. Своєю чергою, одноклітинні водорості акумулюють комплекс незамінних амінокислот, вітамінів, каротиноїдів, мінеральних речовин та поліненасичених жирних кислот, що робить їх перспективною інноваційною сировиною для виробництва функціональних продуктів харчування. Окремі представники мікроводоростей, як-от *Nannochloropsis oculata*, під дією ультрафіолетового випромінювання здатні синтезувати вітаміни групи B, D_3 та K_2, виступаючи їх натуральним веганським джерелом. Окрім харчової промисловості, мікроорганізми затребувані у біоенергетиці та екологічних технологіях; наприклад, бактерії *Alcaligenes latus* продукують полігідроксиалканоати (PHA) та полігідроксибутират (PHB), які є основою для створення біорозкладних полімерів.

Окремим високотехнологічним напрямом є фармацевтична біотехнологія, яка базується на використанні мікроорганізмів та методів рекомбінантної ДНК для промислового одержання лікарських засобів. Модифіковані генетичні штами одноклітинних водоростей, дріжджів та бактерій здатні синтезувати цільові рекомбінантні білки, гормони, субодиничні вакцини, моноклональні антитіла, ензими та антибіотики. Найбільш поширеним біологічним об'єктом у фармації є бактерія *Escherichia*

coli. Цей продуцент застосовується для отримання рекомбінантного людського інсуліну, а також низки інших терапевтичних сполук та препаратів, серед яких артемізинін, паклітаксел (таксол), елеутеробін, еритроміцин, епотилони C і D, хумулін, протропін, роферон А, різноманітні інтерферони, тазонермін і гуматроп.

РОЗДІЛ 4.
ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ. БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ

Розглядається модернізація промислового вертикального ферментатора аеробного типу, призначеного для глибинного культивування мікроорганізмів у рідкому поживному середовищі.

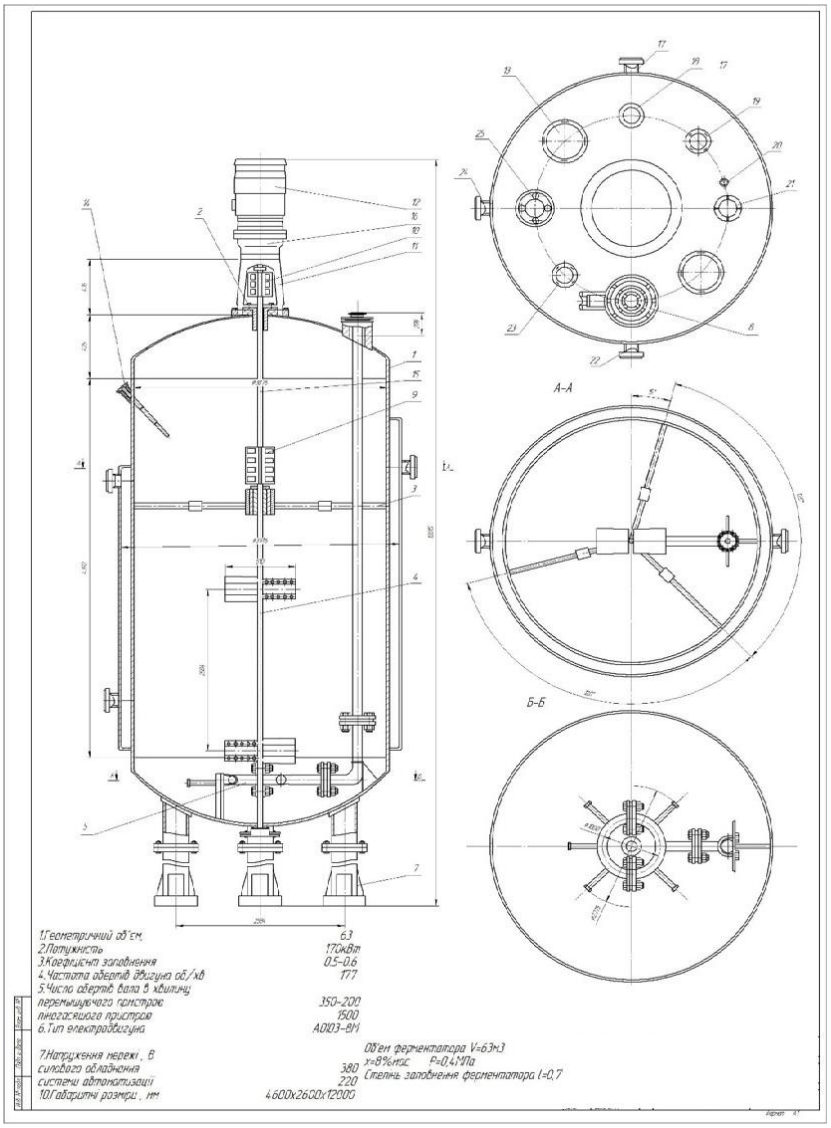


Рис. 4.1 Модернізований ферментатор об'ємом 60 м^3: 1 - корпус; 2 - модернізоване сальникове ущільнення; 3 - тяги; 4 - порожнистий вал; 5 - кільцевий барботер; 6 - підп'ятник; 7 - опора апарата; 8 - лаз-павук; 9, 10 –

муфти; 11 - стійка привода; 12 - електродвигун; 13 - оглядове скло; 14 - гільза термометра; 15 - проміжний вал; 16 - редуктор; 17-25 - технологічні штуцери.

Корпус ферментатора 1 виконаний у вигляді вертикальної циліндричної судини з еліптичними кришкою та днищем. По осі апарата встановлено вал 4, який приводиться в рух електроприводом, що складається з двигуна 12 (потужність 170 кВт) та редуктора 16. Частота обертів двигуна становить 177 об/хв. На валу закріплено двоярусну систему мішалок (турбінного та лопатевого типу) для забезпечення інтенсивного масообміну. Нижній кінець валу фіксується у підп'ятнику 6 для запобігання радіальному битю.

Для насичення культурного середовища киснем у нижній частині апарата встановлено кільцевий барботер 5. По периметру внутрішньої стінки корпусу рівномірно розташовані відбійні пластини 3, які трансформують круговий рух рідини в турбулентний, запобігаючи утворенню центральної вирви та покращуючи диспергування повітря. З метою підтримання оптимального температурного режиму (P = 0.4 МПа) теплообмін здійснюється через зовнішню сорочку апарата, а контроль забезпечує термодатчик у гільзі 14. Ступінь заповнення ферментатора становить $\varphi = 0.7$. Герметичність виходу валу з корпусу забезпечується вузлом ущільнення 2.

Для модернізації процесу біосинтезу в апараті об'ємом $V = 60$ м^3 було обрано вдосконалену конструкцію перемішуючого пристрою. Замість стандартних суцільних чотирилопатевих турбінних мішалок на валу встановлюються спеціальні дволопатеві мішалки паралелепіпедної форми. Лопаті не є суцільними - у їхньому тілі виконано прямокутні наскрізні вирізи (вікна). На поверхні лопатей з одного боку виконано систему мікроотворів, які внутрішніми каналами з'єднуються з порожниною самого валу, що виконаний пустотілим. На самому валу в зоні розрядження також передбачено технологічні отвори.

Принцип дії модернізованого вузла:

Під час обертання валу з мішалками 4 у зоні за лопатями створюється область зниженого тиску (розрядження). Повітря (або газова фаза), що подається через барботер 5 і скупчується у верхній частині або об'ємі апарата, засмоктується через отвори на лопатях всередину пустотілого валу. Через отвори на валу воно знову повертається в активну зону перемішування корпусу апарата. Така конструкція забезпечує внутрішню рециркуляцію газу безпосередньо в процесі перемішування, дозволяючи повторно використовувати незасвоєний мікроорганізмами кисень повітря.

Для забезпечення надійної герметизації рухомого з'єднання та запобігання виходу біомаси або потрапляння сторонньої мікрофлори в апарат, використовується спеціальний вузол ущільнення 2. Він жорстко з'єднаний з кришкою корпусу ферментатора і встановлений безпосередньо на робочий вертикальний вал 4, що обертається.

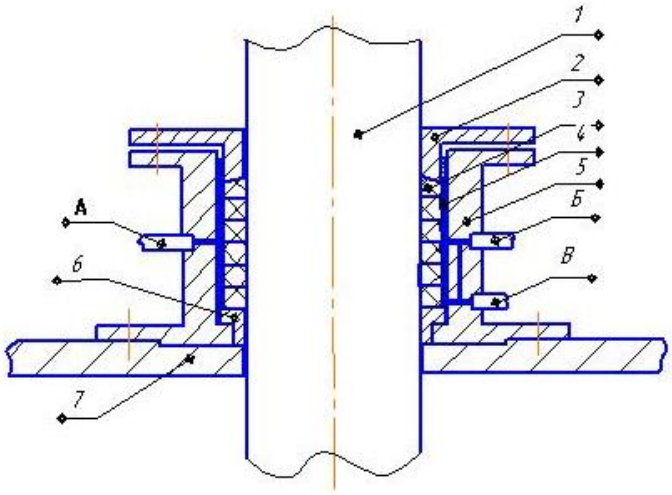


Рис. 4.2. Модернізоване сальникове ущільнення валу ферментатора: 1 - вертикальний вал, 2 - натискна втулка, 3 - сальникова набивка, 4 - перфорований стакан, 5 - корпус ущільнення, 6 - утримуюче кільце, 7 - кришка корпусу апарата; А, Б, В - штуцери для подачі стерильного повітря

0.2 - 0.3 МПа), підведення пари (135 °С) та відведення конденсату для забезпечення герметичності й стерильності валу 4, що обертається.

Комплекс впроваджених заходів забезпечує наступні переваги:

1. Інтенсифікація масообміну: Завдяки рециркуляції повітря через лопаті досягається значно краще перемішування мікроорганізмів та рівномірний розподіл розчиненого кисню по всьому об'єму (V = 60 $м^3$).

2. Енергоефективність: Використання двох перфорованих лопатей замість чотирьох суцільних знижує лобовий опір середовища, що призводить до зменшення витрат електроенергії на привод (потужність двигуна 170 кВт використовується ефективніше).

3. Економія технологічних газів: Суттєво зменшуються потреби в подачі нових порцій стерильного повітря від компресора, оскільки наявний кисень використовується повторно завдяки внутрішньому контуру циркуляції.

4. Зниження собівартості: Зменшення витрат на енергоносії та підготовку (стерилізацію) повітря безпосередньо знижує собівартість готового продукту біосинтезу.

5. Підвищення продуктивності: Оптимізація гідродинамічних умов та масообміну дозволяє збільшити вихід цільового продукту з одиниці об'єму ферментатора за один цикл культивування.

РОЗДІЛ 5.
РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Загальний об'єм ферментатора $V_{заг} = 63 м^3$

Об'ємна маса $\rho = 1065 кг/м^3$

Динамічна в'язкість $\mu = 0{,}00153 Н \cdot сек/м^2$ або

$$\mu = \frac{0{,}00153}{9{,}81} = 0{,}000156 кГ \cdot сек/м^2$$

Теплоємність $c = 4186 Дж/(кг \cdot град)$

Коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0{,}516 ккал/(кг \cdot м \cdot град)$

Робочий тиск при стерилізації паром 0,4МПа

Коефіцієнт заповнення $\varphi = 0{,}7$

Робочий об'єм апарата:

$$V_р = V_{заг} \cdot \varphi = 63 \cdot 0{,}7 = 44.1 м^3$$

Визначимо геометричні розміри ферментатора:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h_1 = V_{заг}$$

$h = 60 мм$ $h_1 = 10 мм$ $d = 40 мм$

$$h = \frac{3}{2} \cdot d \qquad h_1 = \frac{1}{4} \cdot d$$

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{3}{2} \cdot d + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{4} \cdot d = V_{заг}$$

$$\frac{3 \cdot \pi \cdot d^3}{8} + \frac{\pi \cdot d^3}{8} = 63$$

$$3 \cdot \pi \cdot d^3 + \pi \cdot d^3 = 1200$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{300}{3{,}14}} = 4{,}56 м$$

Внутрішній діаметр апарата приймаємо $D_{вн} = 3876мм$

Еліптичне днище апарату такого діаметру мають такі показники (ГОСТ 6533-53): внутрішній діаметр $D_{вн} = 3876мм$; висота еліптичної частини $h_B = 969мм$; висота відбортовки $h = 34мм$; внутрішня поверхня $F = 17м^2$; ємність днища $V_{дн} = 9{,}46м^3$; товщина стінки днища $S = 10мм$.

Згідно ГОСТ 6533-53 приймаємо співвідношення:

$$h_B = 0{,}25 \cdot D_{вн} = 0{,}25 \cdot 3876 = 969мм;$$

$$h \geq 2 \cdot S$$

$$969 \geq 24$$

Повний об'єм ферментатора:

$$V_{заг} = V_Ц + 2 \cdot V_{дн} = 63м^3$$

де $V_{дн}$ - об'єм еліптичних днищ; $V_{дн} = 9{,}46м^3$

Висота циліндричної частини ферментатора:

$$H_Ц = \frac{V_{заг} - 2 \cdot V_{дн}}{F} = \frac{63 - 2 \cdot 9{,}46}{12} = 3{,}84м$$

де F - площа перерізу ферментатора по внутрішньому діаметру:

$$F = 0{,}785 \cdot D_{вн}^2 = 0{,}785 \cdot 3{,}876^2 = 12м^2$$

Загальна висота ферментатора:

$$H_{заг} = H_Ц + 2 \cdot (h_B + h) = 3{,}84 + 2(1{,}14 + 0{,}04) = 6{,}236м$$

5.1. Розрахунок ферментатора на механічну міцність

Після завершення кожного циклу культивування біореактор підлягає обов'язковому санітарно-технічному обробленню - миттю та термічній стерилізації гострою насиченою парою під надлишковим тиском (усереднений робочий тиск стерилізації становить $p = 0{,}4МПа$ та температурою $t_{нас} = 142{,}9^0C$).

З огляду на роботу апарата в умовах знакозмінних термічних навантажень та підвищеного внутрішнього тиску, його конструктивні

елементи розраховують на механічну міцність відповідно до діючих нормативних вимог і правил безпечної експлуатації судин, що працюють під тиском (ДСТУ EN 13445 / ГОСТ 14249).

Як конструкційний матеріал для виготовлення елементів корпусу ферментатора (у разі застосування вуглецевих сталей) обрано якісну конструкційну сталь марки Ст3сп (згідно з ДСТУ 4484:2005 / ГОСТ 380).

