


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет біотехнології і біотехніки  
Кафедра біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Наталія Голуб

« 3 » червня 2025 р.

**Дипломний проект**  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Біотехнології»  
спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»  
на тему: «Технологія біопластику з м'яси»

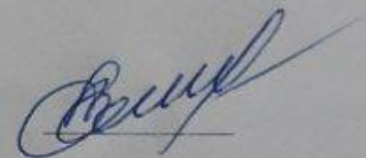
Виконав:  
студент IV курсу, групи ББ-12  
Григорусь Євгеній Сергійович



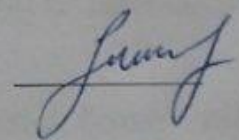
Керівник:  
ас. кафедри біоенергетики,  
біоінформатики та екобіотехнології, к.т.н.  
Дем'яненко Ірина Володимирівна



Консультант з проектування:  
Професор, д.т.н., професор  
Саблій Лариса Андріївна

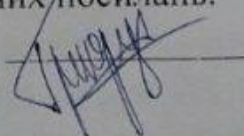


Рецензент:  
старший викладач кафедри промислової  
біотехнології та біофармації, к.т.н.  
Тітова Лариса Олександрівна



Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент



Київ – 2025 року

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет біотехнології і біотехніки  
Кафедра біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології

Рівень освіти – вищий (бакалаврський)

Спеціальність – 162 «Біотехнологія та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Біотехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

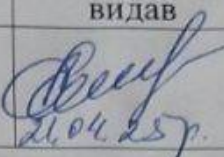
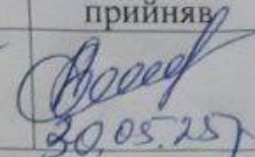
*Голуб* Наталія Голуб

«21» травня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
на дипломний проєкт студенту  
Григорусю Євгенію Сергійовичу

1. Тема проєкту «Технологія біопластику з меляси»  
керівник проєкту, ас., к.т.н. Дем'яненко Ірина Володимирівна, затвержені  
наказом по університету від «29» травня 2025 р. №1838-С
2. Термін подання студентом проєкту 03.06.2025
3. Вихідні дані до проєкту: продуктивність підприємства – 7900 кг полілактиду за  
один виробничий цикл
4. Зміст пояснювальної записки: вступ; характеристика сировини, біологічного  
агента, обґрунтування технології; біохімічні основи технологічного процесу;  
технологічна частина; підбір та характеристика обладнання; охорона праці та  
довкілля; висновки
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників,  
плакатів, презентацій тощо): технологічна схема – 1 арк. А1, апаратурна схема – 1  
арк. А1, креслення загального виду реактора-змішувача – 1 арк. А1

6. Консультант розділів проекту:

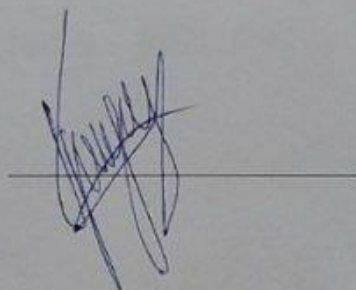
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Графічна частина дипломного проекту (проекування)	д.т.н., проф. Саблій Л.А.	 21.04.25р.	 30.05.25р.

7. Дата видачі завдання 21.04.2025

Календарний план

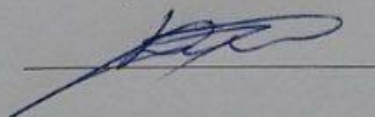
№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Характеристика сировини, біологічного агента, обґрунтування технології	25.04.2025	виконано
2	Біохімічні основи технологічного процесу	30.04.2025	виконано
3	Технологічна частина	5.05.2025	виконано
4	Технологічна схема	10.05.2025	виконано
5	Підбір та характеристика обладнання	15.05.2025	виконано
6	Креслення апарату	20.05.2025	виконано
7	Охорона праці та довкілля	25.05.2025	виконано
8	Апаратурна схема	30.05.2025	виконано

Студент



Григорусь Євгеній Сергійович

Керівник проекту



Дем'яненко Ірина Володимирівна

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 63 ст., 6 рис., 3 табл., 28 посилань.

Метою дипломного проекту є розробка технології виробництва біопластику з меляси. У якості продуценту обрано *Lactobacillus delbrueckii subsp. delbrueckii* у зв'язку зі здатністю ефективно конвертувати цукри в молочну кислоту – мономер полілактиду. У якості сировини обрано бурякову мелясу, у зв'язку зі специфічним хімічним складом, що забезпечує оптимальні умови для виробничого культивування.

Технологія включає допоміжні роботи, такі як санітарна підготовка виробництва та підготовка поживного середовища. А також основні роботи, такі як обробка меляси сірчаною кислотою, ферментація, виділення та очищення лактату з подальшою поліконденсацією до лактиду та полімеризацією до полілактиду.

В ході виконання проекту спроектовано реактор-змішувач номінальним об'ємом 80 м<sup>3</sup> для попередньої обробки меляси, з метою підвищення доступності цукрів у її складі та збільшення виходу кінцевого продукту після стадії ферментації.

Розроблена технологія одночасно забезпечує утилізацію відходів цукрової промисловості та виробництво біорозкладного пластику.

МЕЛЯСА, МОЛОЧНА КИСЛОТА, ПОЛІЛАКТИД, БІОПЛАСТИК,  
РЕАКТОР-ЗМІШУВАЧ

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
<b>Змн.</b>	<b>Арк.</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дат</b>			
Розроб.		Григорусь Є.С.			<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Аркушів</b>
Конс.						4	63
Керівн.		Дем'яненко			<b>РЕФЕРАТ</b> КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затв.							

## ABSTRACT

Explanatory note: 63 p., 6 fig., 3 table., 28 references.

The purpose of the diploma project is to develop a technology for the production of bioplastics from molasses. *Lactobacillus delbrueckii subsp.delbrueckii* was chosen as the producer due to its ability to effectively convert sugars into lactic acid – a monomer of polylactide. Beet molasses was chosen as the raw material due to its specific chemical composition, which provides optimal conditions for industrial cultivation.

The technology includes auxiliary work, such as sanitary preparation of production and preparation of nutrient medium. As well as the main work, such as treatment of molasses with sulfuric acid, fermentation, isolation and purification of lactate with subsequent polycondensation to lactide and polymerization to polylactide.

During the project, a reactor-mixer with a nominal volume of 80 m<sup>3</sup> was designed for the pre-treatment of molasses, in order to increase the availability of sugars in its composition and increase the yield of the final product after the fermentation stage.

The developed technology simultaneously ensures the utilization of sugar industry waste and the production of biodegradable plastic.

MOLASSES, LACTIC ACID, POLYLACTIDE, BIOPLASTIC, REACTOR-MIXER

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Григорусь Є.С.</i>			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Конс.</i>						5	63
<i>Керівн.</i>		<i>Дем'яненко</i>			<b>ABSTRACT</b> <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ</i>		
<i>Затв.</i>							

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

PLA – polylactic acid, полілактид, полімолочна кислота

МК – молочна кислота

ПС – поживне середовище

ДСТУ – державний стандарт України

НПАОП – нормативно-правові акти з охорони праці

					ДП ББ12.05.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ .....	10
1.1. Характеристика сировини.....	10
1.2. Обґрунтування вибору технології.....	11
1.3. Характеристика біологічного агента.....	13
РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ .....	16
2.1 Схема перебігу процесів .....	16
2.2 Характеристика кінцевого продукту.....	19
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	23
3.1 Матеріали основні і допоміжні.....	23
3.2 Контроль виробництва.....	25
3.3 Матеріальний баланс.....	29
3.4 Опис технологічного процесу .....	33
РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ .....	42
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ.....	51
ВИСНОВКИ .....	53
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....	55
ДОДАТОК А .....	58

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Григорусь Є.С.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Конс.</i>						7	63
<i>Керівн.</i>		<i>Дем'яненко</i>			<b>ЗМІСТ</b> <i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ</i>		
<i>Затв.</i>							

## ВСТУП

Пластикове забруднення є однією з найбільших екологічних проблем сучасності, оскільки швидке зростання виробництва одноразових пластикових виробів переважає світові можливості їх переробки та утилізації [1].