Товщина стінки S циліндричної обечайки:

$$S_{Ц} = \frac{p \cdot D_{вн}}{230 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп} - p} + C = \frac{4 \cdot 3876}{230 \cdot 0{,}9 \cdot 11{,}7 - 4} + 3 = 9{,}41мм = 0{,}00941м$$

Для отримання міцного зварного шва на стику з днищем з товщиною стінки 12мм приймаємо $S_{Ц} = 10мм$.

Гідравлічне випробування ферментатора згідно норм Держгортехнагляду повинно виконуватись при тиску:

$$p_{Г} = p_{р} + 2 = 4 + 2 = 6 кГ/см^2 \text{ або } p_{Г} = 6 \cdot 0{,}0981 = 0{,}5886МПа$$

До цього тиску додається гідростатичний тиск стовпця рідини, що знаходиться в апараті при випробуванні.

Гідравлічний тиск, що випробовується при висоті стовпця рідини $H_{Ж} = 6{,}2м$.

$$p_{и} = p_{Г} + p_{Ж} = 5 + 0{,}62 = 5{,}62 кГ/см^2 \text{ або } p_{и} = 6{,}62 \cdot 0{,}0981 = 0{,}649МПа$$

Гідростатичний тиск стовпця рідини:

$$p_{Ж} = 0{,}1 \cdot H_{Ж} = 0{,}1 \cdot 6{,}2 = 0{,}62 кГ/см^2 = 0{,}061МПа$$

Допустиме напруження матеріалу при гідравлічному випробуванні посудини повинно задовольняти умову:

$$\sigma = \frac{[4{,}56 + (0{,}01 - 0{,}003)] \cdot 0{,}649}{2 \cdot (0{,}01 - 0{,}003) \cdot 0{,}9} = 35{,}53МПа,$$

що менше $\frac{196{,}2}{1{,}2} = 163{,}5МПа > 35{,}53МПа$

З цього виходить, що міцність стінки ферментатора при гідравлічному випробуванні не порушується.

Визначимо товщину стінки еліптичних днищ:

$$S_{Ц} = \frac{3{,}876 \cdot 0{,}4}{4 \cdot 0{,}087 \cdot 115 \cdot 1 - 0{,}4} \cdot \frac{3{,}876}{2 \cdot 1{,}14} + 0{,}005 = 7{,}1мм = 0{,}0071м$$

Безрозмірний коефіцієнт, який враховує послаблення днища отвором найбільшого діаметра:

$$K = 1 - \frac{d}{D_{вн}} = 1 - \frac{340}{3876} = 0{,}087$$

де d -діаметр лаза в днищі; d=340мм.

Згідно ГОСТ 6533-53 еліптичні днища з внутрішнім діаметром $D_{вн} = 3876мм$ прийняті з мінімальною товщиною стінки 12мм. У зв'язку з цим приймаємо товщину стінки днища $S_{дн} = 12мм$. Товщину циліндричної стінки $S_{Ö}$ ферментатора остаточно приймаємо з урахуванням забезпечення жорсткості конструкції $S_{Ц} = 10мм$.

В днищах і циліндричній частині ферментатора є отвори які не укріплюють накладками, відбортовкою і т.д.

Максимально допустимий діаметр неукріпленого отвору в циліндричній частині не повинен перевищувати розмірів:

$$d_{Ц} = 8{,}1 \cdot \sqrt[3]{D_{вн} \cdot (S_{Ц} - C_{Ц})(1 - K)} = 8{,}1 \cdot \sqrt[3]{3876(10 - 3)(1 - 0{,}242)} = 143{,}4мм$$

Визначимо коефіцієнт К:

$$K = \frac{D_{вн} \cdot p}{(230 \cdot \sigma_{доп} - p)(S_{Ц} - C_{Ц})} = \frac{3876 \cdot 0{,}4}{(230 \cdot 9{,}46 - 0{,}4)(10 - 3)} = 4{,}988$$

де $C_{Ö}$ - надбавка до розрахункової стінки апарата; $C_{Ц} = 3мм$.

В циліндричному корпусі розрахункового апарата всі отвори мають діаметр менший 174мм; з цього можемо зробити висновок, що такий діаметр отвору можна і не укріплювати. Визначимо найбільший допустимий діаметр не укріплюваних отворів в днищах:

$$d_{дн} = 0{,}95 \cdot D_{вн}(1 - K) = 0{,}95 \cdot 3876(1 - 0{,}1194) = 3242{,}54мм$$

Значення коефіцієнта K_1:

$$K_1 = \frac{p}{400 \cdot \sigma_{доп}} \cdot \left[\frac{D_{вн}}{(S_{дн} - C_{дн})} \cdot \frac{D_{вн}}{2 \cdot h_B} - 1 \right] = \frac{0,4}{400 \cdot 9,46} \left[\frac{3876^2}{(12-5) \cdot 2 \cdot 949} - 1 \right] = 0,1194$$

5.2. Розрахунок корпусу ферментатора на зовнішній тиск

Для відводу тепла, що виділяється культурою при розвитку мікроорганізмів, в сорочку подають воду під тиском $0,0981 МПа$. Під тиском корпус може деформуватися. Зробимо перевірочний розрахунок корпуса ферментатора на витримку проти деформацій.

Робочий тиск води в сорочці $p = 0,0981 МПа$ повинен бути менший критичного тиску $p_{КР}$ при якому циліндрична форма посудини стає не стійкою і він деформується. Запас стійкості форми посудини для вертикальних циліндрів приймаємо чотирьохкратним. При робочому надлишковому тиску в сорочці $0,0981 \cdot p_{КР} = 0,0981 \cdot 4 = 0,3924 кГ/см^2$.

Товщина стінки посудини, що піддається зовнішньому тиску:

$$S = r \cdot \sqrt[3]{\frac{p_{КР} \cdot 4 \cdot (1 - \mu^2)}{E}} = 229,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,3924 \cdot 4 \cdot (1 - 0,3^2)}{21000000}} = 2см$$

де r - середній діаметр циліндра; $r = \frac{D_{вн} + 2S}{2} = \frac{458,4}{2} = 229,2см$;

$\mu = 0.3$ - коефіцієнт Пуассона

$E = 2,1 МПа$ - модуль пружності вуглецевої сталі.

Таким чином, прийнята товщина стінки S=1см не забезпечить стійкість форми, саме тому приймемо S=2см.

5.3. Розрахунок зовнішньої стінки сорочки ферментатора

Визначимо товщину сорочки ферментатора:

$$S = \frac{pD}{230 \cdot \sigma_{доп} \cdot \varphi - p} + C = \frac{0,0981 \cdot 4610}{2,3 \cdot 115 \cdot 0,9 - 0,0981} + 3 = 1.9мм = 0,0019м$$

де D - внутрішній діаметр сорочки; D=3918мм.

Для забезпечення жорсткості конструкції приймаємо S=6мм.

Визначимо напруження на стінки сорочки при гідравлічному випробуванні. Пробний гідравлічний тиск для посудини, що працюють під надлишковим тиском до $0{,}49МПа$, $p_Г = 1{,}25 \cdot p_р$, але не менше $0{,}1962МПа$.

З урахуванням стовпця рідини розрахунковий тиск:

$$p_и = p_Г + p_Ж = 0{,}1962 + 0{,}32 = 0{,}2282МПа$$

Гідростатичний тиск стовпця рідини

$$p_Ж = 0{,}1 \cdot H_Ж = 0{,}1 \cdot 3{,}3 = 0{,}33 \, кГ/см^2 = 0{,}032МПа$$

де $H_Ж = 3{,}3м$ - висота стовпця рідини.

Допустиме напруження при гідравлічному випробовуванні повинно задовольняти:

$$\sigma = \frac{[D_{вн} + (S - C)] \cdot p_и}{2(S - C) \cdot \varphi} \le \frac{\sigma_Т}{1{,}2}$$

де S=0,6см - товщина стінки;

$\sigma_Т = 235{,}44МПа$ - межа текучості стали.

Підставимо числові значення:

$$\sigma = \frac{[4{,}61 + (0{,}006 - 0{,}003)] \cdot 0{,}2282}{2(0{,}006 - 0{,}003) \cdot 0{,}9} = 194{,}94МПа$$

Таким чином $\sigma < \frac{235{,}44}{1{,}2} = 196{,}2 > 194{,}94МПа$

Можемо зробити висновок, що гідравлічне випробування не призведе до порушення механічної стійкості стінок ферментатора.

5.4. Розрахунок механічної мішалки ферментатора

Для перемішування середовищ в ферментаторах рекомендують використовувати турбінні мішалки. Діаметр турбінної мішалки згідно нормалі $d_М = (0{,}3 - 0{,}33) \cdot D_{вн} = 0{,}3 \cdot 3876 = 1162мм$. Приймемо $d_М = 1164мм$ Для більш ефективного перемішування приймаємо шестилопатеву турбінну мішалку з діаметром $d_М = 1164мм$.

Для перемішування середовища в'язкістю $\mu = 0{,}00133 ^{H \cdot сек}/_{м^2}$ з рекомендованою коловою швидкістю мішалки $\omega = 7 ^{м}/_{сек}$.

Число обертів мішалки:

$$n = \frac{\omega}{\pi \cdot d_M} = \frac{7}{3{,}14 \cdot 1{,}22} = 1{,}83 ^{об}/_{сек}$$

Приймаємо $n = 2 ^{об}/_{сек} = 120 ^{об}/_{хв}$

Потужність, яку використовує одна мішалка на перемішування середовища без урахування впливу додаткових пристроїв.

$$N_M = K_N \cdot \rho_C \cdot n^3 \cdot d_M^5 = 2{,}53 \cdot 1065 \cdot 2^3 \cdot 1{,}22^5 = 58{,}258 \cdot 10^3 \, Вт$$

де $\rho_C = 1065 ^{кг}/_{м^3}$ - щільність середовища;

n і d_M - число обертів і діаметр мішалки.

Критерій потужності K_N залежить інтенсивності перемішування, що характеризується від центробіжного критерієм Рейнольда: $K_N = f(\mathrm{Re}_Ц)$.

Центробіжний критерій Рейнольда:

$$\mathrm{Re}_Ц = \frac{\rho_C n d_M^2}{\mu_C} = \frac{108{,}5 \cdot 2 \cdot 1{,}22^2}{0{,}000156} = 2070402{,}564$$

З графіку нормалі запишемо:

$$K_N (\frac{g}{n^2 \cdot d_M})^m = 1$$

$$K_N = \frac{1}{(\frac{g}{n^2 \cdot d_M})^m} = \frac{1}{(\frac{9{,}81}{2^2 \cdot 1{,}22})^{-0{,}133}} = 2{,}53$$

Визначимо показник m:

$$m = \frac{a - \lg \mathrm{Re}_Ц}{b} = \frac{1 - \lg 2070402{,}564}{40} = -0{,}133$$

де коефіцієнти a=1 і b=40.

Розрахункова потужність на валу мішалки:

$$N_p = K_1 \cdot K_2 (\sum K + 1) N_M = 1{,}02 \cdot 1{,}1 \cdot (2{,}15 + 1) \cdot 58{,}258 = 205{,}9 кВт$$

Коефіцієнт, що враховує ступінь заповнення апарату переміщуваного середовища:

$$K_1 = \frac{H_Ж}{D_{вн}} = \frac{4,65}{4,56} = 1,02$$

де $H_Æ$ - висота шару рідини, що перемішується, для турбінних мішалок $H_Ж = 0,75H_{АП} = 0,75 \cdot 6,2 = 4,65м$ ($H_{АП} = 6,2м$ - висота апарата).

Для запобігання викиду піни приймаємо $H_Ж = 4м$

Коефіцієнт який враховує збільшення потужності, що використовується в результаті підвищення опору середовища в процесі розвитку культури мікроорганізмів $K_2 = 1,1$.

Суму коефіцієнтів $\sum K$, що враховують збільшення потужності яка використовується, спричинене допоміжними пристроями, які знаходяться в середині апарату приймаємо з табл.. 16.

Чотири відбиваючі перегородки шириною $0,08\,D_{вн}$ розташовані біля стінок апарату до напрямку радіусів, враховують коефіцієнтом $K_П = 1,5$. Додаткова мішалка з таким розміром, що і основна, враховується коефіцієнтом $K_M = 0,35$. Труба для підводу повітря $K_{ТР} = 0,2$; гільза для термометра $K_Г = 0,1$. Таким чином:

$$\sum K = 1,5 + 0,35 + 0,2 + 0,1 = 2,15$$

Визначимо потужність яка необхідна на подолання тертя в сальнику валу:

$$N_C = 2n \cdot d_в^2 \cdot S_C \cdot p \cdot \left(e^{0,1 \cdot \frac{h_C}{S_C}} - 1 \right) = 2 \cdot 2 \cdot 0,08^2 \cdot 0,012 \cdot 0,4 \cdot 10^6 \left(e^{0,1 \cdot \frac{0,072}{0,012}} - 1 \right) = 100,12КВ$$

де n і $d_â$ - число обертів і діаметр валу: $n = 2 об/сек$ та $d_в = 0,08м$;

S_C - товщина набивки сальника: $S_C = 0,012м$;

$ð$ - робочий тиск повітря в апараті над рівнем рідини: $p = 0,4МПа$;

h_C - висота набивки сальника: $h_C = (6-7)S_C$

При визначенні N_C рекомендується приймати $p \le 0{,}00981 МПа$ через можливе підвищення тиску поверх прийнятого при нормальних умовах експлуатації. Для визначення N_C приймаємо $p \le 0{,}0981 МПа$

Діаметр привідного валу мішалки визначимо виходячи з умови міцності на кручення:

$$d_в = 1{,}71 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{КР}}{\tau'_{доп}}} + C = 1{,}71 \cdot \sqrt[3]{\frac{8159{,}78}{70 \cdot 10^6}} + 0{,}003 = 0{,}084 м$$

де C - прибавка на корозію, ерозію і зношення: C=3мм;

$\tau'_{äîï}$ - допустиме напруження на кручення для матеріалу валу: $\tau'_{доп} = 70 МН/м^2$;

Крутний момент на валу мішалки:

$$M_{КР} = 0{,}163 \cdot \frac{N_p}{n} = 0{,}163 \cdot \frac{100120}{2} = 8159{,}78 Н \cdot м$$

де N_p - розрахункова потужність на валу, що передається: $N_p = 100{,}12 \cdot 10^3 Вт$.

Для забезпечення жорсткості приймаємо $d_в = 85 мм$. Частина валу яка розташована вище нижньої турбінки матиме діаметр $d'_в = 90 мм$; частина валу, що розташована вище верхньої турбінки: $d''_в = 95 мм$ при виході через сальник.

Матеріал валу приймаємо Ст. 45. для цього матеріалу межа міцності на розтяг (ГОСТ 1050-60) $\sigma_В = 610 МН/м^2$. Приймемо запас міцності $n_в = 2{,}6$.

Допустиме напруження на розтяг:

$$\sigma_{доп} = \frac{610}{2{,}6} = 234 МПа$$

Допустиме напруження на кручення:

$$\tau_{доп} = 0{,}6\sigma_{доп} = 0{,}6 \cdot 234 = 140 МПа$$

Допустиме напруження для валу перемішувального пристрою:

$$\tau'_{доп} = 0{,}6 \cdot \tau_{доп} = 0{,}6 \cdot 140 = 70 МПа$$

Товщина сальникової набивки:

$$S_C = 0{,}044\sqrt{d''_в} = 0{,}044\sqrt{0{,}095} = 0{,}0136 м = 14 мм$$

де $d''_в = 95 мм$ - діаметр валу.

Розрахункову силу P'_C з якою повинна бути стиснена набивка сальника:

$$P'_C = \pi \cdot (d''_в + S_C) S_C p e^{0{,}04\frac{h_C}{S_C}} = 3{,}14(0{,}095 + 0{,}014) \cdot 0{,}014 \cdot 0{,}4 \cdot 10^6 \cdot e^{0{,}04 \cdot \frac{0{,}072}{0{,}012}} = 2432{,}6 Н$$

де p - допустимий тиск в апараті при стерилізації: $p = 0{,}4 МПа$.

Остаточно необхідна потужність привідного електродвигуна мішалки:

$$N_{заг} = 1{,}15 \cdot \frac{(N_p + N_c)}{\eta} = 1{,}15 \cdot \frac{(100{,}12 + 205{,}9)}{0{,}95} = 50 КВт$$

де η - ККД редуктора привода: $\eta = 0{,}95$.

5.5. Тепловий розрахунок ферментатора

Проведемо вид даного розрахунку для культивування продукту такого як плісняві гриби. Приблизний склад завантаження, який надходить в робочий об'єм ферментатора приведемо в табл.1

Таблиця 1. Кількість продуктів, які завантажуються в ферментатор

Назва	Кількість в кг	
	На 1 $м^3$ об'єму	На 25 $м^3$ об'єму
Мука кукурудзяна	60	1500
Може бути замінена		
а) крохмалем	60	1500
б) солодовими ростками	10	250
Азотно кислотний натрій	9,1	227,5
Хлористий калій	0,5	12,5
Сірчистокислий магній	0,5	12,5
Фосфорно кислотний калій	1,0	25

В перерахунку на цукор підпитувальне середовище, що надходить в ферментатор, при крохмалосності муки $K_{KP} = 68\%$ отримаємо:

а) крохмалу 1500·0,68=1020кг

б) цукру 1,11·1020=1120кг

де 1,11 - перевідний коефіцієнт крохмалу в глюкозу.

В процесі розвитку пліснявих грибів виконується дисиміляція цукрів з виділенням надлишкового тепла:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6H_2O + 6CO_2 + 674ккал$$

5.6. Дозатор для піногасіння

При перемішуванні середовища в ферментатора в період розвитку в ньому мікроорганізмів у багатьох випадках утворюється піна і вона її з апарата. Для запобігання утворення піни в ферментатори вводять рідкі піногасники в кількості 0,8-1кг на $1\,м^3$ середовища. Попередньо піногасники піддають тепловій стерилізації для запобігання занесення інфекції в середовище. Стерилізація і охолодження виконується в окремому апараті, з якого піногасник перепускають в збірник-дозатор.

Використовується також і прилади для механічного гасіння піни в ферментаторах.

При експлуатації установки для вирощування культур в роботі одночасно надходять два ферментатора з об'ємом V_p по $60\,м^3$; витрати піногасника $b = 1\,л/(м^3 \cdot ч)$. Піногасник підготовлюють один раз на добу.

Погодинна витрата масла на піногасіння при одночасній роботі двох ферментаторів

$$V_{M.Ч} = \frac{2 \cdot V_p \cdot b}{24} = \frac{2 \cdot 150 \cdot 1}{24} = 12{,}5\,л/ч$$

Добова витрата масла для піногасіння

$$V_{M.Сут} = 24V_{M.Ч} = 24 \cdot 12{,}5 = 300л = 0{,}3\,м^3/добу$$

Повний об’єм дозатора для піногасника приймаємо з розрахунку вмісту в ньому добової необхідності при коефіцієнті заповнення 0,7:

$$V_Д = \frac{V_{М.Сут}}{0,7} = \frac{300}{0,7} = 428,6л$$

Для стерилізації масла приймаємо мірник стальний зі змійовиком об’ємом 429л (ГОСТ 8932-58).

Внутрішній діаметр дозатора $D_{вн} = 600мм$. Висота його Н=670мм. Днище сферичне. Кришка знімна.

Стерилізація масла виконується шляхом нагріву його від $t'_М = 15$ до $t''_М = 130^0 C$ парою ($p = 0,4МПа$) через змійовик з трубок діаметром 55/51мм.

Кількість тепла, яка витрачається на стерилізацію добової необхідності піногасника (масла)

$$Q_М = 1,03\left[V_{М.Сут} \cdot \rho \cdot c(t''_М - t'_М)\right] = 1,03\left[0,3 \cdot 910 \cdot 2,093 \cdot (130 - 15)\right] = 67,681КДж$$

де ρ - щільність $\rho = 910 кг/м^3$;

с - теплоємність масла с=2093 $дж/(кг \cdot град)$.

1,03 - коефіцієнт, що враховує втрати тепла стерилізатором в зовнішнє простір.

Витрата пари на стерилізацію масла:

$$G_П = \frac{Q_М}{(I_П - I_к)} = \frac{67681}{654,9 - 142,9} = 132,19кг$$

де $I_Ї$ - ентальпія насиченої пари; при $p = 0,4МПа$

$I_П = 654,9 ккал/кг$

$I_К$ - ентальпія конденсату пари; при $p = 0,4МПа$

$I_К = 142,9 ккал/кг$

Об'ємна витрати пара на стерилізацію

$$V_П = G_П V' = 132,19 \cdot 0,4718 = 62,37м^3$$

де V' - питомий об’єм пари: $p = 0,4МПа$ $V' = 0,4718 ккал/кг$.

Коефіцієнт тепловіддачі віл пари що конденсується до стінки стального змійовика визначимо:

$$\alpha_1 = 0{,}725 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho \cdot r \cdot g}{\nu \cdot d \cdot \Delta t_{ср}}} = 0{,}725 \cdot \sqrt[4]{\frac{2140 \cdot 10^3 \cdot 927{,}7 \cdot 0{,}685^3 \cdot 9{,}81}{0{,}215 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}051 \cdot 7{,}9}} = 11886{,}93 \; Вт/(м^2 \cdot град)$$

де $\lambda = 0{,}685 \; Вт/(м \cdot град)$ - коефіцієнт теплопровідності конденсату пари.

При середній температурі плівки конденсату в змійовику

$$t_{пл} = \frac{t_{ст} + t_{нас}}{2} = \frac{135 + 142{,}9}{2} \approx 138^0 C$$

де $t_{ст}$ - температура стінки змійовика, на якій конденсується пара; приймаємо $t_{ст} = 135^0 C$;

$t_{нас}$ - температура конденсату граючої пари; при $p = 0{,}4 МПа$ $t_{нас} = 142{,}9^0 C$

ρ - щільність плівки конденсату; при $t_{пл} = 138^0 C$ $\rho = 927{,}7 \; кг/м^3$.

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості конденсату, при $t_{пл} = 138^0 C$

$$\mu = 0{,}00002035 \; кГ \cdot сек/м^2 = 0{,}2035 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}81 = 0{,}1995 \cdot 10^{-3} \; (Н \cdot сек)/м^2$$

r - теплота конденсації пари; при $p = 0{,}4 МПа$ $r = 2140 \; КДж/кг$

d - внутрішній діаметр трубки змійовика, в якому конденсується пари; $d = 0{,}051 м$

Δt - різниця температур конденсату і стінки, на якій конденсується пара:

$$\Delta t = 142{,}9 - 135 = 7{,}9 град$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0{,}1995 \cdot 10^{-3}}{927{,}7} = 0{,}215 \cdot 10^{-6} \; м^2/сек$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки змійовика до маслу:

$$\alpha_2 = C \cdot \mathrm{Re}^n \, \mathrm{Pr}^{0{,}4} = 0{,}715 \cdot 1471{,}71^{0{,}46} \cdot 30{,}6^{0{,}4} = 80{,}5 \; ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град) =$$

$$= 80{,}5 \cdot 1{,}163 = 93{,}62 \; Вт/(м^2 \cdot град)$$

де C і n - константи, які залежать от значення Re.

Критерій Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d \cdot \gamma}{\mu \cdot g} = \frac{0{,}075 \cdot 0{,}055 \cdot 910}{0{,}00026 \cdot 9{,}81} = 1471{,}71$$

де ω - швидкість руху нагріваємо масла в апараті; орієнтовно приймаємо $\omega = 0{,}075 \, {}^{м}/_{сек}$;

d - зовнішній діаметр трубок змійовика; $d = 0{,}055 м$

γ - удільна вага масла; при $t_{ср} = \frac{130+15}{2} = 72{,}5^0 C$; $\gamma = 910 \, {}^{кГ}/_{м^3}$

ρ - щільність $\rho = 910 \, {}^{кг}/_{м^3}$;

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості масла; при середній температурі $72{,}5^0 C$ $\mu = 0{,}00026 \, {}^{кГ \cdot сек}/_{м^2} = 0{,}00255 \, {}^{(Н \cdot сек)}/_{м^2}$

Критерій Прандтля :

$$\mathrm{Pr} = \frac{3600 \cdot \mu \cdot c \cdot g}{\lambda} = \frac{3600 \cdot 0{,}00026 \cdot 0{,}5 \cdot 9{,}81}{0{,}15} = 30{,}6$$

де с - теплоємність масла; при $t_{ср} = 72{,}5^0 C$, $c = 0{,}5 \, {}^{ккал}/_{(кг \cdot град)} = 2098 \, {}^{Дж}/_{(кг \cdot град)}$

λ - коефіцієнт теплопровідності масла; $\lambda = 0{,}1745 \, {}^{Вт}/_{(м \cdot град)}$

Коефіцієнт теплопередача от пара к маслу визначимо:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{11886{,}93} + \frac{0{,}002}{58{,}15} + \frac{1}{93{,}62}} = 92{,}59 \, {}^{Вт}/_{(м^2 \cdot град)}$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності стінки змійовика (сталі). $\lambda_{ст} = 58{,}15 \, {}^{Вт}/_{(м \cdot град)}$.

Визначимо поверхня нагріву змійовика:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{37600}{55{,}9 \cdot 50} = 13{,}45 м^2$$

де Q - кількість тепла, яка передається маслу від стінки змійовики при умові, що нагрів проводиться на протязі 0,5ч.

$$Q = \frac{67681}{0,5 \cdot 3600} = 37600 КВт$$

Середня логарифмічна різниця температур

$$\Delta t_{ср} = \frac{(t_{нас} - t'_м) - (t_{нас} - t''_м)}{2,31 \lg\left(\frac{t_{нас} - t'_м}{t_{нас} - t''_м}\right)} = \frac{(58-15) - (142,9-130)}{2,31 \lg\left(\frac{142,9-15}{142,9-130}\right)} = 170 град$$

При діаметрі змійовика $d = 0,055 м$ довжина труб змійовика

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d} = \frac{13,45}{3,14 \cdot 0,055} = 77,88 м$$

При діаметрі змійовика $D = 0,55 м$ число витків змійовика

$$n = \frac{L}{\pi \cdot D} = \frac{77,88}{3,14 \cdot 0,55} = 45 \text{ витка}$$

Приймаємо $n = 45$ витка. Тоді поверхня нагріву змійовика

$$F_З = \pi^2 dDn = 3,14 \cdot 0,055 \cdot 3,14 \cdot 0,55 \cdot 32 = 9,54 м^2$$

Простерилізоване масло охолоджують на протязі 30 хвилин в самому стерилізаторі до $35^0 C$ шляхом подачі в змійовик води. Кількість тепла яка відводиться водою, з урахуванням 3% втрат на тепловипромінювання.

$$Q' = \frac{100-3}{100} \cdot V_{М.сут} \cdot \rho \cdot c \cdot (t''_М - t_2) = 0,97 \cdot 0,05 \cdot 910 \cdot 2,093(130-35) = 8776 КДж$$

Витрата води на охолодження масла:

$$G_В = \frac{Q'}{(t_2 - t_1)c} = \frac{8776}{(25-15) \cdot 4,186} = 210 кг$$

де t_1 і t_2 - температура води при вході в змійовик і при виході із змійовика; $t_1 = 15$ і $t_2 = 25^0 C$

Коефіцієнт тепловіддачі від масла до стінки змійовики α_1, що визначається по тій же формулі, що і коефіцієнт тепловіддачі від і коефіцієнт тепловіддачі від стінки змійовика до масла α_2:

$$\alpha_1 = C \operatorname{Re}^n \operatorname{Pr}^{0,4} = 0,715 \cdot 1471,71^{0,46} \cdot 30,6^{0,4} \cdot 1,163 = 93,62 \, Вт / (м^2 \cdot град)$$

Значення констант С і n приймаємо з таблиці 18 в залежності від значення Re:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d \cdot \gamma}{\mu \cdot g} = \frac{0{,}075 \cdot 0{,}055 \cdot 910}{0{,}00026 \cdot 9{,}81} = 1471{,}71$$

де μ - коефіцієнт динамічної в'язкості масла; при середній температурі $72{,}5^0 C$ $\mu = 0{,}00026 {кГ \cdot сек}/{м^2}$

Критерій Прандтля:

$$\mathrm{Pr} = \frac{3600 \cdot \mu \cdot c \cdot g}{\lambda} = \frac{3600 \cdot 0{,}00026 \cdot 0{,}5 \cdot 9{,}81}{0{,}15} = 30{,}6$$

Визначимо значення Re при русі охолоджувальної води в змійовику:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d \cdot \gamma}{\mu \cdot g} = \frac{0{,}57 \cdot 0{,}051 \cdot 998}{0{,}000102 \cdot 9{,}81} = 29148{,}59$$

$2300 < \mathrm{Re} < 10000$ згідно. Режим руху води в змійовику -турбулентний. Швидкість руху води в змійовику:

$$\omega = \frac{G_B}{\rho \cdot f \cdot 3600} = \frac{420}{998 \cdot 0{,}000204 \cdot 3600} = 0{,}57 {м}/{сек}$$

де G_B - годинна витрата води для охолодження води: $G_B = 210 \cdot 2 = 420 {кг}/{год}$

μ - динамічна в'язкість охолоджувальної води при середній температурі $20^0 C$; $\mu = 0{,}000102 {кГ \cdot сек}/{м^2}$

ρ - щільність води; при середній температурі $t_{ср} = \frac{25+15}{2} = 20^0 C$

$\rho = 998 {кг}/{м^3}$;

Поперечний переріз трубок змійовика при внутрішньому діаметрі трубки $d = 0{,}051 м$

$$f = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}051^2}{4} = 0{,}00204 м^2$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки змійовика до охолоджувальної води для перехідного режиму руху:

$$Nu = K_0 \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}43} \left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_{CY}} \right)^{0{,}25} = 23{,}25 \cdot 7{,}07^{0{,}43} \cdot \left(\frac{7{,}07}{2{,}38} \right)^{0{,}25} = 70{,}6$$

де K_0 - коефіцієнт який враховує вплив на коефіцієнт тепловіддачі комплексу факторів; $K_0 = f(\text{Re})$; приймаємо при Re=29148,6; $K_0 = 23{,}25$.