Пластик відіграє велику роль у нашому житті – це дешевий та універсальний матеріал, який застосовується в різних сферах людської діяльності. Однак коли з пластиковими відходами поводяться неправильно – не переробляють, не спалюють і не зберігають на спеціалізованих звалищах – вони стають забруднювачем навколишнього середовища [2].

Попри те що найбільша кількість пластикових відходів виробляється країнами Азії та Африки, проблема пластикового забруднення наявна у всіх куточках світу у зв'язку з його транспортуванням по біосфері. Пластикові відходи, що генеруються і накопичуються на суходолі, потрапляють в моря великими річками, рухаючись вниз за течією. Під дією чинників навколишнього середовища пластикове сміття розщеплюється на дрібні частинки, часто менше половини сантиметра в розмірі. Дані дрібнодисперсні частинки легко поширюються по біосфері. На сьогоднішній день мікропластик присутній навіть у найвіддаленіших куточках Землі – від Маріанського жолоба до вершини гори Еверест [1].

Мікропластик продовжує розпадатись на дедалі менші фрагменти і поширюється не тільки по біосфері, а й харчових ланцюгах. Тож не дивно, що вчені знайшли мікропластик у людях. Крихітні частинки органічних полімерів знаходяться в нашій крові, легенях і навіть у фекаліях [1].

Проблема мікропластику полягає у неможливості його видалення з біосфери. Одним з рішень даної проблеми є перехід на біорозкладні полімери. Застосування біопластику дозволить не тільки припинити накопичення пластикових відходів, але й знизити вуглецевий слід нафтохімічної промисловості, що забезпечує виготовлення даних матеріалів. Виробництво біопластику також вирішує проблему

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>			
<i>Розроб.</i>		Григорусь Є.С.			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Конс.</i>						8	63
<i>Керівн.</i>		Дем'яненко			<b>ВСТУП</b> КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
<i>Затв.</i>							

утилізації відходів сільського господарства, що є особливо актуальним для аграрних країн, в тому числі України.

Полілактид (PLA) – полімер на основі молочної кислоти (МК), є однією з можливих альтернатив традиційного пластику. Його екологічні властивості, включаючи здатність до біологічного розкладу та низький вуглецевий слід, позиціонують його як ефективне рішення для вирішення світової проблеми пластикового забруднення. Перевагою PLA є його багатофункціональність. Він може бути модифікований для широкого діапазону властивостей, як-то гнучкість, міцність чи навіть термостійкість [3].

Таким чином, метою дипломного проекту є розробка технології виробництва PLA на основі бурякової меляси.

***Для досягнення мети поставлено наступні завдання:***

1. вибір продуценту та дослідження оптимальних умов його культивування;
2. дослідження процесів культивування та полімеризації молочної кислоти;
3. вибір, обґрунтування, розробка технологічної та апаратурної схеми виробництва;
4. проведення розрахунку та розробка креслення реактора-змішувача для обробки вихідної сировини;
5. розробка вимог щодо охорони праці та довкілля для виробництва.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

# РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, БІОЛОГІЧНОГО АГЕНТА. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ

## 1.1. Характеристика сировини

Основою для виробництва полілактиду є молочна кислота. Згідно ДСТУ 4621:2006 для вироблення МК може застосовуватись цукор згідно ДСТУ 2316, або інша вуглеводомістка сировина вітчизняного або закордонного походження, що підходить для зброджування молочнокислими бактеріями роду *Lactobacillus* [4].

У якості сировини для виробництва обрано бурякову мелясу у зв'язку з її дешевизною, що підходить для великомасштабного виготовлення біопластику, а також багатим на домішки хімічним складом, що знижує потребу у використанні мінерального живлення в процесі культивування.

Згідно ДСТУ 3696-98 бурякова меляса є побічним продуктом буряко-цукрового виробництва і представлена густою, в'язкою, темно-коричневою рідиною з характерним запахом та солодко-гіркуватим смаком. Розчинна як у гарячій, так і холодній воді. Масова частка сахарози у мелясі складає – не менше 43%. Кислотність меляси перебуває в межах 6,5-8,5. Кількість мікроорганізмів не перевищує  $1 \cdot 10^5$  КУО на грам [5].

Окрім сахарози, в мелясі також присутня невелика кількість глюкози, фруктози, а також інших моносахаридів, що утворюються внаслідок фізико-хімічної обробки бурякової сировини. Меляса також містить значну частку мінеральних речовин, як-то зола, солі калію, кальцію, магнію та сульфур. Варто зазначити, що в мелясі також присутня молочна кислота, що виникає в результаті природного процесу бродіння даної сировини у зв'язку з її сприятливим для зростання молочнокислих бактерій складом [6].

У зв'язку з непостійним складом, надходження бурякової меляси на виробництво проходить партіями, кожна з яких засвідчується сертифікатом відповідності, у якому зазначається результати перевірки на якість.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
Розроб.		Григорусь Є.С.			Лім.	Арк.	Аркшів
Конс.						10	63
Керівн.		Дем'яненко			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затв.							

Перевірка включає органолептичні та фізико-хімічні дослідження об'єднаної проби та передбачають перевірку на вміст токсичних речовин, що засвідчується штампом. Бродильна проба, що засвідчує можливість використання сировини для біотехнологічного виробництва, проводиться безпосередньо на заводі. Зберігання м'яси триває не більше 9 місяців [5].

## 1.2. Обґрунтування вибору технології

Виробництво PLA передбачає синтезування молочної кислоти, мономеру полілактиду, та її подальшу полімеризацію.

Для промислового виробництва МК застосовується хімічний синтез та ферментативне бродіння. Хімічний синтез здатен забезпечити ефективно і великомасштабне виготовлення продукту, проте потребує значних матеріальних та енергетичних затрат, тому реалізується лише в дуже розвинених країнах, таких як США та Японія. Ферментативне виробництво проводиться зброджуванням вуглеводомісткої сировини молочнокислими бактеріями роду *Lactobacillus*, внаслідок чого є менш ефективним, але в той же час простішим і менш витратним процесом. Близько 90% усієї виготовленої молочної кислоти у світі отримують саме шляхом ферментативного бродіння [7].

Ферментативне виробництво поділяється на гомо- та гетероферментативне, в залежності від особливостей метаболізму обраного продуцента. Гетероферментативне виробництво характеризується значним виробництвом сторонніх метаболітів, як-то органічні кислоти, спирти та вуглекислий газ, тому не є вживаним у промисловості. Для гомоферментативного виробництва застосовуються різноманітні види лактобацил, що культивуються на середовищах з сільськогосподарських відходів в слабокислих та анаеробних умовах з температурою в межах 40°C [8].

PLA може виготовлятися з різною молекулярною масою, проте комерційне застосування мають лише високомолекулярні полімери (>100 kDa), що можуть вироблятися прямою поліконденсацією, або ж полімеризацією попередньо поліконденсованого лактиду [8].

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Найбільш промислово вживаним методом отримання PLA є полімеризація лактиду з розкриттям кільця, яка включає поліконденсацію низькомолекулярного полілактиду з молочної кислоти, димеризацію утвореного преполімеру до лактиду та полімеризацію утвореного лактиду до високомолекулярного PLA [9].

Отже, типова технологія виробництва PLA включає в себе наступні етапи:

- ферментація вуглеводомісткої сировини шляхом молочнокислого бродіння з метою синтезу молочної кислоти
- поліконденсація молочної кислоти до лактиду
- полімеризація лактиду до полілактиду

Передферментаційні роботи передбачають розбавлення меляси водою з подальшим інвертуванням з допомогою сірчаної або соляної кислоти [10]. Інвертування проводиться у розрахунку 1 об'ємної одиниці 20%  $H_2SO_4$  на 10 масових одиниць цукрів у складі меляси з подальшим нагріванням до  $100^\circ C$  впродовж 20 хв [11]. Можливе також інвертування при  $60-105^\circ C$  тривалістю від 20 хв до 2 години [12].

Оцукрене сусло зброджують при  $50^\circ C$  з додаванням крейдового молока з метою нейтралізації накопиченої у середовищі молочної кислоти. Вміст цукрів у середовищі розраховується таким чином, щоб загальний вміст лактату кальцію у культуральній рідині на момент завершення ферментації не перевищував 15%, що відповідає верхній межі розчинності лактату кальцію за даної температури [13].