Критерій Прандтля охолоджувальної води при середній температурі $20^0 C$

$$\text{Pr} = \frac{3600 \cdot \mu \cdot c \cdot g}{\lambda} = \frac{3600 \cdot 0{,}000102 \cdot 1{,}004 \cdot 9{,}81}{0{,}515} = 7{,}07$$

де μ - динамічна в'язкість охолоджувальної води при середній температурі $20^0 C$; $\mu = 0{,}000102 \, кГ \cdot сек / м^2$

с - теплоємність води; при $t_{ср} = 20^0 C$

λ - коефіцієнт теплопровідності води; при температурі $t_{ср} = 20^0 C$ $\lambda = 0{,}515 \, ккал / (м \cdot ч \cdot град)$

Середня температура охолоджувального масла:

$$t_{м.ср} = \frac{130 + 35}{2} = 82{,}5^0 C$$

Середня температура стінки змійовика зі сторони масла $75^0 C$. Температура стінки змійовика зі сторони охолоджувальної води:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{55}{51} < 2$$

де d_1 і d_2 - зовнішній і внутрішній діаметр трубки змійовика; $d_1 = 55$ і $d_2 = 51 мм$.

При цих умовах кривизна стінки має незначний вплив на тепловий потік і їм можна знехтувати.

Питомий тепловий потік через стінку змійовика:

$$q = \frac{2Q}{F} = \frac{2 \cdot 8776}{13{,}45} = 1305 \, Вт / м^2$$

де Q - кількість тепла, що передається через поверхню.

F - поверхня змійовика, через яку передається тепло.

Так як питомий тепловий потік через стінку змійовика:

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2)$$

то температура стінки зі сторони води:

$$t_2 = t_1 - \frac{q\delta}{\lambda} = 75 - \frac{1305 \cdot 0{,}002}{58{,}15} = 45^0 C$$

де t_1 - температура стінки змійовика зі сторони масла.

δ - товщина стінки змійовика.

Значення критерія Прандтля для води при $t_2 = 45^0 C$

$$\Pr = \frac{3600 \cdot \mu \cdot c \cdot g}{\lambda} = \frac{3600 \cdot 0{,}0000389 \cdot 1{,}0065 \cdot 9{,}81}{0{,}577} = 2{,}38$$

З отриманого значення Nu визначимо коефіцієнт тепловіддачі від стінки до охолоджувальної води:

$$Nu = \frac{\alpha_2 d}{\lambda}$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{70{,}6 \cdot 0{,}598}{0{,}051} = 827{,}82 \, Bm \Big/ \left(м^2 \cdot град\right)$$

Поправочний коефіцієнт, що уточнює вплив кривизни труби. По якій протікає охолоджувальна вода:

$$\varepsilon = 1 + 1{,}77 \cdot \frac{d}{R} = 1 + 1{,}77 \cdot \frac{0{,}055}{0{,}55} = 1{,}177$$

де d I R - зовнішній діаметр трубки змійовика і радіус змійовика по осьовій лініій.

З урахуванням поправки коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_2' = \varepsilon \cdot \alpha_2 = 1{,}177 \cdot 827{,}82 = 974{,}3 \, Bm \Big/ \left(м^2 \cdot град\right)$$

Потрібна поверхня для охолодження піногасника на протязі 0,5год

$$F = \frac{2Q}{k \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{2 \cdot 2100}{54{,}5 \cdot 51} = 1{,}51 м^2$$

Розрахункова поверхня змійовика, що забезпечує нагрівання масла, $2{,}05 і^{\,2}$ забезпечує також охолодження його на протязі 30хв.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{93,62} + \frac{0,002}{50} + \frac{1}{827,82}} = 83,83 \, ккал / \left(м^2 \cdot ч \cdot град \right)$$

Сере дня логарифмічна різниця температур:

$$\Delta t_{ср} = \frac{(130 - 25) - (35 - 15)}{2,3 \lg \frac{130 - 25}{35 - 15}} = 51 град$$

РОЗДІЛ 6.
ВИБІР КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Умови біотехнологічних та фармацевтичних виробництв є досить специфічні, а саме робота з корозійно-активними поживними середовищами, регулярна дія гострої насиченої пари під час стерилізації (135 °C, тиск до 0.3 - 0.4 МПа), застосування агресивних миючих і дезінфікуючих розчинів (кислотна та лужна CIP-мийка), а також високі швидкості потоків рідини біля лопатей мішалки - висувають підвищені вимоги до вибору конструкційних матеріалів технологічного обладнання.

При виборі матеріалу для елементів ферментатора, що безпосередньо контактують із робочим середовищем, було враховано такі ключові критерії:

- **Біологічна інертність та токсикологічна безпека:** матеріал не повинен виділяти в середовище іони важких металів чи інші токсичні сполуки, які можуть пригнічувати ріст культури мікроорганізмів або забруднювати цільовий продукт. Матеріал має бути дозволений органами охорони здоров'я для використання у фармацевтичній промисловості.
- **Корозійна та хімічна стійкість:** висока опірність точковій (пітинговій), міжкристалітній та загальній корозії під дією органічних кислот, солей поживного середовища, а також дезінфектантів.
- **Термічна та механічна міцність:** збереження механічних властивостей (границі міцності, текучості) при циклічних температурних коливаннях під час стерилізації та охолодження, а також опірність втомі під дією знакозмінних навантажень від роботи перемішуючого пристрою.
- **Економічна доцільність:** баланс між вартістю матеріалу, його технологічністю (придатністю до зварювання, вальцювання, полірування) та тривалістю безвідмовної експлуатації апарата.

Обґрунтування вибору матеріалів для основних вузлів

Враховуючи великий об'єм ферментатора (V = 60 м^3) та високі технологічні навантаження, для виготовлення елементів конструкції обрано такі матеріали:

Елемент конструкції	Обраний матеріал	Обґрунтування вибору
Обечайка корпусу, еліптичні днище та кришка	Двошарова сталь **ВСт3сп5 + 12Х18Н10Т** (або аналог AISI 321)	Дозволяє суттєво знизити вартість апарата великої місткості. Основний шар (сталь ВСт3сп5) забезпечує механічну міцність під тиском, а внутрішній плакувальний шар (12Х18Н10Т) - високу корозійну стійкість у контакті з біосередовищем.
Внутрішні пристрої (пустотілий вал, лопаті мішалки, барботер, відбійні пластини)	Високолегована аустенітна сталь **12Х18Н10Т** (або **08Х18Н10Т**)	Забезпечує тривалу корозійну стійкість в умовах інтенсивної гідродинаміки та кавітації. Титан у складі сталі запобігає міжкристалітній корозії в зоні зварних швів.
Зовнішня теплообмінна сорочка	Вуглецева сталь високої якості **Сталь 20** або **ВСт3сп5**	Оскільки сорочка контактує лише з технічною охолоджувальною водою або парою, використання дорогої нержавіючої сталі є економічно недоцільним.
Ущільнювальні елементи	**Фторопласт-4 (PTFE)** або	Мають абсолютну хімічну інертність, витримують

(прокладки фланців, люків)	термостійка силіконова гума	багаторазову стерилізацію парою при 135 -140 °С без втрати еластичності.
Сальникова набивка	Графлекс (терморозширений графіт) або фторопластовий шнур	Забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя об вал, високу герметичність за умов тиску 0,2-0,3 МПа та стійкість до стирання.

Технологічні вимоги до виготовлення апарата

До конструкції ферментатора висуваються критично високі вимоги щодо герметичності й чистоти поверхонь, оскільки будь-яка мікрощілина може стати джерелом сторонньої інфекції (контамінації):

1. **Вимоги до зварювання:** Усі зварні шви внутрішнього корпусу, що контактують із середовищем, повинні бути виконані двостороннім зварюванням, бути суцільнощільними і підлягати 100% радіографічному або ультразвуковому контролю. Наявність пор, раковин чи шлакових включень не допускається.

2. **Якість поверхонь:** Внутрішні поверхні корпусу та мішалки піддаються ретельному шліфуванню та дзеркальному поліруванню до шорсткості не менше 0,4-0,6 мкм. Це виключає налипання біомаси та полегшує мийку й стерилізацію.

3. **Контроль щільності:** Апарат виготовляється та випробується відповідно до вимог чинних нормативних документів (Правила будови та безпечної експлуатації судин, що працюють під тиском). Перед введенням в експлуатацію корпус проходить гідравлічне випробування на міцність та пневматичне випробування із шукачами витоків на герметичність сальникових, фланцевих з'єднань і люків. Поява вологи або падіння тиску категорично заборонені.

РОЗДІЛ 7.
ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ ТИПУ «КРИШКА»

Для розробки технологічного маршруту була обрана деталь типу «Кришка».

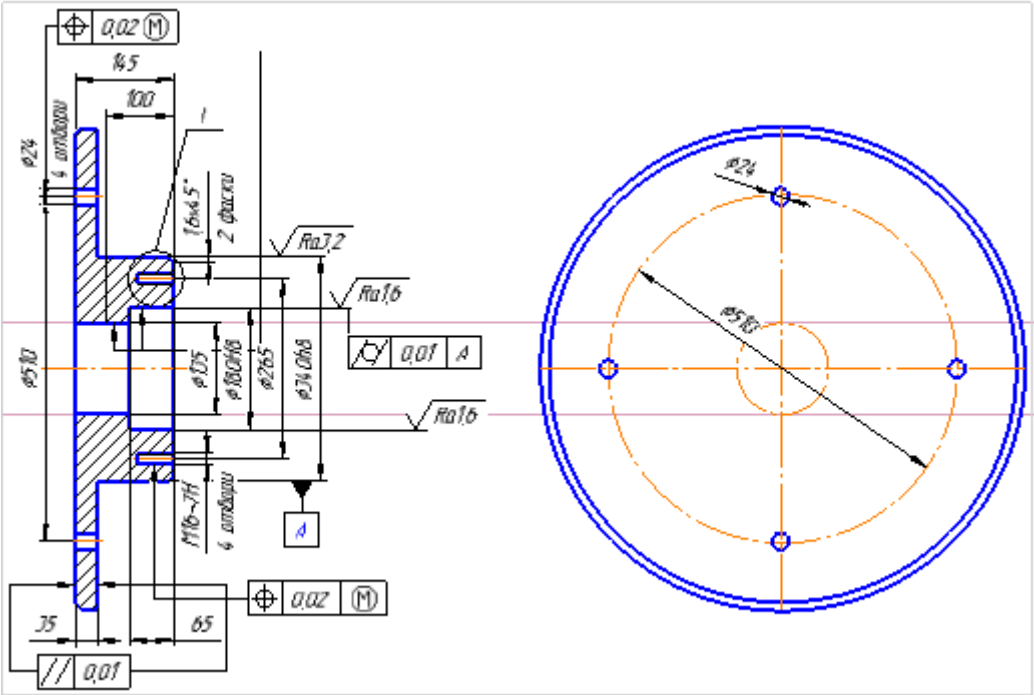


Рис. 7.1. Загальний вид деталі

Технологічний маршрут виготовлення деталі типу «Кришка»

Номер операції, переходу	Назва операції, переходу	Технологічне обладнання, пристроїв, інструмент оброблювальний, контрольний
10	Заготівельна	Лиття в землю Сталь 45Л ГОСТ 1050-74
20	Токарна установити, закріпити, зняти (У33)	Токарно-гвинторізний верстат 16К40 трикулачковий патрон

20.1	Торцювати пов.1	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45̊, γ = 10̊, α = 8̊; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
20.2	Точити пов.2 на l=37,5мм, начорно ∅710	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45̊, γ = 10̊, α = 8̊; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
20.3	Точити пов.2 на l=37,5мм, начисто ∅710	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45̊, γ = 10̊, α = 8̊; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
20.4	Зняти фаску 1,6х45 пов. 3 Свердлити отвір під ∅135	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45̊, γ = 10̊, α = 8̊; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1 Свердло ∅135
30	Токарна У33	Токарно-гвинторізний верстат 16К30 трикулачковий патрон
30.1	Торцювати пов.1 начорно	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45̊, γ = 10̊, α = 8̊; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
30.2	Точити пов.2 на l=110мм, начорно ∅340	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45̊, γ = 10̊, α = 8̊; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
30.3	Розточити пов.4 на l=∅135 Розточити пов.4 на l=35мм, начорно ∅135	Різець розточувальний для глухих отворів , Т15К6 ,В*Н*L=16*16*140мм ШЦ1 Різець розточувальний для глухих отворів , Т15К6, В*Н*L=16*16*140мм ШЦ1
40	Свердлильна У33	Вертикально - свердлильний верстат 2А15 Кондуктор
40.1	Свердлити 4 отвори	Свердло ∅10 Р6М5

	під ∅24Н10 пов.1	
40.2	Свердлити 4 отвори під ∅24Н10 пов.1	Свердло ∅24 Р6М5
50	Токарна У33	Токарно-гвинторізний верстат 16К40 спеціальний пристрій
50.1	Торцювати пов.1 Начисто ∅710	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45°, γ = 10°, α = 8°; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
50.2	Торцювати пов.2 L=145 340	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45°, γ = 10°, α = 8°; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
50.3	Точити пов.3 на l=110мм, начисто ∅340	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45°, γ = 10°, α = 8°; В*Н*L = 16*25*140мм ШЦ1
50.4	Розточити пов. 4 на l=35мм, начорно ∅135Н7	Різець розточувальний для глухих оторів, Т15К6, В*Н*L = 16*16*140мм ШЦ1
50.5	Розточити пов. 4 на l=35мм, начорно ∅135Н7	Різець розточувальний для глухих оторів, Т15К6, В*Н*L = 16*16*140мм ШЦ1
50.6	Розточити пов. 5 на l=65мм, начорно ∅180Н8	Різець розточувальний для глухих оторів, Т15К6, В*Н*L = 16*16*140мм ШЦ1
50.7	Розточити пов. 5 на l=65мм, начисто ∅180Н8	Різець розточувальний для глухих оторів, Т15К6, В*Н*L = 16*16*140мм калібр пробки
50.8	Зняти фаску 1,6х45 пов. 6	Різець прохідний відвігнутий правий, Т15К6, φ = 45°, γ = 10°, α = 8°;

		B*H*L = 16*25*140мм ШЦ1
60	Свердлильна УЗЗ	Вертикально - свердлильний верстат 2А15 Кондуктор
60.1	Свердлити 4 отвори під ∅14М16 пов.1	Свердло ∅15,5 Р6М5 ШЦ1
60.2	Нарізати різьбу М16-7Н L=40мм	Метчик М16-7Н Р6М5 Різьбовий калібр пробки

Розрахунок припусків

Розрмір, за яким ведемо розрахунок - ⌀ 135 Н7

Поверзня обробляється чистовим та чорновим точінням

1.Припуск на чистове точіння

$$Z_{2min} = R_{z1} + D_1 + \sqrt{T_{пр1}^2 + \mathcal{E}_{y2}^2}$$

$R_{z1} = 20$мкм - *висота мікронерівностей*

$D_1 = 40$ мкм -*глибина дефективного шару*

$T_{пр1} = 100$мкм - сумарне значення просторових похибок

$\mathcal{E}_{y2} = 100$ мкм - похибка установлення деталі

$$Z_{2min} = R_{z1} + D_1 + \sqrt{T_{пр1}^2 + \mathcal{E}_{y2}^2} \quad z_{2min=201.421}$$

$$Z_{2max} = Z_{2min} + T_1 - T_2$$

$$T_1 = IT10 \quad T_1 = 84 \text{ мкм}$$

$$T_2 = IT8 \quad T_2 = 33 \text{ мкм}$$

$$Z_{2max} = Z_{2min} + T_1 - T_2 \quad Z_{2max} = 252.421 \text{ мкм}$$

$$Z_{2ном} = \frac{Z_{2max}+Z_{2min}}{2} \quad Z_{2ном} = 226.921 \text{ мкм}$$

2. Припуск на чорнове точіння

$$Z_{1min} = R_{z0} + D_0 + \sqrt{T_{пр0}^2 + \mathcal{E}_{y1}^2} \quad Z_{1min} = 1.615 * 10^3 \text{ мкм}$$

$$Z_{сум} = Z_{2ном} + Z_{1min} \quad Z_{сум} = 1.842 * 10^3 \text{ мкм}$$

Приймаємо сумарний припуск

$$Z_{сум} = 2000 \text{ мкм} \quad Z_{сум} = 2.0 \text{ мм}$$

Розрахунок режимів різання

20.Токарна Операція

Перехід 20.1

Торцювати пов.1

$D_{заг} = 710$ мм

1.Глибина різання

t=2.0 мм

2.Вибираємо подачу з рекомендованого діапазона 0,2-0,5 мм/об , узгоджуючи з паспортними даними верстата 16К20

$S_B = 0.5 \frac{мм}{об}$

3.Обираємо залежність для визначення швидкості різання і вихначаємо емпіричну швидкість різання

$C_v = 270$ - коефіцієнт , що враховує умови різання

T=120 хв - період стійкості інструмента

$$V = \frac{C_v}{T^{0.1} * t^{0.15} * S_B^{0.35}} \quad V=192.155 \frac{мм}{хв}$$

4. Частота обертання шпинделя розрахункова

$$n_р = \frac{1000 * V}{\pi * D_{заг}} \quad n_p = 86.191 \frac{об}{хв}$$

5. Узгоджуємо обертання шпинделя з паспортними даними верстата

$n_B = 100 \frac{об}{хв}$

6.Фактична швидкість різання

$$V_д = \frac{\pi * D_{заг} * n_B}{1000} \quad V_д = 223.94 \frac{м}{хв}$$

7.Довжина обробки

$L_д = 41$ мм

8.Основний час

$$t_{02} = \frac{L_д}{n_R * S_R} \qquad t_{02} = 0.82 \text{ хв}$$

9.Допоміжний час

$t_{д2} = 0.7$ *хв*

10. Час виконання перехода

$$T_{оп2} = t_{02} + t_{д2} \quad T_{оп2} = 1.52 \text{ хв}$$

Перехід 20.4

Зняти фаску 1,6*45°

Визначаємо основний час на виконання переходу за розміром фаски і беремо цей час операційний :

$t_{\circ} = 0.2$ хв

Загальний операційний час

$T_{заг} = 9.106 + 1.665 + 1.624 + 0.2$

$T_{заг} = 12.595$ хв

Час обслуговування робочого місця , перерви ,відпочинок і природні потреби

$$T_{об_пп} = \frac{2.5 + 4.0 + T_{заг}}{100} = 0.529 \text{ хв}$$

Штучний час

$$T_{шт} = T_{заг} + T_{об\ пп} = 13.124 \text{ хв}$$

Підготовчо - завершу вальний час

$T_{пз} = 17$ хв

Кількість деталей у серії

$n_c = 500$ шт/зміну

Калькуляційний час

$$T_к = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n_c} = 13.158 \text{ хв}$$

Норма виробітку за 1 год

$$N = \frac{60}{T_к} = 4.56 \text{ шт}$$

Приймаємо

30. Токарна операція

Перехід 30.1

Торцювати пов.1

$D_{заг} = 340$ мм

1.Глибина різання

t=2.0 мм

2.Вибираємо подачу рекомендованого діапазона 0,2-0,5 мм/об , узгоджуючи З паспортними даними верстата 16К20

S_B=0.5 $\frac{мм}{об}$

3.Обираємо залежність для визначення швидкості різання і визначаємо емпіричну швидкість різання

$C_v = 270$ - коефіцієнт , що враховує умови різання

T=120 хв період стійкості інструмента

$$V = \frac{C_v}{T^{0.1} * t^{0.15} * S_B^{0.35}} = 192.155 \ \frac{мм}{хв}$$

4. Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата

$$n_p = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_{заг}} = 179.897 \ \frac{об}{хв}$$

6. За прийнятими значенням визначаємо фактичну швидкість різання :

$$V_ф = \frac{\pi \cdot D_{заг} \cdot n_в}{1000} = 192.265 \ \frac{м}{хв}$$

7.Довжина обробки

$L_д = 174$ мм

8. Основний час

$$t_{01} = \frac{L_д}{n_B * S_B} = 0.856$$

*9.*Допоміжний час

$t_{д1} = 0.4$ хв

10. Час перехода

$$T_{оп1} = t_{01} + t_{д1} = 1.256 \text{ хв}$$

40. Свердлильна операція

Перехід 40.1 свердлити 4 отвори ⌀10 $d_{св} = 10$ мм

1.глибина різання

$t = \frac{d_{св}}{2} = 5$ мм

*2.*Обираємо подач , узгоджуючи з паспортними даними верстата

S=0.15 $\frac{мм}{об}$

*3.*Обираємо залежність для визначення швидкості різання і визначаємо швидкості різання

T=25 хв

$$V=\frac{12.1*d_{св}^{0.3}}{T^{0.6}*t^{0.2}*S^{0.65}} = 8.705 \frac{м}{хв}$$

4.розрахункова частота обертання шпинделя

$$n=\frac{1000*V}{\pi*d_{св}} = 277.088 \frac{м}{хв}$$

Узгоджуємо частоту обертання шпинделя з паспортними даними верстата

n=260 $\frac{об}{хв}$

5. дійсна швидкість обертання шпинделя

$$V_д = \frac{\pi*d_{св}*}{1000} = 8.168 \frac{м}{хв}$$

*6.*Довжина обробки

$L_{д=41}$ *мм*

7. Основний час виконання перехода

$t_0 = \frac{L_д}{n*S} = 1.051$ *мм*

8. Допоміжний час

$t_{д1} = 0.3$ хв

*9.*Операційний час

$$T_{оп} = 4 * (t_0 + t_{д1}) = 5.405 \, хв$$

перехід 40.2 свеодлити 4 отір ⌀ 24 $d_{св} = 24$ мм

1. Глибина різання

$$t = \frac{d_{св}}{2} = \frac{24-10}{2} = 7 \text{ мм}$$

2. Обираємо подачу ,узгоджуючи даними верстата

$S=0.15 \frac{мм}{об}$

3.Обираємо залежність для визначення швидкості різання і визначаємо швидкість різання T=25 хв

$$V=\frac{12.1*d_{св}^{0.3}}{T^{0.6}*t^{0.2}*S^{0.65}} = 9.501 \frac{м}{хв}$$

4.розрахнкова частота обертання шпинделя

$$n=\frac{1000*V}{\pi*d_{св}} = 126.017 \frac{об}{хв}$$

Узгоджуємо частоту обертання шпинделя з паспортними даними верстата n=120 хв

5.Дійсна швидкість обертання шпинделя

$$V_д=\frac{\pi*d_{св}*n}{1000} = 9.048 \frac{м}{хв}$$

6. Довжина обробки

$L_д = 41$ мм

7. Основний час виконання перехода

$$t_0 = \frac{L_д}{n*S} = 2.278 \text{ мм}$$

8. Допоміжний час

$t_{д1} = 0.3$ *хв*

9. Операційний час

$$T_{оп} = 4 * (t_0 + t_{д1}) = 10.311 \text{ хв}$$

Час обертання робочого місця , перерви , відпочинок і природні потреби

$$T_{об_пп} = \frac{1.5+6.0*15.716}{100} = 0.958 \text{ хв}$$

Штучний час

$$T_{шт} = 15.716 + T_{об\ пп} = 16.674 \text{ хв}$$

Підготовчо – завершувальний час

$T_{пз} = 4$ хв

Кількість деталей у серії

$n_c = 100$ шт/зміна

Калькуляційний час

$$T_к = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n_c} = 16.714 \text{ хв}$$

Норма аиробітку за 1 год

$$N = \frac{60}{T_к} = 3.59 \text{ шт}$$

Приймаємо N=3 шт

50. Токарна операція

Перехід 50.1

Торцювати пов.1

$D_{заг} = 340$ мм

1. Глибина різання

   t=2.0 мм

2. Вибираємо подачу з рекомендованого діапазона 0,2-0,5 мм/об , узгоджуючи з паспортними даними верстата 16К20

   $S_B = 0.5 \frac{мм}{об}$

3. Обираємо залежність для визначення швидкості різання і визначаємо емпіричну швидкість різання

   $C_v = 270$ - коефіцієнт , що враховує умови різання

   $T = 120$ хв - період стійкості інструмента

   $$V = \frac{C_v}{T^{0.1} + t^{0.15} + S_B^{0.35}} = 192.155 \frac{м}{хв}$$

4. Частота обертання шпинделя

   $$n_p = \frac{1000 * V}{\pi * D_{заг}} = 179.897 \frac{об}{хв}$$

5.Узгоджуємо частоту обертання шпинделя з паспортними даними верстата $n_B = 180 \frac{об}{хв}$

6.Фактична швидкість різання

$$V_д = \frac{\pi * D_{заг}}{1000} = 192.265 \frac{м}{хв}$$

7.Довжина обробки

$L_д = 174$ мм

8.Основний час

$t_{01} = \frac{L_д}{n_B * S_B} = 0.856$ хв

9. Допоміжний час

$t_{д1} = 0.4$ *хв*

*10.*Час виконання перехода

$$T_{оп1} = t_{01} + t_{д1} = 1.256 \text{ хв}$$

Перехід 50.4

Розпочати заготовку пов.4 начорно

$D_{заг} = 135$ мм

1.Глибина різання

t=1.5 мм

2.Вибираємо подачу з рекомендованого діапазона 0,2-0,5 мм/об , узгоджуючи з паспортними даними верстата 16К20

$S_B = 0.5 \frac{мм}{об}$

3.Обираємо залежність для визначення швидкості різання і визначаємо емпіричну швидкість різання

$C_v = 270$ - коефіцієнт , що враховує умови різання

T=120 хв - період стійкості інструмента

$V = \frac{C_v}{T^{0.1} + t^{0.15} + S_B^{0.35}} = 200.628 \frac{м}{хв}$

4.Частота обертання шпинделя з паспортними данними верстата

$$n_p = \frac{1000*V}{\pi*D_{заг}} = 473.052 \frac{об}{хв}$$

5.Узгоджуємо частоту обертання шпинделя з паспортними данними верстата

$$n_B = 450 \frac{об}{хв}$$

6.Фактична швидкість різання

$$V_д = \frac{\pi*D_{заг}*n_B}{1000} = 190.852 \frac{м}{хв}$$

7.Довжина обробки

$$L_д = 41 \text{ мм}$$

8.Основний час

$$t_{02} = \frac{L_д}{n_B*S_B} = 0.182 \text{ хв}$$

9.Допоміжний час

$$t_{д2} = 0.7 \text{ хв}$$

10.Час виконання перехода

$$T_{оп2} = t_{02} + t_{д2} = 0.882 \text{ хв}$$

Перехід 50.7

$$D_{заг} = 180 \text{ мм}$$

1.Глибина різання

t=0.5 мм

2. Вибираємо подачу з рекомендованого діапазона 0,2-0,5 мм/об , узгоджуючи з паспортними даними верстата 16К20

$$S_B = 0.5 \frac{мм}{об}$$

3.Обираємо залежність для визначення швидкості різання і визначаємо емпіричну швидкість різання