Зброджену культуральну рідину нагрівають до  $70^\circ C$  і обробляють вапном до слаболужної реакції, після чого відстоюють впродовж декількох годин з метою коагуляції та осадження бактеріальних білків, завислих частинок крейди та інших домішок. Очищену культуральну рідину декантують та центрифугують [10, 13].

Очищений фільтрат лактату кальцію обробляють сірчаною кислотою з подальшим осадженням. З метою знебарвлення кінцевого продукту до фільтрату також вноситься активоване вугілля. Осаджений гіпс та вугілля відокремлюють фільтруванням, а очищену молочну кислоту концентрують на вакуум-випарних установках для запобігання руйнуванню молочної кислоти [10].

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Упарений водний розчин МК концентрацією 85%-90% на 2 години направляється в реактор поліконденсації за температури 160°C для отримання низькомолекулярного преполімеру. Низькомолекулярний преполімер направляється в реактор деполімеризації за температури 220°C та зниженого тиску для утворення циклічного димеру – лактиду. Випарений лактид очищають від залишків молочної кислоти з допомогою дистиляції. Конденсований лактид на 4 години направляється в реактор полімеризації заповнений азотом за температури 180°C з додаванням октоату олова (II) у розмірі 0,01% від внесеного лактиду для отримання високомолекулярного PLA. Високомолекулярний PLA охолоджується та подрібнюється в екструдері з утворенням пелет полімеру [8, 9].

### 1.3. Характеристика біологічного агента

Промислове гомоферментативне виробництво молочної кислоти на основі агропромислових відходів здійснюється за рахунок молочнокислих бактерій. Найчастіше використовують такі види як *Lactobacillus acidophilus*, а також підвиди *L.delbrueckii subsp.delbrueckii* та *L.delbrueckii subsp.bulgaricus*. Вибір конкретного продуценту залежить від джерела вуглецю, а також особливостей технологічного процесу та форми кінцевого продукту [14].

Перевагою застосування гомоферментативних видів є майже повна конверсія вуглеводів у складі ПС у цільовий продукт. Гомоферментативні МКБ метаболізують гексози та пентози шляхом Ембдена-Мейергофа та через пентозофосфатний шлях з теоретичним виходом МК у розмірі 1 г на 1 г внесених цукрів. Реальні ж значення виходу варіюються в залежності від мікроорганізму та середовища [15].

Одним з найбільш досліджених та перспективних у зброджуванні меляси мікроорганізмів є *L.delbrueckii subsp.delbrueckii*. Концентрація МК у культуральній рідині на момент завершення ферментації складає не менше 85 г/л при застосуванні розчину меляси, що відповідає вмісту цукрів у розмірі 100 г/л [14]. Деякі штами здатні ефективно метаболізувати розчини меляси з вмістом цукрів 190 г/л, що відповідає виходу МК 166 г/л [11]. Концентрація МК у культуральній рідині перебуває в прямій залежності від внесеної у середовище кількості цукрів.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Таким чином, у якості продуцента використано *L. delbrueckii subsp.delbrueckii*. Перевагою застосування даного підвиду є взаємозалежний зв'язок між ефективною утилізацією м'яса та її багатим хімічним складом, що виключає потребу у додаткових факторах росту, мінеральних компонентах тощо.

**Систематичне положення:**

- Домен – Бактерії
- Відділ – *Firmicutes*
- Клас – *Bacilli*
- Порядок – *Lactobacillales*
- Родина – *Lactobacillaceae*
- Рід – *Lactobacillus*
- Вид – *Lactobacillus delbrueckii*
- Підвид – *delbrueckii*

Морфолого-цитологічна характеристика:

Нерухомі та не здатні до утворення спор грам-позитивні палички розмірами 0,5-0,8×2-9 мкм, що утворюють довгі поодинокі ниткоподібні колонії [16].



Рисунок 1.1 – забарвлені за Грамом клітини *L.delbrueckii subsp.delbrueckii* [16]

					ДП ББ12.05.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

### ***Культуральна характеристика:***

На поживному середовищі (ПС) утворюють поодинокі прозорі колонії з гладкою поверхнею. Кількість колоній зростає при культивуванні в анаеробних або низькоокисневих умовах [16].

### ***Поживні потреби:***

У зв'язку з примітивним метаболізмом потребують значної кількості органічних речовин в поживному середовищі, як-то вітаміни групи В, амінокислоти та нуклеїнові кислоти. З мінеральних речовин необхідні солі натрію, калію, фосфору, заліза, мангану і марганцю [13].

### ***Біохімічна характеристика:***

Гомоферментативні мікроорганізми, єдиним кінцевим продуктом життєдіяльності є молочна кислота, синтез якої проходить через шлях Ембдена—Меєргофа. Ефективно метаболізують глюкозу, фруктозу, манозу та сахарозу. У зв'язку з застосуванням гліколізу у якості єдиного способу отримання енергії – факультативні анаероби. У зв'язку з виділенням молочної кислоти у якості єдиного продукту метаболізму – ацидофіли з оптимальним рН в межах 5,5-6,5. Підвищення або зниження кислотності призводить до погіршення або зупинки життєдіяльності. Термофіли з оптимальною температурою в межах 48-50°C [10, 13, 16].

На відміну від інших видів лактобацил не здатні до ферментації лактози, внаслідок чого не мають жодного застосування у молочній промисловості.

### ***Поширення в природі:***

Як і інші види лактобацил, широко присутні в оточуючому середовищі: ферментований рослинний матеріал, внутрішні органи та порожнини тварин і інші безкисневі середовища [16].

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						15
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

## РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

### 2.1 Схема перебігу процесів

Технологічний процес промислового виробництва PLA розпочинається з підготовки вихідної сировини. Культивування молочнокислих бактерій передбачає інвертування сахарози у вихідному розчині меляси з метою підвищення біодоступності середовища і прискорення подальшого процесу ферментації. Інвертуванням є процес гідролізу сахарози під дією органічних каталізаторів, наприклад ферменту інвертази, або ж в результаті нагрівання в присутності кислот.

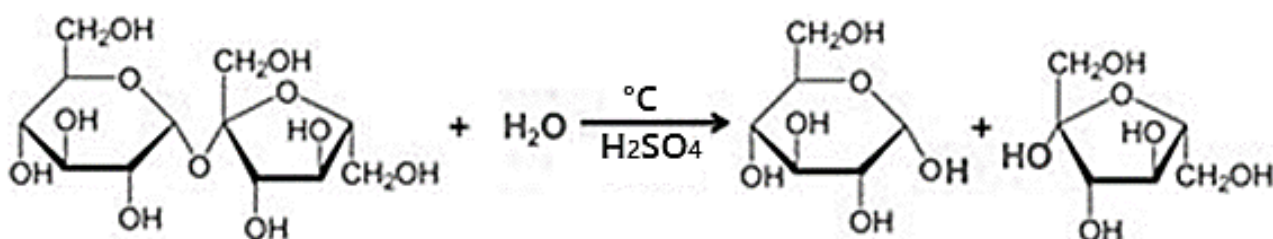


Рисунок 2.1 – Реакція інверсії сахарози [18]

Результатом процесу інвертування є взаємодія дисахариду з водою, з подальшим розкладанням на суміш глюкози та фруктози у співвідношенні 1:1, що має назву інвертний цукор [18].

У зв'язку з високою вартістю ферментів, промислова обробка сировини відбувається з допомогою кислотного гідролізу. Для ефективного інвертування меляси проводиться додавання 20% розчину сульфатної кислоти у співвідношенні 1:10 до присутніх у розчині цукрів [11]. Температура реакції може складати від 50 до 100°C, з оптимумом в межах 60°C-90°C. Тривалість реакції обернено-пропорційна температурі і складає від 20 хв до 2 годин [12].

Наступним етапом виробництва є гомоферментативне бродиння утворених моносахаридів молочнокислими бактеріями через шлях Ембдена-Меєргофа, результатом чого є утворення молочної кислоти.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
Розроб.		Григорусь Є.С.			Літ.	Арк.	Аркушів
Конс.						16	63
Керівн.		Дем'яненко			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затв.							
<b>БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ</b>							

В ході молочнокислого бродіння глюкоза та фруктоза метаболізуються до молочної кислоти. Даний процес включає фосфорилування гексоз до фруктозо-6-фосфату, а потім до фруктозо-1,6-біфосфату на пряму для фруктози та в результаті ізомеризації глюкозо-6-фосфату для глюкози [19]. Утворений біфосфат метаболізуються до пірувату в ході процесу гліколізу, в результаті чого з однієї молекули гексози синтезується дві молекули пірувату. Під дією лактатдегідрогенази синтезований піруват перетворюється в молочну кислоту [20].

Таким чином, з однієї молекули глюкози утворюється дві молекули молочної кислоти, тобто теоретичний вихід молочної кислоти складає 100% по відношенню до внесених цукрів.

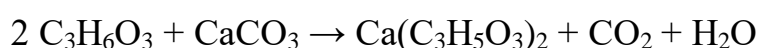
Загальне рівняння молочнокислого бродіння:



Реальний вихід молочної кислоти в результаті бродіння молочнокислими бактеріями складає 85%-90%, оскільки певна частина цукрів витратиться на забезпечення структурної функції бактерій [13].

Важливою умовою забезпечення молочнокислого бродіння є підтримка оптимальної температури та кислотності середовища в межах 50°C, рН 5,5. Зниження або підвищення даних параметрів призводить до сповільнення ферментативної активності молочнокислих бактерій. Окрім цього, в культуральній рідині відбувається накопичення МК, що призводить до зниження рН середовища і подальшої затримки накопичення цільового продукту [10, 13].

З метою нейтралізації МК впродовж усього процесу бродіння у ферментер додається крейда. Для забезпечення автоматизації процесу попередньо готується та стерилізується крейдове молоко – водний розчин крейди. В результаті процесу нейтралізації відбувається утворення розчинного у воді лактату кальцію:

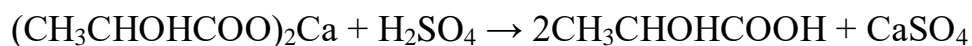


Розчинність лактату кальцію у воді за температури ферментації є лімітуючим фактором при виробництві молочної кислоти біотехнологічним шляхом і складає близько 15% при 50°C. Будь-яке подальше накопичення та нейтралізації МК

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

приведе до осадження кристалів лактату і втрати накопиченої кислоти у вигляді солі разом з біомасою при подальшому виділенні.

Після відділення лактату кальцію від бактеріальної біомаси проводиться його гідроліз з допомогою сірчаної кислоти з відновленням лактату до МК та осадженням сульфату кальцію – гіпсу.



Реакція проводиться при температурі 80°C впродовж 1 години, в результаті чого у розчині осідають кристали гіпсу.

Виробництво високоякісного PLA передбачає попередній синтез лактиду з молочної кислоти [21].

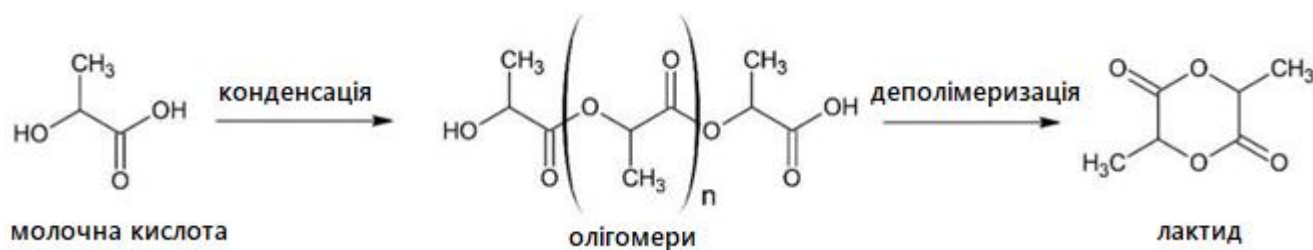


Рисунок 2.2 – Синтез лактидного димеру [21]

Виділена та упарена молочна кислота піддається реакції поліконденсації, що супроводжується видаленням води та утворенням низькомолекулярного PLA, вихід якого складає близько 80%-95% від внесеної кількості МК [22].

Температура реакції може складати від 160°C до 200°C. Тиск за якої проходить реакція обернено-пропорційний температурі і складає від 10 до 200 мм рт. ст.. Важливою умовою є висока концентрація вихідного розчину молочної кислоти в межах від 50% до 95%, з оптимумом у розмірі 85% та постійне видалення води з реакційної суміші у зв'язку з оборотністю реакції. Загальна тривалість близько 4 годин. Кінцевим продуктом є густа суміш дегідратованих олігомерів МК [22, 23, 24].

Наступним етапом є димеризація синтезованих олігомерів до лактиду завдяки реакції деполімеризації. Температура реакції може складати від 200°C до 240°C. Тиск за якої проходить реакція обернено-пропорційний температурі і складає від 10 до 50 мм рт. ст.. Тривалість реакції близько 3 годин. Кінцевим

продуктом є циклічний ефір, представлений двома залишками молекул молочної кислоти. Вихід лактиду складає близько 90% від вихідної маси суміші [22, 23, 24].

Фінальним етапом виробництва є каталітична полімеризація лактиду до полілактиду в присутності октаноату олова в інертній атмосфері азоту або аргону, що забезпечує розкриття кільця та збільшує полімерний ланцюг, в результаті чого синтезується високомолекулярний PLA. Температура реакції може складати від 160 до 220°C. Тривалість реакції складає від 1 до 3 годин. Частка внесеного октаноату складає 0,01% по відношенню до лактиду. Вихід PLA в ході реакції складає 93%-95% [23, 24, 25].

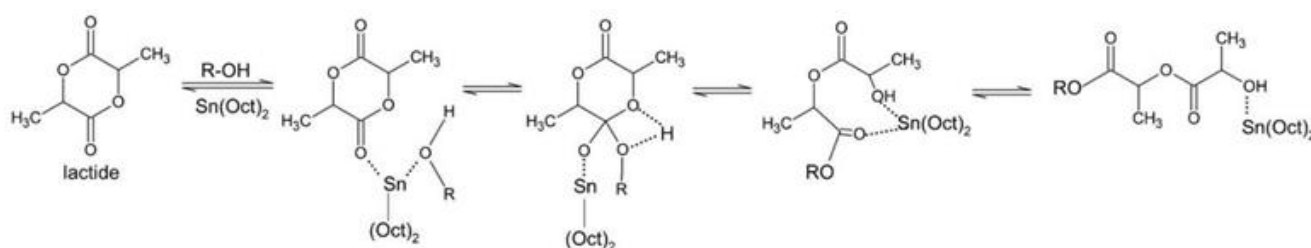


Рисунок 2.3 – Реакція розкладання лактиду з розкриттям кільця в присутності  $\text{Sn}(\text{Oct})_2$  з метою синтезу високомолекулярного PLA [21]

## 2.2 Характеристика кінцевого продукту

Кінцевим продуктом біосинтезу є молочна кислота, що регулюється згідно ДСТУ 4621:2006 Кислота молочна харчова.



L(+)-молочна кислота

D(-)-молочна кислота

Рисунок 2.4 – Структурна формула молочної кислоти [4]

Емпірична формула:  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$

Відносна молекулярна маса: 90,08 г/моль

Зовнішній вигляд: прозора сиропоподібна рідина без осаду та мути

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		19

Запах: слабкий, характерний МК

Смак: кислий, без сторонніх присмаків

Застосування: харчова промисловість у якості добавки Е 270

Харчова молочна кислота виробляється у 40%, 60% та 80% концентрації [4].

Кінцевим продуктом виробництва є гранули полімолочної кислоти – біорозкладного поліестеру, що володіє високою гнучкістю, міцністю та термостійкістю, яка не поступається іншим широкоживим видам пластмас, як-то поліетилен, поліпропілен чи полістерол. Завдяки своїм властивостям PLA може бути легко модифікований для застосування у різних галузях промисловості.

У медичній сфері PLA використовується для виготовлення стерильних пристроїв та розкладних імплантів, що не потребують видалення після операції. Усі компоненти на які розкладається полілактид уже присутні в організмі і не мають жодного токсичного ефекту на людину [8].