$C_v = 270$ - коефіцієнт , що враховує умови різання

T=120 хв - період стійкості інструмента

$$V = \frac{C_v}{T^{0.1}+t^{0.15}+S_B^{0.35}} = 236.571 \frac{м}{хв}$$

4.Частота обертання шпинделя з паспортними данними верстата

$$n_p = \frac{1000*V}{\pi*D_{заг}} = 418.349 \frac{об}{хв}$$

6.Фактична швидкість різання

$$V_д = \frac{\pi*D_{заг}*n_B}{1000} = 214.885 \frac{м}{хв}$$

7. Довжина обробки

$$L_д = 76 \text{ мм}$$

8.Основний час

$$t_{02} = \frac{L_д}{n_B*S_B} = 0.368 \text{ хв}$$

9.Допоміжний час

$$t_{д2} = 0.7 \text{ хв}$$

10.Час виконання перехода

$$T_{оп2} = t_{02} + t_{д2} = 1.068 \text{ хв}$$

Загальний операційний час

$$T_{заг} = 1.256 + 9.271 + 1.745 + 1.882 + 0.849 + 1.1 + 1.068 + 0.2$$

$$T_{заг} = 17.371 \text{ хв}$$

Час на обслуговування робочого місця, перерви, відпочинок і природні потреби

$$T_{об_пп} = \frac{2.5+4.0*T_{заг}}{100} = 0.72 \text{ хв}$$

Штучний час

$$T_{шт} = T_{заг} + T_{об\ пп} = 18.091 \text{ хв}$$

Підготовчо - завершу вальний час

$$T_{пз} = 17 \text{ хв}$$

Кількість деталей у серії

$$n_c = 500 \text{ шт/зміну}$$

Калькуляційний час

$$T_к = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n_c} = 18.125 \text{ хв}$$

Норма виробітку за 1 год

$$N = \frac{60}{T_к} = 3.31 \text{ шт}$$

Приймаємо N=3 ш

60. Свердлильна операція

Перехід 60.1 свердлити 4 отвори ⌀14 $d_{св} = 14$ мм

1.Глибина різання

t=$\frac{d_{св}}{2} = 7$ мм

2.Обираємо подачу , узгоджуючи з паспортними даними верстата

S=0.15 мм

3.Обираємо залежність для визначення швидкості і визначаємо швидкість різання

T=25 хв

V=$\frac{12.1`*d_{св}^{0.3}}{T^{0.6}*t^{0.2}*S^{0.65}} = 9.095 \frac{м}{хв}$

4.Розрахункова частота обертання шпинделя

$n = \frac{1000*V}{\pi*d} = 186.775 \frac{об}{хв}$

Узгоджуємо частоту обертання з паспортними даними верстата

n=180 об/хв

5.Дійсна швидкість обертання шпинделя

$V_д = \frac{\pi*d*n}{1000} = 8.765 \frac{м}{хв}$

6.Довжина обробки

$L_д = 55$ мм

7.Основний час виконання перехода

$t_0 = \frac{L_д}{n*S} = 2.037$ мм

8.Допоміжний час

$t_{д1} = 0.3$ хв

9.Операційний час

$T_{оп} = 4 * (t_0 + t_{д1}) = 9.348\ хв$

Перехід 60.2

різати різьбу м16 в чотирьох отворах

$d_{св} = 16$ мм

1.Глибина різання t=2.0 мм/об

3.Обираємо залежність для визначення швидкості різання

t=25 хв

$V=\frac{6.3*d_{св}^{0.15}}{T^{0.2}*t^{0.1}*S^{0.45}} = 4.218$ м/хв

4.Розрахункова частота обертання шпинделя

$n=\frac{1000*V}{\pi*d_{св}} = 83.916$ об/хв

Узгоджуємо частоту обертання шпинделя

n=80 об/хв

*5.*Дійсна швидкість обертання шпинделя

$V_д = \frac{\pi*d*n}{1000} = 4.021$ мм/хв

6.Довжина обробки

$L_д = 40$ *мм*

*7.*Основний час виконання перехода

$t_{02} = \frac{L_д}{n*S} = 0.281$ мм

8.Допоміжний час

$t_{д2} = 0.3$ хв

9.Операційний час

$T_{оп2} = 4 * (t_{02} + t_{д2}) = 2.325$ хв

Час на обслуговування робочого місця , перерви , відпочинок і природні потреби

$T_{об_пп} = \frac{1.5+6.0+11.673}{100} = 0.715$ *хв*

Штучний час

$T_{шт} = 5.716 + T_{об\ пп} = 16.431$ хв

Підготовчо - завершувальний час

$T_{пз} = 4$ хв

Кількість деталей у серії

$n_c = 100$ шт/зміна

Калькуляційний час

$T_к = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n_c} = 16.471$ хв

Норма виробітку за 1 год

$N = \frac{60}{T_к} = 3.643$ шт

Приймаємо N=3 шт

РОЗДІЛ 8.
ВИМОГИ ЩОДО МОНТАЖУ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ

Великогабаритні ферментатори (зокрема об'ємом V = 60 $м^3$) постачаються на майданчик для монтажу у повністю зібраному вигляді. Процес монтажу має здійснюватися відповідно до вимог ДБН, правил безпеки та інструкцій заводу-виробника:

- **Стропування та підйом:** Стропування апарата дозволяється виконувати виключно за допомогою спеціальних вантажопідйомних пристроїв (монтажних цапф, проушин) або технологічних штуцерів, які спеціально передбачені проєктом для виконання такелажних робіт.
- **Підготовка фундаменту:** До встановлення ферментатора на фундамент укладають опорні сталеві підкладки або ін регулювальні пристрої.
- **Контроль геометричного положення:** Позиціонування апарата перевіряють за допомогою будівельних рівнів, висків або оптичних геодезичних приладів. Регулювання просторового положення змонтованого ферментатора здійснюють за допомогою клинових домкратів, пакетів металевих підкладок або відтискних регулювальних гвинтів.
- **Порядок фіксації:** Попереднє вирівнювання апарата на опорній металоконструкції або фундаменті виконують при вільному спиранні на підкладки чи клини. Остаточне вирівнювання та перевірку проводять після затягування гайок анкерних (фундаментних) болтів.

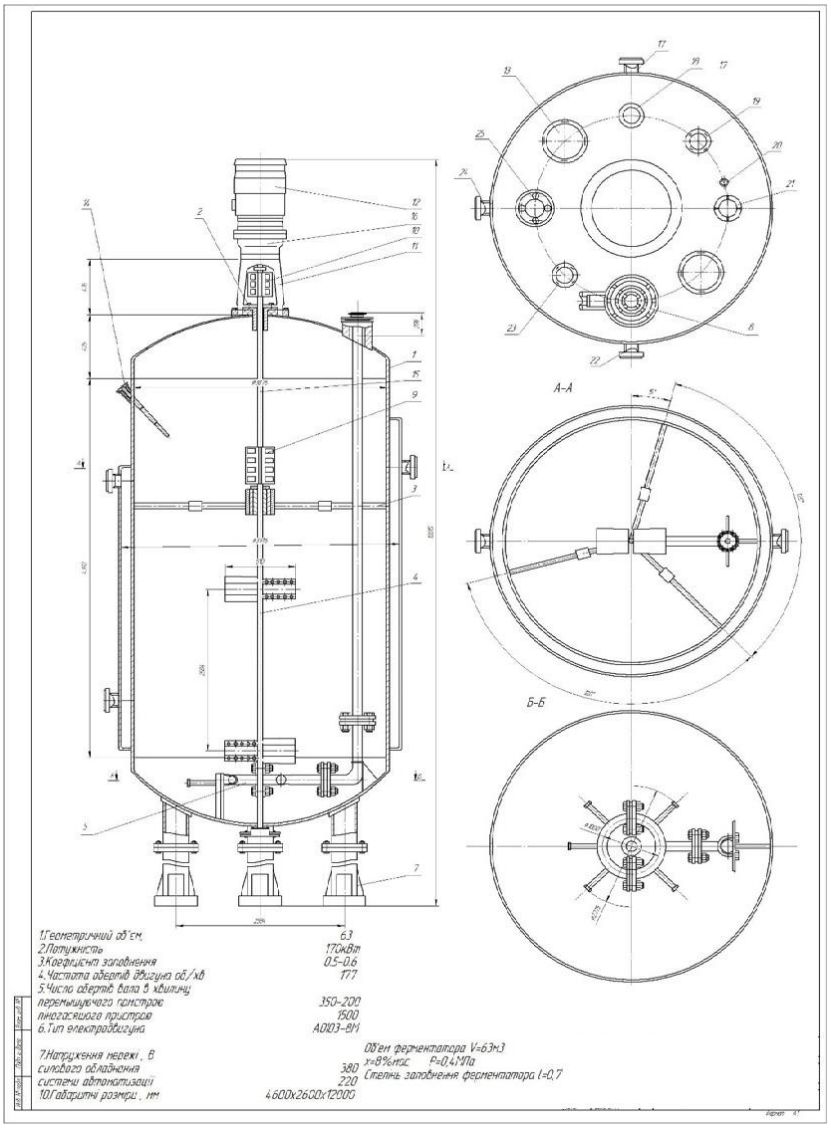


Рис. 8.1 Модернізований ферментатор об'ємом 60 м^3

Технічна характеристика ферментатора об’ємом V=60 м^3

Загальний і робочий об’єм апарата в м^3	60 та 36
Коефіцієнт заповнення апарата у %	60
Внутрішній діаметр в м	3876
Висота корпусу загальна в м	12015
Надлишковий тиск при гідравлічному випробуванні в кГ/см^2	3
Робочий надлишковий тиск в апараті в МПа	0,4
Тип мішалки	турбінна

Кількість обертів мішалки за хвилину	180
Електродвигун приводу	АМУ280М4

Експлуатація ферментатора

Монтажно-технологічні вимоги до апарата регламентуються відповідно до ДСТУ 24444. Монтаж, налагодження та експлуатацію всіх комплектуючих виробів (включаючи електродвигун 12, мотор-редуктор 16 та елементи КВПіА) необхідно здійснювати в суворій відповідності до інструкцій з експлуатації та монтажу підприємств-виробників, що постачаються разом із цим обладнанням.

Експлуатація ферментатора дозволяється лише в межах розрахункових робочих параметрів (тиск P = 0.4 МПа, температура стерилізації 135 °C), які зазначені в технічному паспорті. Перевищення допустимих значень категорично заборонено.

Технологічна обв'язка та КВПіА: Апарат і системи його технологічних комунікацій (трубопроводи подачі пари, повітря, поживного середовища, хладагенту та відведення готової біомаси) мають бути повністю укомплектовані необхідною запірно-регулювальною арматурою та контрольно-вимірювальними приладами (манометрами, термодатчиками, витратомірами) для безперервного моніторингу процесу.

Корозійний контроль: Робочі та миючі середовища, що застосовуються в апараті, не повинні викликати пітингової (точкової), виразкової корозії або корозійного розтріскування конструкційного матеріалу корпусу (сталь 12Х18Н10Т). Швидкість корозійного зносу не повинна перевищувати визначених розрахунковим терміном служби значень апарата та встановленою проєктною прибавкою на корозію.

Термічні навантаження: Швидкість зміни температури стінок корпусу та інших елементів ферментатора при всіх режимах (зокрема, під час виходу на режим стерилізації та подальшого охолодження) не повинна перевищувати

значень, установлених технічною документацією, задля запобігання виникненню небезпечних температурних напружень.

Теплоізоляція: Оскільки апарат працює в умовах підвищених температур із надлишковим виділенням тепла під час стерилізації, його корпус підлягає обов'язковій теплоізоляції. Теплоізоляційні роботи виконуються безпосередньо на місці монтажу замовником або залученою спеціалізованою організацією з використанням дозволених у фармацевтичній промисловості матеріалів.

Доступність для обслуговування: Простори навколо ферментатора та його розташування на монтажній відмітці повинні повністю забезпечувати можливість вільного огляду, безпечного технічного ремонту, санітарної обробки та очищення як внутрішніх, так і зовнішніх поверхонь.

Технічний огляд: У процесі експлуатації ферментатор підлягає регулярному технічному огляду (внутрішній огляд, гідравлічні/пневматичні випробування). Обсяг, методи (включаючи неруйнівний контроль зварних швів) та періодичність цих оглядів встановлюються заводом-виготовлювачем і фіксуються в паспорті апарата.

Ремонтні роботи: Будь-який ремонт елементів апарата із застосуванням зварювання повинен виконуватися за чіткою технологією, розробленою та затвердженою підприємством-виготовлювачем або сертифікованою ремонтною організацією до початку проведення робіт.

Вимоги до персоналу: До обслуговування, експлуатації та ремонту ферментатора допускаються особи віком не молодше 18 років, які пройшли попередній обов'язковий медичний огляд, спеціалізоване навчання за відповідною програмою, здали техмінімум та мають посвідчення про атестацію на право роботи із судинами, що працюють під тиском.

Порядок розбирання, дефектовки та ремонту вузлів ферментатора

Послідовність розбирання апарата

Розбирання ферментатора з перемішуючим пристроєм виконується в такій послідовності:

1. На фланці корпусу, кришці апарату та ущільнювальних прокладках наносять монтажні мітки (керненням або фарбою) для забезпечення правильного взаємного положення при подальшому збиранні.
2. Послідовно, хрест-навхрест, демонтують фланцеві болти кріплення кришки.
3. За допомогою вантажопідйомного механізму (кран-балки, талі) кришку апарата разом із приводом піднімають і встановлюють на спеціальні монтажні опори (козли) так, щоб вал із мішалками перебував у підвішеному стані, виключаючи деформацію.
4. Проводять почерговий демонтаж елементів привода, з'єднувальних муфт та ярусів лопатей мішалки.
5. Після демонтажу внутрішні поверхні апарата та робочі органи очищують від залишків біомаси м'якими щітками або дерев'яними (пластиковими) шкребками, після чого промивають гарячою водою та піддають санітарній обробці.

Дефектовка та ремонт корпусу й сорочки

Ремонтні роботи розпочинають із ретельного візуального огляду. Результати заносять у дефектній відомості (протоколі) з додаванням схеми розташування пошкоджень. За відсутності видимих вад, зварні шви та зони підвищених напружень піддають неруйнівному контролю - магнітопорошковому (МПК) та ультразвуковому (УЗК).

- **Усунення деформацій:** Невеликі вм'ятини на сталевому корпусі та сорочці виправляють методом рихтування (виколотки) за допомогою мідних або латунних підкладок для запобігання наклепу та пошкодження структури металу.

- **Технологія ремонту зварюванням:** Якщо дефекти (тріщини, нориці) неможливо усунути механічно, застосовують зварювання за такою технологією:

1. Пошкоджені ділянки ретельно зачищають шліфувальним інструментом до повного видалення дефекту та формування плавних переходів країв. Наскрізні пошкодження піддають обробці (розточуванню) країв під зварювання.
2. Підготовлені зони повторно перевіряють методами УЗК або МПК. За потреби проводять металографічні дослідження структури металу.
3. Заварювання (заплавлення) дефектних зон виконують зварюванням на постійному струмі з попереднім підігрівом деталей до температури **300-350°С**. Наскрізні отвори зварюють із використанням технологічних підкладок.
4. Після завершення зварювальних робіт виконують негайну термічну обробку за режимом високого відпуску: нагрівання до 650-680°С із витримкою з розрахунку 8 хвилин на 1 мм товщини наплавленого металу, з наступним повільним охолодженням.