У текстильній промисловості PLA використовується у якості екологічної альтернативи уже існуючим синтетичним матеріалам. Полілактид здатен утворювати довгі, тонкі та міцні вологопоглинаючі волокна, що робить його привабливим матеріалом у виробництві серветок та одягу. Перспективним є виготовлення спортивного одягу з PLA завдяки його повітропроникності, теплоізоляції та здатності вбирати піт. Багатообіцяючим напрямком застосування PLA є автомобільна та меблева промисловість з можливістю виготовлення деталей інтер'єру авто або будинків, як-от килимки та елементи оздоблення [8].

Найбільш очевидним застосуванням PLA є виготовлення одноразового посуду та пакувальних матеріалів. Парадоксальним недоліком чистого полілактиду є його обмежені механічні та бар'єрні властивості, викликані швидкими процесами розкладання, що потребує вдосконалення методів полімеризації, додавання пластифікаторів або інших полімерів. Пакувальні матеріали з чистого PLA крихкі, ламкі і створюють значну кількість шуму при деформації. Найбільш перспективним є виготовлення одноразового посуду та харчових контейнерів для зберігання продуктів з коротким терміном придатності [8].

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Ще одним перспективним напрямком застосування PLA є так звана пластикультура – застосування пластмас у сільському господарстві з метою захисту ґрунтів, зрошення та виготовлення теплиць. Очевидною перевагою полілактиду є його здібність до розкладання, що позбавляє у потребі утилізації та переробки відпрацьованого матеріалу [8].

Багатообіцяючим є застосування PLA у біоремедіації. Полілактид, як і інші біорозкладні полімери, має високий потенціал у відновленні навколишнього середовища завдяки сорбційним властивостям, а також розкладанню з утворенням доступних джерел вуглецю з подальшим його використанням мікроорганізмами-денітрифікаторами [8].

Європейська та Американська асоціація управління відходами передбачає запобігання утворенню, переробку, відновлення та утилізацію будь-яких відходів. Перевагою PLA є можливість забезпечення даної ієрархії на усіх рівнях [8].

Додавання PLA до вже існуючих полімерів забезпечує зменшення кількості відходів на основі викопних джерел. Окрім очевидної екологічної переваги, дані композитні матеріали часто володіють покращеними механічними властивостями. PLA, як і інші види пластмас, може піддаватись повторному використанню у масштабі роздрібної торгівлі [8].

Іншим способом запобігання утворенню відходів є хімічна або механічна переробка відпрацьованого пластику. Хімічна переробка передбачає гідролізацію і повторний синтез високомолекулярного PLA на основі відходів, проте є занадто складним і високовартісним процесом. Більш перспективною є механічна переробка, що передбачає подрібнення та переплавлення [8].

Альтернативним методом переробки є компостування, яке також можна вживати по відношенню до PLA. Даний процес передбачає подрібнення, сортування та змішування PLA відходів з окиснювальними або гідролізуючими агентами, що забезпечує хімічне фрагментування полімерного ланцюга. Оброблена сировина піддається компостуванню, в ході чого відбувається асиміляція зруйнованих низькомолекулярних ланцюгів мікроорганізмами з виділенням води та вуглекислого газу [8].

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

PLA, як і інші види відходів, підлягає спалюванню з отриманням тепла. Очевидною перевагою такого методу є відсутність вуглецевого сліду, що дозволяє вивільняти закладену в полімер енергію та зберігати викопні ресурси. Окрім цього, PLA володіє високою теплотворною здатністю та не виділяє токсичних сполук в результаті згорання [8].

Найменш екологічним, але економічно вигідним є утилізація PLA на звалищах. Недоліком такого методу є значне накопичення даного матеріалу, у зв'язку з його тривалим періодом розкладання. Даний процес прискорюється при наявності певних значеннях температури та вологості, що забезпечують частковий гідроліз полімеру, але сильно залежать від розташування звалища [8].

					<i>ДП ББ12.05.000 ПЗ</i>	Арк.
						22
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

## РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1 Матеріали основні і допоміжні

Таблиця 3.1 – Характеристика сировини, матеріалів та напівпродуктів

Найменування	Категорія і номер НТД, згідно якої перевіряють показники	Показники, що обов'язкові для перевірки та їх нормативне значення	Примітка
<b>1. Основна сировина</b>			
1.1 Меляса бурякова	ДСТУ 3696-98	Масова частка сухих речовин не менше 75% Масова частка сахарози не менше 43% рН 6,5-8,5	Компонент ПС для ферментації
1.2 Дріжджовий екстракт	ТУ 9385-007-39484474-2003	КУО/г не більше $10^3$	Компонент ПС для ферментації
1.3 MRS-агар	-	Колір готового середовища – бурштиновий з легкою опалесценцією	Компонент ПС для підготовки посівного матеріалу
1.4 Вода питна	ДСТУ 7525:2014	КУО/см <sup>3</sup> не більше 100	Компонент ПС
<b>2. Допоміжна сировина</b>			
2.1 Вода питна	ДСТУ 7525:2014	рН 6,5-8,5	Допоміжні роботи, виробництво
2.2 Сірчана кислота	ДСТУ 2184:2018	Масова частка H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> не менше 94%	Допоміжні роботи, виробництво
2.3 Крейда	ДСТУ Б А.1.1-20-94	Масова частка CaCO <sub>3</sub> +MgCO <sub>3</sub> не менше 98,5%	Нейтралізація культуральної рідини

<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	
Розроб.		Григорусь Є.С.			
Конс.					
Керівн.		Дем'яненко			
Затв.					
<b>ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>			Літ.	Арк.	Аркушів
				23	63
			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		

Продовження таблиці 3.1

2.4 Вапно	ДСТУ Б В.2.7-90:2011	Масова частка СаО+MgO не менше 90%	Відокремлення крейди та колоїдів
2.5 Вугілля активне	ДСТУ 2965-94	Крупнозернистий порошок темно-сірого кольору	Очистка культуральної рідини
2.6 Октаноат олова	-	Рідина світло-жовтого кольору	Полімеризація лактиду
2.7 Спирт етиловий ректифікований	ДСТУ 4221:2004	Об'ємна частка етилового спирту не менше 96%	Дезінфекція робочих поверхонь
2.8 Засіб миючий синтетичний	ДСТУ 2972:2010	Гранульований порошок від білого до світло-жовтого кольору рН 7,5-11,5	Підготовка приміщень та обладнання
2.9 Гідроксид натрію	ДСТУ ISO 3196:2001	Масова частка гідроксиду натрію не менше 42%	Регенерація аніонітної колонки
<b>3. Матеріали</b>			
3.1 Фільтри повітряні	ДСТУ EN 779:2019	Згідно ДСТУ	Підготовка повітря
3.2 Мішки транспортувальні	ДСТУ EN 768:2005	Згідно ДСТУ	Пакування готових гранул
3.3 Етикетки для відвантаження	ДСТУ 15394:2020	Згідно ДСТУ	Пакування готових гранул
<b>4. Напівпродукти</b>			
4.1 Лактат кальцію	ДСТУ 8062:2015	Частка у культуральній рідині не менше 12,5%	Компонент нейтралізованої культуральної рідини
4.2 Молочна кислота	ДСТУ 4621:2006	Прозора рідина без осаду та муті з слабким характерним запахом	Продукт відновлення лактату кальцію
4.3 Полімолочна кислота	-	Залишків молочної кислоти не більше 5%	Продукт поліконденсації молочної кислоти
4.4 Лактид	-	-	Продукт розкладання полімолочної кислоти

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДП ББ12.05.000 ПЗ

Арк.

24

### 3.2 Контроль виробництва

Таблиця 3.2 – Точки і параметри контролю виробництва

Найменування стадії процесу, місце заміру параметра або відбору проби	Параметр	Частота контролю	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Метод контролю параметра, тип приладу
ДР 1.1 Нагрівання води	Температура води	Впродовж усього процесу	90°C	Термометр
ДР 1.2 Нагрівання масла	Температура масла	Впродовж усього процесу	230°C	Термометр
ДР 1.3 Генерація пари	Температура пари	Впродовж усього процесу	120°C	Термометр
	Тиск пари		0,2 МПа	Манометр
ДР 2.2.1 Підготовка розчину миючого засобу	Концентрація розчину	Після кожного процесу	Згідно інструкцій виробника	Дозатор
ДР 2.2.2 Підготовка розчину спирту	Концентрація розчину	Після кожного процесу	70%	Дозатор
ДР 2.3 Підготовка приміщень	Наявність забруднень	Після кожного процесу	Відсутні	Візуально
	Концентрація КУО у повітрі		< 100 КУО/100 см <sup>3</sup>	Седиментаційний посів на чашки Петрі
ДР 2.4.1 Миття обладнання	Наявність залишок речовин	Після кожного процесу	Відсутні	Візуально
ДР 2.4.2 Дезінфекція обладнання	Концентрація КУО на поверхні	Після кожного процесу	< 50 КУО/100 см <sup>2</sup>	Посів змиву на чашки Петрі

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ12.05.000 ПЗ

Арк.

25

Продовження таблиці 3.2

ДР 2.4.3 Стерилізація обладнання	Температура пари	Впродовж усього процесу	120°C	Термометр
	Тиск пари		P = 0,2 МПа	Манометр
ДР 3 Підготовка повітря	Різниця тисків після фільтру	Впродовж усього процесу	Не більше 1%	Манометр
	Температура повітря		20°C	Термометр
	Концентрація КУО		< 100 КУО/100 см <sup>3</sup>	Седиментацій ний посів на чашки Петрі
ДР 4 Підготовка крейдового молока	Частка крейди у суспензії	Після кожного процесу	22%	Дозатор
ДР 5.1 Гідроліз меляси	Температура середовища	Впродовж усього процесу	70°C	Термометр
	Кислотність середовища		pH = 1	pH-метр
ДР 5.2 Пастеризація поживного середовища	Температура середовища	Впродовж усього процесу	t = 70°C	Термометр
	Кислотність середовища		pH = 7	pH-метр
ДР 6.1 Вирощування культури в пробірках	Температура	Впродовж усього процесу	37°C,	Термометр
	Мікробіологічн а чистота середовища		Відсутність сторонніх колоній	Візуально
ДР 6.2 Вирощування культури в колбах- мішалках	Температура середовища	Впродовж усього процесу	37°C	Термометр
	Мікробіологічн а чистота інокуляту		Відсутність сторонньої мікрофлори	Мікроскопія
	Щільність колоній		800 кл/мл	Мікроскопія

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДП ББ12.05.000 ПЗ

Арк.

26

Продовження таблиці 3.2

ДР 6.3 Напрацювання культури в інокуляторах	Температура середовища	Впродовж усього процесу	37°C	Термометр
	Мікробіологічн а чистота інокуляту		Відсутність сторонньої мікрофлори	Мікроскопія
	Щільність колоній		800 кл/мл	Мікроскопія
ТП 7 Виробниче культивування	Температура середовища	Впродовж усього процесу	50°C,	Термометр
	Кислотність середовища		pH = 5,5-6,5	pH-метр
	Мікробіологічн а чистота середовища		Відсутність сторонньої мікрофлори	Мікроскопія
ТП 8.1 Обробка культуральної рідини вапном	Температура культуральної рідини	Впродовж усього процесу	80°C,	Термометр,
	Кислотність культуральної рідини		pH = 9	pH-метр
ТП 8.2 Фільтрація культуральної рідини	Температура культуральної рідини, що подається	Впродовж усього процесу	≥ 50°C	Термометр
ТП 8.3 Розкладання лактату кальцію	Температура фільтрату	Впродовж усього процесу	80°C,	Термометр
	Кислотність фільтрату		pH < 7	pH-метр
ТП 8.4 Очистка активним вугіллям	Температура розчину	Впродовж усього процесу	80°C	Термометр
ТП 8.6 Очистка на іообмінних колонках	Чистота молочної кислоти	Після кожного процесу	Згідно ДСТУ 4621:2006	Лабораторни й аналіз
ТП 9 Концентруванн я молочної кислоти	Температура в корпусі та сепараторі	Впродовж усього процесу	70°C	Термометр
	Тиск в корпусі та сепараторі		6,7 кПа	Вакуумметр

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДП ББ12.05.000 ПЗ

Арк.

27

Продовження таблиці 3.2

ТП 10 Поліконденсація молочної кислоти	Температура в реакторі	Впродовж усього процесу	160°C	Термометр
	Тиск в реакторі та колоні		6,7 кПа	Вакуумметр
	Температура ребойлеру		150°C	Термометр
	Температура дефлегматору		35°C	Термометр
ТП 11 Димеризація олігомерів	Температура в реакторі	Впродовж усього процесу	220°C	Термометр
	Тиск в реакторі та колоні		6,7 кПа	Вакуумметр
	Температура ребойлеру		160°C	Термометр
	Температура дефлегматору		140°C	Термометр
ТП 12 Полімеризація лактиду	Температура в реакторі	Впродовж усього процесу	180°C	Термометр
	Тиск в реакторі		103 кПа	Манометр
ТП 13.1 Екструзія полілактиду	Однорідність виходу розплаву	Впродовж усього процесу	Безперервний вихід стержнів	Візуально
ТП 13.2 Кристалізація полілактиду	Температура полілактиду на виході	Впродовж усього процесу	$t = 50^{\circ}\text{C}$	Термометр
ТП 13.3 Гранулювання полілактиду	Однорідність	Впродовж усього процесу	Повна однорідність	Візуально
ТП 13.4 Охолодження гранул	Температура	Впродовж усього процесу	$t = 20^{\circ}\text{C}$	Термометр
ПМВ 14 Пакування, маркування та відвантаження готового продукту	Маса готового продукту в пакетах	Після кожного процесу	$m = 100 \pm 1 \text{ кг}$	Промислові ваги
	Відсутність пошкоджень		Відсутні	Візуально

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДП ББ12.05.000 ПЗ

Арк.

28

### 3.3 Матеріальний баланс

#### Розрахунок складу поживного середовища:

Максимальна можлива концентрація лактату кальцію за температури ферментації складає близько 15%. Виходячи з рівняння нейтралізації, з 1 масової частки молочної кислоти утворюється 1,2 масових частки лактату. Таким чином максимальна концентрація молочної кислоти у кінцевому розчині повинна складати не більше:

$$C_{МК} = \frac{C_{\text{лактат}}}{1,2} = \frac{15\%}{1,2} = 12,5\%$$

Враховуючи, що ефективність зброджування цукрів у молочну кислоту культурами лактобацил складає близько 90%, концентрація цукрів у складі поживного середовища повинна складати не більше:

$$C_{\text{цукрів}} = \frac{C_{МК}}{0,9} = \frac{15\%}{0,9} \approx 14\%$$

Апарати для зброджування молочної кислоти на  $\frac{2}{3}$  заповнюються поживним середовищем, таким чином кількість поживного середовища необхідна для виробництва молочної кислоти у реакторі номінальним обсягом  $100 \text{ м}^3$  з урахуванням інокуляту на основі того ж ПС обсягом  $8 \text{ м}^3$  складає:

$$V_{\text{ПС}} = 100 \text{ м}^3 \cdot 0,66 + 8 \text{ м}^3 = 74 \text{ м}^3 = 74000 \text{ л}$$

Приймаємо, що густина ПС приблизно дорівнює густині води, таким чином необхідна кількість цукрів складає:

$$m_{\text{цукор}} = m_{\text{ПС}} \cdot 0,14 = 74000 \text{ кг} \cdot 0,14 = 10360 \text{ кг}$$

Кількість молочної кислоти, що утвориться:

$$m_{\text{МК}} = m_{\text{цукор}} \cdot 0,9 = 10360 \text{ кг} = 9324 \text{ кг}$$

Згідно ДСТУ вміст цукрів у буряковій мелясі складає не менше 43%, таким чином необхідна кількість бурякової меляси для приготування поживного середовища складає:

$$m_{\text{меляса}} = \frac{m_{\text{цукор}}}{0,43} = \frac{10360 \text{ кг}}{0,43} = 24093 \text{ кг}$$