Специфіка ремонту емальованих поверхонь та штуцерів

Під час проведення робіт усередині емальованого апарата на його днище обов'язково укладають товсту листову гуму для захисту покриття від випадкового падіння інструментів.

- **Підготовка поверхні:** Пошкоджену емаль видаляють абразивним корундовим інструментом до шару ґрунту або основного металу. Дефектне місце промивають 10%-вим розчином соди, висушують і знежирюють етиловим спиртом.
- **Механічний ремонт (метод пломбування):** Для усунення локальних дефектів емалі встановлюють танталові грибоподібні пломби з ущільнювальними шайбами з фторопласту-4. При значних розмірах

пошкоджень застосовують танталові гвинти-пломби з фторопластовим покриттям (різьбове з'єднання попередньо заповнюють хімічно стійкою композицією) або танталові накладки, що фіксуються кількома гвинтами.

- **Ремонт пошкоджених штуцерів** проводять шляхом встановлення внутрішнього титанового патрубка з відбортованим краєм. Патрубок вводять зсередини апарата, зазор навколо нього заповнюють епоксидною смолою, а із зовнішнього боку затискають титановою гайкою через хімічно стійку гумову прокладку.

Ремонт елементів перемішуючого пристрою та привода

- **Мішалки:** Ремонт лопатей та маточини проводять у разі їхнього механічного зносу або поломки. Застосовують наплавлення металу, зварювання, а також заміну шпонок і кріпильних елементів. Поверхні маточини та шпонкові пази після наплавлення піддають обов'язковій механічній обробці (фрезеруванню, розточуванню) під номінальні розміри валу.
- **Ревізія привода:** При кожному ремонті мотор-редуктор піддають повній ревізії. Перевіряють зазори (люфти) в зубчастих зачепленнях і підшипникових вузлах, контролюють співвісність (центрування) валів електродвигуна та редуктора. Особливу увагу приділяють перевірці справності та очищенню системи подачі мастила. Зношені зубчасті колеса відновлюють наплавленням зубів, а при значних поломках чи викришуванні - замінюють на нові.
- **Ремонт вертикальних валів:**
  - Вали ремонтують через знос посадкових шийок, деформацію (вигин) або знос шпонкових пазів.
  - *Шліфування:* При дрібних подряпинах, рисках або овальності шийок до **0.1 мм** виконують шліфування. При значному зносі шийки

проточують під найближчий ремонтний розмір або відновлюють первинний габарит методами електродугового наплавлення, металізації чи хромування.

- *Правка валу:* Погнуті вали виправляють у холодному або підігрітому стані на люнетах (у центрах) за допомогою гідравлічного преса або домкрата під контрольними індикаторами годинникового типу.
- *Тріщини:* Тріщини повністю обробляють на всю глибину (знімають фаски, зачищають краї) і заварюють високоякісними електродами, після чого шви шліфують урівень із основним металом. Зламані вали відновленню не підлягають і замінюються новими.
- *Шпонкові пази:* Ремонтують трьома способами: фрезеруванням паза під збільшений стандартний розмір шпонки; повним заварюванням старого паза електронаплавленням і фрезеруванням нового паза в іншому місці (зі зміщенням на 90° або 180°); або наплавленням стінок зношеного паза з наступним фрезеруванням до номінального розміру.

- **Підшипники кочення:** Ремонту не підлягають. При виявленні люфту, раковин, викришування (пітингу) на бігових доріжках чи тілах кочення, корозії або деформації сепаратора підшипник замінюють новим.

Ремонт та обслуговування вузлів ущільнення валу

Враховуючи високі вимоги до герметичності ферментатора, вузли ущільнення піддають ретельній ревізії. Залежно від комплектації апарата використовують сальникові (натяжні) або торцеві ущільнення.

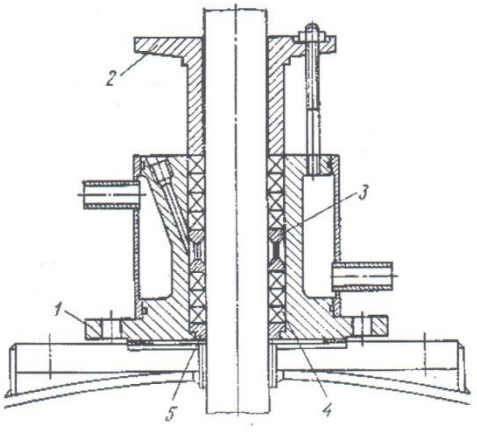


Рис. 7.2. Натяжний сальниковий вузол (сальник)
1 - корпус сальникової коробки; 2 - натискна кришка (букса); 3 - мастильне (ліхтарне) кільце; 4 - сальникова набивка; 5 - грундбукса (опорна втулка).

Технологія обслуговування сальникового ущільнення:

1. Ремонт полягає в повному видаленні старої та укладанні нової сальникової набивки 4.
2. Набивку заготовляють у вигляді окремих кілець. Зріз кілець виконують під косим кутом (45°) із забезпеченням теплового зазору в стику 3-5 мм.
3. При монтажі кілець у корпус 1 їхні стики обов'язково зміщують по колу на 120° один відносно одного для виключення утворення суцільного каналу витоку.
4. Перекіс ущільнювальних елементів у корпусі сальника категорично не допускається. Усі торцеві та робочі поверхні деталей мають бути притертими, без рисок, подряпин та раковин.
5. Затягування набивки натискною кришкою 2 виконують поступово й рівномірно. При цьому між валом і натискною втулкою повинен зберігатися однаковий радіальний зазор по всій окружності.
6. Ступінь затяжки вважається оптимальним, якщо забезпечується герметичність (утримання тиску повітряного затвора 0.2-0.3 МПа), але при цьому під час монтажу вал перемішуючого пристрою можна вільно провернути зусиллям руки.

Торцеві ущільнення: Зазвичай виходять із ладу через знос прецизійних пар тертя (кілець) або корозію/втому притискних пружин. Їхній ремонт полягає виключно в повній заміні пошкодженого картриджа або окремих елементів (кілець пари тертя, вторинних ущільнювальних кілець з еластомеру, пружинного блоку). Під час ремонту також обов'язково промивають і продувають канали системи водяного охолодження та затвору ущільнення.

Планування ремонтних робіт та структура ремонтного циклу

Для планування технічного обслуговування та ремонту (ТОР) ферментатора використовують систему нормативів, що визначають

тривалість робіт, періодичність їх проведення та трудовитрати. Ключовими показниками для складання графіків ремонту є:

- **Ремонтний цикл** - період роботи обладнання від початку введення в експлуатацію до першого капітального ремонту або між двома послідовними капітальними ремонтами. За тривалістю ремонтного циклу ферментатор з механічним перемішуванням належить до **VI групи** обладнання.
- **Міжремонтний період** - час роботи апарата між двома черговими плановими ремонтами (поточними або капітальними).
- **Міжоглядовий період** - час роботи між двома послідовними плановими технічними оглядами.

Структура ремонтного циклу визначає чітку послідовність чергування планових ремонтів і оглядів протягом усього циклу. Для ферментера з механічним перемішуванням вона має такий вигляд:

$$К - О_1 - О_2 - П_1 - О_3 - О_4 - П_2 - О_5 - О_6 - К$$

де:

- К - капітальний ремонт;
- П - поточний ремонт;
- О - технічний огляд.

Міжремонтний період - період роботи обладнання між двома послідовними плановими ремонтами.

$$3.\ П_{мр} = \frac{П_{рц}}{\sum C + \sum П + 1} = \frac{24}{1+2+1} = 6міс$$

$П_{рц}$ - ремонтний цикл, місяці

$\sum C$ - кількість середніх ремонтів в ремонтному циклі

$\sum П$ - кількість поточних ремонтів в ремонтному циклі

4 Тривалість між оглядових періодів:

$$П_{мо} = \frac{П_{рц}}{\sum C + \sum П + \sum О + 1} = \frac{24}{1+2+20+1} = \frac{24}{24} = 1міс$$

$\sum O$ - кількість оглядів в ремонтному циклі

5. Тривалість ремонтного циклу: $\frac{П_{рц}}{П_{мр}} = \frac{24}{12} = 2 роки$

6. Тривалість ремонту обладнання при складанні місячних планів ремонту обладнання:

$$A = \frac{T_р \cdot R \cdot K_н}{B \cdot T_с \cdot C} = \frac{35 \cdot 9.8 \cdot 0,9}{2 \cdot 8 \cdot 1} = 20 змін$$

$T_р$ - Норма трудомісткості однієї умовної одиниці. (люд.год)

R - категорія складності машини

$K_н$ - коефіцієнт виконання норми часу (не вище 1)

B - кількість робітників в 1 зміну

$T_с$ - тривалість зміни

C - змінність роботи на ремонті даної машини

7. Тривалість простою обладнання в ремонті при складанні річного плану ремонту обладнання:

$$A = \frac{24 \cdot R \cdot П_р}{T_с} = \frac{24 \cdot 9.8 \cdot 0,8}{8} = 24 зміни$$

$П_р$ - норма простою обладнання в ремонті на одну ремонтну одиницю.

8. Норми трудомісткості ремонтів та профілактичних оглядів приведені в табл..1

(люд.год на 1 умовну одиницю)

Роботи	Профілактичний огляд	Поточний ремонт	Середній ремонт	Капітальний ремонт
Слюсарні	0,6	3	12	23
Станочні	-	0,9	3,6	8,5
Інші	-	0,5	1,8	3,5
Всього	0,6	4,4	17,4	35,0

Трудомісткість ремонтного циклу:

$$T_{р.ц.} = R \cdot (35 + 17{,}4 \cdot \sum C + 4{,}4 \cdot \sum П + 0{,}6 \cdot \sum O) = 9.8 \cdot (35 + 17{,}4 \cdot 1 + 4{,}4 \cdot 2 + 0{,}6 \cdot 20) = 717.34 \textit{люд.год}$$

9. Потрібна кількість слюсарів для міжремонтного обслуговування по цехам та типам обладнання:

$$Ч_{мо} = \frac{\sum R}{D} = \frac{9.8}{500} = 0{,}02 \text{ люд/змін.}$$

$\sum R$ - сума ремонтних одиниць

D - норма міжремонтного обслуговування, умовні ремонтні одиниці на одного робочого в зміну.

РОЗДІЛ 9.
СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ

Промислове вирощування мікроорганізмів у більшості випадків здійснюють глибинним методом, за якого клітини продуцента перебувають у суспендованому стані у водному розчині поживних речовин. За способом організації процеси культивування поділяють на періодичні, безперервні та проміжні (наприклад, періодичні з підживленням / відливально-доливні). Метод ведення біосинтезу визначає комплекс завдань керування та структуру системи автоматизації.

Пе́ріодичний спосіб найчастіше застосовують на стадії вирощування посівного матеріалу (інокуляту), а також для низки промислових ферментацій (виробництво антибіотиків, амілолітичних ферментів, пивоваріння тощо). Повний технологічний цикл роботи ферментатора складається з двох основних стадій:

1. Допоміжна стадія: вивантаження культурної рідини, промивання апарата, термічна стерилізація, завантаження стерильного поживного середовища та внесення інокуляту. Основним завданням керування тут є координація чіткої послідовності операцій, що реалізується функціями програмно-логічного керування (ПЛК) через автоматичне або дистанційне перемикання запірної арматури на комунікаціях апарата.

2. Робоча стадія (культивування): під час цього етапу в апараті відбуваються взаємопов'язані динамічні процеси споживання субстрату, росту біомаси та накопичення продуктів метаболізму (зокрема й цільового продукту). Склад середовища безперервно змінюється: концентрація поживних речовин падає, а об'єм біомаси зростає.

Ефективність ферментації (біосинтезу) визначається виходом цільової продукції з одиниці поживного середовища та загальною продуктивністю

апарата. Оскільки хімічний склад середовища при періодичному способі змінюється за природною кінетичною кривою, головним завданням автоматичного керування на робочій стадії є стабілізація оптимальних режимних (фізико-хімічних) параметрів: температури, pH, тиску, витрати повітря та рівня піни.

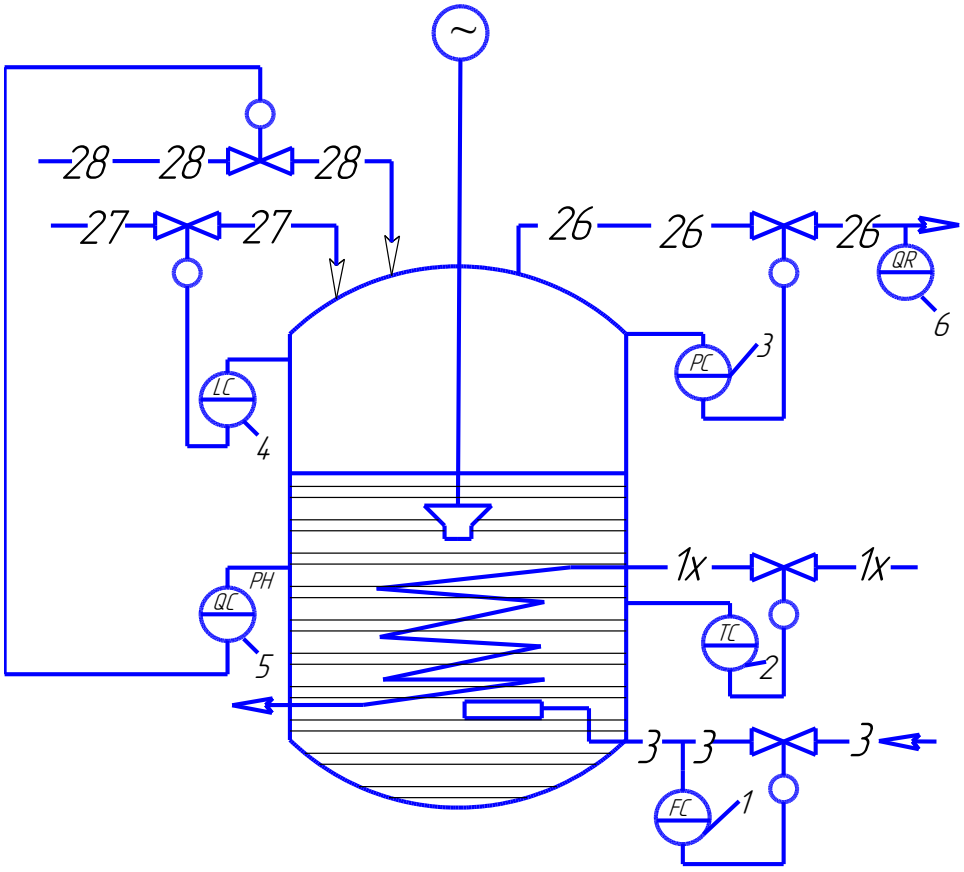


Рис.9.1. Функціональна схема автоматизації періодичного процесу глибинного культивування

На схемі автоматизації прийнято стандартні літерні позначення вимірювальних та регулювальних приладів згідно з діючими нормативами:

- Перша літера означає контрольовану величину: F (*Flow*) - витрата; T (*Temperature*) - температура; P (*Pressure*) - тиск; L (*Level*) - рівень; Q (*Quality*) - якість / склад / концентрація.
- Друга літера означає функцію приладу: C (*Controller*) - регулювання/керування; R (*Recorder*) - реєстрація/запис.