Таким чином необхідний об'єм бурякової меляси складає:

$$V_{\text{меляса}} = \frac{m_{\text{меляса}}}{\rho_{\text{меляса}}} = \frac{24093 \text{ кг}}{1,34 \frac{\text{кг}}{\text{л}}} = 17980 \text{ л}$$

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

У якості азотного живлення до поживного середовища вноситься дріжджовий екстракт у розмірі 5%. Таким чином маса дріжджового екстракту складає:

$$M_{\text{екстракт}} = m_{\text{ПС}} \cdot 0,05 = 74000 \text{ кг} \cdot 0,05 = 3700 \text{ кг}$$

Інвертування меляси проводиться шляхом обробки 20% розчином сірчаної кислоти у перерахунку 1 об'ємна частина розчину кислоти на 10 масових частин цукрів у складі меляси, таким чином необхідна кількість розчину складає:

$$V_{\text{р.кисл}} = \frac{m_{\text{цукри}} \cdot 1 \frac{\text{л}}{\text{кг}}}{10} = \frac{10360 \cdot 1 \frac{\text{л}}{\text{кг}}}{10} = 1036 \text{ л}$$

Таким чином маса розчину складає:

$$V_{\text{кисл}} = \frac{m_{\text{кисл}}}{\rho_{\text{кисл}}} = \frac{1036 \text{ л}}{1,14 \frac{\text{кг}}{\text{л}}} = 909 \text{ кг}$$

Таким чином маса концентрованої кислоти складає:

$$m_{\text{кисл}} = m_{\text{р.кисл}} \cdot C_{\text{кисл}} = 909 \text{ кг} \cdot 0,2 = 182 \text{ кг}$$

Таким чином об'єм концентрованої кислоти складає:

$$V_{\text{кисл}} = \frac{m_{\text{кисл}}}{\rho_{\text{кисл}}} = \frac{182 \text{ кг}}{1,8 \frac{\text{кг}}{\text{л}}} = 101 \text{ л}$$

Перед початком ферментування необхідно провести нейтралізацію сірчаної кислоти, що міститься у поживному середовищі. Згідно рівняння нейтралізації, для обробки 1 кг сірчаної кислоти необхідно 1,02 кг крейди, таким чином витрата крейди складе:

$$m_{\text{крейда}} = m_{\text{кисл}} \cdot 1,02 = 182 \text{ кг} \cdot 1,02 = 185 \text{ кг}$$

Процес ферментування супроводжується нейтралізацією молочної кислоти крейдою. Згідно рівняння нейтралізації, для обробки 1 кг молочної кислоти необхідно 0,55 кг крейди, таким чином витрата крейди складає:

$$m_{\text{крейда}} = m_{\text{МК}} \cdot 0,55 = 9324 \text{ кг} \cdot 0,55 = 5128 \text{ кг}$$

Таким чином маса крейди для приготування крейдового молока складає :

$$m_{\text{крейда}} = 5128 \text{ кг} + 185 \text{ кг} = 5313 \text{ кг}$$

Таким чином об'єм крейди для приготування крейдового молока складає:

$$V_{\text{крейда}} = \frac{m_{\text{крейда}}}{\rho_{\text{крейда}}} = \frac{5313 \text{ кг}}{2,72 \frac{\text{кг}}{\text{л}}} = 1953 \text{ л}$$

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Внесення крейди у ферментер проводиться шляхом подачі крейдового молока з масовою часткою у суспензії у розмірі 22%. Таким чином маса суспензії складає:

$$m_{к.м} = \frac{m_{крейда}}{0,22} = \frac{5313 \text{ кг}}{0,22} = 24150 \text{ кг}$$

Таким чином маса води для приготування крейдового молока складає:

$$m_{вода} = m_{к.м} - m_{крейда} = 24150 \text{ кг} - 5313 \text{ кг} = 18837 \text{ кг}$$

Таким чином об'єм води для приготування крейдового молока:

$$V_{вода} = \frac{m_{вода}}{\rho_{вода}} = \frac{18837 \text{ кг}}{1 \frac{\text{кг}}{\text{л}}} = 18837 \text{ л}$$

Отже, загальний об'єм крейдового молока складає:

$$V_{к.м} = V_{вода} + V_{крейда} = 18382 \text{ л} + 1953 \text{ л} = 20790 \text{ л}$$

Отже, необхідний для приготування середовища об'єм води, з урахування сірчаної кислоти, що застосовується при інвертуванні меляси, крейдового молока, що застосовується для нейтралізації сірчаної кислоти та осадження лактату кальцію та меляси складає 35129 л.

Таблиця 3.3 – Матеріальний баланс виробництва (стадії)

Використано					Отримано				
Стадія	Назва сировини, матеріалів напівпродуктів	Одиниці вимірювання			Стадія	Назва сировини, матеріалів напівпродуктів	Одиниці вимірювання		
		кг	шт	дм <sup>3</sup>			кг	шт	дм <sup>3</sup>
ДР 4	Крейда			1953	ДР 3.2	Крейдове молоко			20790
	Вода питна			18937		Втрати			200
Всього		20990			Всього		20990		
ДР 5	Меляса			17980	ДР 4	Поживне середовище			54715
	Вода			35129		Втрати			2910
	Сірчана кислота			101					
	Крейдове молоко			725					
	Дріжджовий екстракт	3700							
Всього		57635			Всього		57635		

Продовження таблиці 3.3

ДР 6	Поживне середовище			8080	ДР 5	Інокулят			8080
						Втрати			80
Всього		8080			Всього		8080		
ТП 7	Поживне середовище			46635	ТП 6	Культуральна рідина			74000
	Інокулят			8000		Втрати			700
	Крейдове молоко			20065					
Всього		74700			Всього		74700		
ТП 8	Культуральне середовище			74000	ТП 7	Розчин молочної кислоти			68379
	Вапно	625				Осад	1924		
	Сірчана кислота			2475		Гіпсовий шлам	6517		
	Вугілля активне	620				Вугілля відпрацьоване	900		
Всього		77720			Всього		77720		
ТП 9	Розчин молочної кислоти			68379	ТП 8	Розчин молочної кислоти 90%			10360
						Конденсат			58019
Всього		68379			Всього		68379		
ТП 10	Молочна кислота	9324			ТП 9	Суміш олігомерів	8858		
	Вода	1036				Конденсат	1036		
						Молочна кислота	466		
Всього		10360			Всього		10360		
ТП 10	Суміш олігомерів	8858			ТП 10	Лактид	7972		
						Домішки	886		
Всього		8858			Всього		8858		
ТП 12	Лактид	7972			ТП 11	Полілактид	7900		
	Октаноат олова	1				Втрати	73		
Всього		7973			Всього		7973		

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДП ББ12.05.000 ПЗ

Арк.

32

Продовження таблиці 3.3

ПМВ 14	Полілактид	7900			ПМВ 14	Готовий товар	7900	79	
	Пакувальні продовольчі мішки		80			Втрати		1	
Всього		7980			Всього		7980		

**3.4 Опис технологічного процесу**

**ДР 1. Підготовка теплоносіїв**

**ДР 1.1 Нагрівання води**

У котлі з електронагрівом здійснюється нагрівання технічної та відпрацьованої води з метою підготовки теплоносія для підтримки температури середовища на етапах напрацювання культури продуценту та виробничого культивування. Температура води на виході з котла повинна складати 90°C.

**ДР 1.2 Нагрівання масла**

У котлі з електронагрівом здійснюється нагрівання відпрацьованого синтетичного масла, що застосовується в якості теплоносія на етапах полімеризації молочної кислоти у зв'язку з високою температурою необхідною для проведення даних реакцій. Температура масла на виході з котла повинна складати 230°C.

**ДР 1.3 Генерація пари**

У котлі з електронагрівом здійснюється нагрівання конденсату з метою генерації водяної пари, що використовується у якості теплоносія для стерилізації обладнання та роботи плівкового випарного апарату, а також нагрівання розчинів на етапах допоміжних робіт та основного технологічного процесу. Тиск пари на виході повинен складати 0,2 МПа, температура – 120°C.