Експлікація контурів автоматичного регулювання (цифрові позначення):

- 1 (FC - Flow Controller): Автоматична система регулювання (АСР) витрати аеруючого повітря. Вимірює об'єм повітря, що подається в нижню частину апарата через барботер (технологічна лінія 3), та керує регулюючим клапаном для підтримки заданого кисневого режиму.
- 2 (TC - Temperature Controller): АСР температури культуральної рідини. Датчик фіксує поточну температуру в апараті. При відхиленні від регламенту (наприклад, через тепловиділення мікроорганізмів) регулятор змінює ступінь відкриття клапана на лінії подачі холодоагенту / гарячої води (технологічна лінія 1х) у внутрішній змійовик або зовнішню сорочку.
- 3 (PC - Pressure Controller): АСР надлишкового тиску в газовідвідній лінії (26). Для стерильних процесів необхідно тримати апарат під невеликим надлишковим тиском, щоб унеможливити засмоктування нестерильного повітря ззовні. Регулятор стабілізує тиск шляхом дроселювання (зміни витрати) відпрацьованих газів, що виходять із ферментатора.
- 4 (LC - Level Controller): АСР рівня піни. Специфікою аеробного культивування є утворення великої кількості піни. При замиканні датчика піни регулятор видає імпульсний сигнал на відкриття клапана на лінії 28 для дозованого подання рідкого хімічного піногасника (антифламінгу) в апарат.
- 5 (QC - Quality/pH Controller): АСР водневого показника (pH) середовища. Контролює концентрацію іонів водню в культуральній рідині за допомогою занурювального електрода. При відхиленні показника в кислу або лужну сторону регулятор подає команду на виконавчий механізм лінії 27 для введення відповідного коректуючого титранту (лугу, аміачної води чи кислоти).

- 6 (QR - Quality Recorder): Вторинний прилад автоматичного газоаналізу. Здійснює безперервний контроль та реєстрацію концентрації кисню (O_2) і вуглекислого газу (CO_2) у вихідному потоці відпрацьованих газів (лінія 26), що дозволяє непрямим методом оцінювати дихальний коефіцієнт та інтенсивність метаболізму культури в реальному часі.

Позначення технологічних потоків (ліній):

- 3 - лінія подачі стерильного повітря на барботер для аерації середовища.
- 1х - лінія подачі технологічного холодоагенту (або теплоносія) у теплообмінний пристрій.
- 26 - газова лінія виходу відпрацьованого повітря та газів метаболізму з надтрубного простору ферментатора.
- 27 - трубопровід подачі розчинів для хімічної корекції рівня pH (кислота / луг).
- 28 - трубопровід подачі хімічного піногасника.

РОЗДІЛ 10.
ОХОРОНА ПРАЦІ

Безпека праці під час експлуатації посудин, що працюють під тиском

Технологчні судини, що працюють під тиском належать до об'єктів підвщеної небезпеки через ризик вибухової розгерметизації та руйнування корпусів. Вимоги до їх проектування та експлуатації регламентуються «Правилами охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском».

Дія цих Правил поширюється на посудини, цистерни, бочки та балони для зберігання і транспортування стиснутих чи зріджених газів із надлишковим тиском понад 68 кПа. Правила не поширюються на обладнання місткістю менше 0.025 , а також на пристрої, де добуток місткості (у) на робочий тиск (у Па) не перевищує 200.

Виготовлення такого обладнання дозволяється лише на підприємствах із дозволом Держпраці. Апарати постачаються замовнику з паспортом та інструкцією, а на їх корпусі обов'язково кріпиться металева маркувальна табличка із зазначенням:

- найменування виробника та заводського номера;
- року випуску;
- величини робочого тиску та допустимої температури стінок.

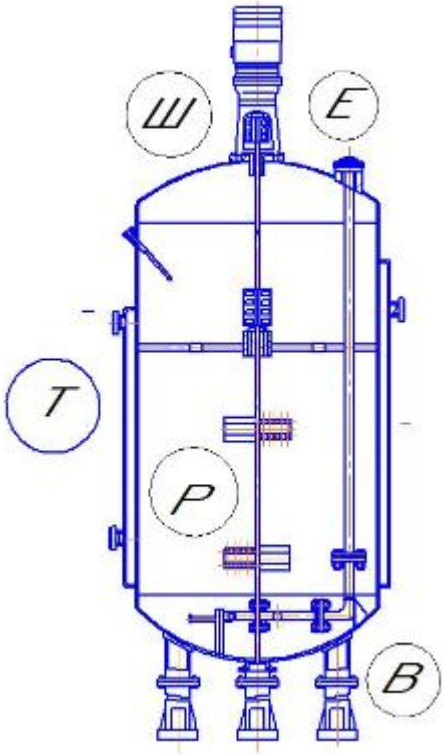
Усе обладнання підлягає обов'язковому внутрішньому обліку на підприємстві у спеціальній книзі огляду судин. Дозвіл на пуск у роботу зареєстрованих апаратів видає інспектор Держпраці, а для об'єктів, що не підлягають державній реєстрації - уповноважена особа підприємства після технічного перевірки стану.

Власник обладнання зобов'язаний забезпечити такий регламент контролю:

- внутрішній огляд та гідравлічні випробування нових судин перед першим пуском;
- плановий внутрішній огляд усіх судин щонайменше один раз на два роки;
- технічний огляд апаратів, що працюють в агресивних середовищах - щонайменше один раз на 12 місяців.

Під час оглядів здійснюється візуальний та інструментальний контроль для виявлення тріщин, розривів, зон корозії, раковин та дефектів зварних швів.

Оцінка та нормування виробничих ризиків у цеху



Умовні позначення шкідливих та небезпечних чинників:

Е - електронебезпека

Ш- шум

В - вібрація

Р - рухомі частини

Т - тиск

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті модернізовано вертикальний ферментатор загальним об'ємом 60 м^3 (робочий - 36 м^3, діаметр - 3876 мм, висота - 12015 мм). Суть модернізації полягає в оптимізації турбінної мішалки та конструкції валу, що забезпечує внутрішню рециркуляцію повітря і знижує його витрати.

За коефіцієнта заповнення 0,6 та частоти обертання валу 180 об/хв досягається стабільний турбулентний режим перемішування. Для роботи в умовах надлишкового тиску 0.3-0.4 МПа підібрано привод потужністю 170 кВт з електродвигуном АМУ280М4.

Розроблено схему автоматизації з контурами регулювання витрати повітря, температури, тиску, рівня піни та pH.

Впровадження модернізації підвищує продуктивність апарата, знижує собівартість продукції за рахунок економії енергоносіїв і повітря, що збільшує прибуток та рентабельність виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Безпека життєдіяльності : конспект лекцій для студентів усіх напрямів підготовки бакалаврів денної та заочної форм навчання / уклад. О. П. Слободян, В. А. Заєць, С. О. Авдієнко, Л. П. Нещадим. - Київ : НУХТ, 2013. - 51 с.
2. Бісерні млини для руйнування клітин мікроорганізмів у виробництві продукції мікробного синтезу / М. О. Касинюк, К. Р. Грінінг, А. М. Пономаренко, О. О. Губеня, К. А. Омеляненко // Харчова промисловість. - 2025. - № 37. - С. 190-218.
3. Біотехнологія : підручник / В. Г. Герасименко, М. О. Герасименко, М. І. Цвіліховський та ін. ; за ред. В. Г. Герасименка. - Київ : Фірма «ІНКОС», 2006. - 576 с.
4. Гончаренко Б. М. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій : підручник / Б. М. Гончаренко, А. П. Ладанюк. - Київ : НУХТ, 2014. - 530 с.
5. Домарецький В. А. Технологія солода та пива : підручник / В. А. Домарецький. - Київ : Інкос, 2004. - 426 с.
6. Заплетніков І. М. Експлуатація і обслуговування технологічного обладнання харчових виробництв : навч. посіб. / І. М. Заплетніков, В. Г. Мирончук, В. М. Кудрявцев ; Нац. ун-т харч. технол. - Київ : ЦУЛ, 2012. - 344 с.
7. Компанія Lab1st (Labfirst Scientific) - міжнародна компанія-виробник спеціалізованого обладнання для лабораторій, пілотних досліджень та промислового біопроцесингу. URL: https://www.lab1st.com/airlift-bioreactors (дата звернення: 14.06.2026).
8. Марценюк О. С., Мельник Л. М. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. - Київ : НУХТ, 2011. - 407 с.
9. Монтаж, експлуатація, діагностика та ремонт обладнання м'ясопереробних підприємств : підручник / І. Г. Бабанов, О. М. Гавва, О. І. Бабанова та ін. - Київ : Сталь, 2015. - 600 с.
10. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: підручник / В. Г. Мирончук, І. С. Гулий, М. М. Пушанко та ін. ; за ред. В. Г. Мирончука. - 2-ге вид., перероб. і доп. - Вінниця : Нова книга, 2007. - 648 с.
11. Основи охорони праці: навчальний посібник для студентів освітнього ступеня «бакалавр» / В. С. Гуць, С. Д. Коваленко, О. В. Євтушенко та ін. - Київ : НУХТ, 2016. - 97 с.

12. Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник / В. Т. Павлище. - Київ : Вища школа, 1993. - 556 с.
13. Пакувальне обладнання : підручник / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко, О. О. Кохан. - Київ : Упаковка, 2010. - 744 с.
14. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник / І. Ф. Малежик, П. С. Циганков, П. М. Немирович, О. С. Марценюк ; за ред. І. Ф. Малежика. - Київ : НУХТ, 2003. - 400 с.
15. Процеси і апарати харчових виробництв : приклади і задачі : навч. посіб. / І. Ф. Малежик, П. М. Немирович, В. Л. Зав'ялов та ін. ; за ред. І. Ф. Малежика. - Київ : НУХТ, 2015. - 386 с.
16. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості : навч. посіб. / В. Г. Мирончук, Л. О. Орлов, А. І. Українець та ін. - Вінниця : Нова книга, 2004. - 288 с.
17. Сидоров Ю. І. Процеси і апарати хіміко-фармацевтичної промисловості : навч. посіб. / Ю. І. Сидоров, В. І. Чуєшов, В. П. Новіков. - Вінниця : Нова книга, 2009. - 816 с.
18. Ситник І. О., Климнюк С. І., Творко М. С. Мікробіологія, вірусологія, імунологія : підручник. - Тернопіль : Укрмедкнига, 2009. - 295 с.
19. 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.
20. Технологічні комплекси харчових виробництв : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. - Київ : Видавництво «Сталь», 2017. - 456 S.
21. Al-Jihad A. H., El-Naggar M. Y., Al-Garni S. M. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by an acidophilic Stenotrophomonas maltophilia strain AJH1 isolated from a mineral mining site in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2016. Vol. 23, No. 6. P. S1-S11. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.10.021
22. Ángeles M., Leyva C., Ancheyta J., Ramírez S. A Review of Experimental Procedures for Heavy Oil Hydrocracking with Dispersed Catalyst. *ChemInform*. 2014. Vol. 45, No. 15. https://doi.org/10.1002/chin.201415243
23. Batt C. A. Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition) / C. A. Batt. - Academic Press (Elsevier), 2017. - 110 p.
24. Brennan J. G. Food Processing Handbook (Second Edition) / James G. Brennan, Alistair S. Grandison. - Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2011. - 826 p.
25. Fellows P. Food processing technology. Principles and Practice (Second Edition) / P. Fellows. - CRC Press, 2000. - 591 p.

26. Kaur I., Sharma A. D. Bioreactor: Design, functions and fermentation innovations. *Research & Reviews in Biotechnology & Biosciences*. 2021. Vol. 8, No. 2. P. 116-125. https://doi.org/10.5281/zenodo.5775455
27. Kordkheili M. S., Ghafari S., Halladj R., Kasaee M. Biodegradation of 2,4-dichlorophenol by mixed culture in an aerobic fixed-biofilm process: Kinetic model and reactor performance. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 12, No. 9. P. 2919-2928. https://doi.org/10.1007/s13762-014-0675-9
28. Kunze W. Technology Brewing And Malting (5th English Edition) / W. Kunze. - VLB Berlin, 2014. - 935 p.
29. Lelieveld H. Handbook of Hygiene Control in the Food Industry (Second Edition) / H. Lelieveld, J. Holah, D. Gabrić. - Woodhead Publishing (Elsevier), 2016. - 736 p.
30. Naumenko N. History of Food Science / N. Naumenko. - Kyiv : NUFT, 2014. - 199 p.
31. Ralko O. The restructuring and organisational development in the food industry in Ukraine // Restructuring: theory and practice : monograph / ed. by T. Mostenska, I. Fedulova, V. Jurėnienė. - Kyiv : Kondor, 2012. - P. 171-195.
32. Slivac I., Srček V. G., Radradi I., Kmetič I., Knaz M. Aujeszky's disease virus production in disposable bioreactor. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2006. Vol. 102, No. 2. P. 108-114. https://doi.org/10.1263/jbb.102.108
33. Toledo R. T. Fundamentals of Food Process Engineering (Third Edition) / R. T. Toledo. - Springer, 2007. - 585 p.
34. Yiu H. Hui. Handbook of Food Science, Technology, and Engineering / H. Hui Yiu. - CRC Press, 2006. - 928 p.
35. Zhu Y., Li S., Yan L. et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by microbial consortia: A review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 9. Art. 7698. https://doi.org/10.3390/su15097698