**ДР 2. Санітарна підготовка виробництва**

Санітарна підготовка виробництва забезпечує дотримання належних виробничих умов впродовж усіх етапів технологічного процесу. Метою даної стадії є забезпечення якості кінцевої продукції, а також безпеки персоналу та навколишнього середовища. Санітарна підготовка регулює навчання та роботу персоналу, чистоту приміщень та стерильність виробничого обладнання, контроль якості вихідної сировини та утилізацію виробничих відходів. Санітарна підготовка

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

регулює моніторинг і контроль усього виробництва згідно відповідних стандартів ISO та GMP з веденням відповідної документації та протоколів.

### **ДР 2.1 Підготовка персоналу**

Підготовка персоналу забезпечує дотримання робітниками санітарних норм виробництва відповідно до існуючих регуляторних стандартів.

Перед прийомом на роботу працівники зобов'язуються пройти медичний огляд згідно наказу МОЗ України №246 від 21.05.2007 з метою запобігання станів, що можуть вплинути на безпеку виробництва.

Перед початком роботи усі працівники проходять первинний інструктаж з техніки безпеки згідно ст. 18 Закону України «Про охорону праці» з метою навчання загальним правилам безпеки, а також попередженню можливих біологічних, хімічних та фізичних ризиків на робочому місці. Робітників навчають роботі з обладнанням, правилам поведінки в чистих зонах, тощо.

Працівники, що працюють з біологічним матеріалом, обов'язково проходять гігієнічні процедури з миття та дезінфекції рук, а також лишають усі особисті речі, що можуть призвести до контамінації, як-то прикраси, гаджети та різні аксесуари поза робочим місцем.

### **ДР 2.2 Підготовка миючих та дезінфікуючих розчинів**

#### **ДР 2.2.1 Підготовка розчину миючого засобу**

У реактор-змішувач додається порошкоподібний миючий синтетичний засіб зі складу та гаряча вода з трубопроводу. Співвідношення миючого засобу та води визначається відповідно до інструкції виробника. Перемішування проводиться до повного розчинення миючого засобу. Готовий розчин використовується для ДР 2.3.1 та ДР 2.4.1

#### **ДР 2.2.2 Підготовка розчину спирту 70%**

У реактор-змішувач подається спирт етиловий ректифікований 96% зі складу та вода питна з трубопроводу.

### **ДР 2.3 Підготовка виробничих приміщень**

Підготовка виробничих приміщень забезпечує чистоту та стерильність на різних ділянках підприємства та всередині апаратів для культивування, що

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						34
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

передбачає механічне та вологе прибирання, а також дезінфекцію приміщень з відповідним класом чистоти.

#### **ДР 2.3.1 Миття приміщень**

Проводиться щоденне миття зон загального доступу та щозмінне миття чистих зон з допомогою розчину миючого засобу з ДР 2.2.1 з веденням відповідної документації. Відпрацьована вода та розчин направляється до ЗВ 15.

#### **ДР 2.3.2 Дезінфекція приміщень**

Проводиться дезінфекція попередньо очищених з допомогою мийного засобу поверхонь з допомогою 70% розчину спирту з ДР 2.2.2.

#### **ДР 2.4 Підготовка обладнання та комунікацій**

Підготовка обладнання та комунікацій забезпечує належний рівень очистки виробничих апаратів від фізичних, хімічних та біологічних забруднень.

#### **ДР 2.4.1 Миття обладнання та комунікацій**

Миття обладнання та комунікацій забезпечує первинну очистку від залишків мікроорганізмів та сировини з попередніх виробничих циклів та передбачає проведення попереднього ополіскування гарячою водою, миття з допомогою розчину миючого засобу з ДР 2.2.1 та фінальне ополіскування для видалення усіх забруднень. Відпрацьовані рідини направляються до ЗВ 15.

Для важкодоступних ділянок, або окремих компонентів у яких неможливо провести автоматизоване очищення проводиться ручна чистка. Якість очистки визначають візуально.

#### **ДР 2.4.2 Дезінфекція обладнання та комунікацій**

Дезінфекція забезпечує зниження концентрації мікроорганізмів в обладнанні та комунікаціях перед проведенням стерилізації та передбачає циркуляцію розчину спирту з ДР 2.2.2 по трубопроводах та очистку поверхонь апаратів.

#### **ДР 2.4.3 Стерилізація обладнання та комунікацій**

Стерилізація забезпечує повне знищення мікрофлори та передбачає подачу гострої пари з температурою 120°C під тиском 0,2 МПа впродовж 1 години безпосередньо у апарати та трубопроводи з попередньою їх перевіркою на герметичність.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						35
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

### **ДР 3. Підготовка повітря**

Даний етап забезпечує підготовку чистого повітря для приміщень С та D класу, у яких відбуватиметься напрацювання посівного матеріалу лактобацил перед процесом ферментації, а також забезпечує оптимальні умови мікроклімату на всьому підприємстві. Підготовка нестерильного очищеного повітря передбачає його механічну очистку від контамінантів на фільтрах попередньої та тонкої очистки, а також стабілізацію термодинамічних параметрів.

З допомогою повітрязабірника розташованого на висоті з мінімальною забрудненістю проводиться забір атмосферного повітря з навколишнього середовища. Повітря проходить крізь решітку та фільтр попередньої очистки з метою видалення великих часток бруду, розміром понад 5 мкм. З допомогою компресора забезпечується необхідний для руху тиск у розмірі 0,4 МПа, що забезпечує відбір повітря з атмосфери та подальше транспортування крізь кондиціонери та фільтри. Повітря направляється до теплообмінника та ресивера з метою стабілізації температури та вологи, після чого проходить крізь фільтр тонкої очистки з метою видалення дрібних забруднень розміром менше 5 мкм.

### **ДР 4. Підготовка крейдового молока**

У реактор-змішувач з номінальним об'ємом 25 м<sup>3</sup> вносять крейду та питну воду з трубопроводу. Суміш перемішують до досягнення повної однорідності, після чого у сорочку реактора подається гострий пар з температурою 120°C під тиском 0,2 МПа. Суміш стерилізується кип'ятінням впродовж 20 хв та підтримується у суспендованому стані впродовж усього процесу. Температура стерилізованої суспензії підтримується в межах 50°C. Крейдове молоко направляється до ДР 5 та ТП 7.

### **ДР 5 Підготовка поживного середовища**

#### **ДР 5.1 Гідроліз меляси**

У реактор-змішувач з номінальним об'ємом 80 м<sup>3</sup> подається бурякова меляса, питна вода з трубопроводу та концентрована сірчана кислоти. Суміш гомогенізується якірною мішалкою з частотою обертання 32 об/хв, після чого у сорочку реактора подається гострий пар з температурою 120°C під тиском 0,2 МПа.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						36
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

Розчин нагрівається до 70°C та витримується впродовж 30 хвилин з метою інвертування сахарози та зниження мікробного навантаження меляси.

### **ДР 5.2 Пастеризація**

Після завершення інвертування у реактор по трубопроводу подається крейдове молоко з метою нейтралізації залишків сірчаної кислоти. До нейтралізованого середовища через люк додається дріжджовий екстракт, після чого проводиться пастеризація суміші при 70°C впродовж ще однієї години. Поживне середовище направляється до ДР 6 та ТП 7.

### **ДР 6 Підготовка інокуляту**

#### **ДР 6.1 Вирощування культури в пробірках**

Музейну культуру продуценту *Lactobacillus delbrueckii subsp.delbrueckii* висівають в пробірки з MRS агаром та культивують у термостаті впродовж 24 годин при 37°C. Приготування агару відбувається шляхом розчинення 68,2 г середовища в 1 л води з подальшим автоклавуванням при 120°C впродовж 15 хв.

#### **ДР 6.2 Вирощування культури в колбах-мішалках**

Культивовану в пробірках музейну культуру пересівають в колби-мішалки на 500 мл, що містять 250 мл MRS агару та культивують впродовж 24 годин при 37°C з частотою обертання 200 об/хв. В ході процесу контролюється мікробіологічна чистота та щільність колоній продуценту у середовищі.

#### **ДР 6.3 Напрацювання культури в інокуляторах**

Культуру продуценту почергово культивують у ферментерах номінальним об'ємом 0,1 м<sup>3</sup>, 1 м<sup>3</sup> та 10 м<sup>3</sup> з коефіцієнтом заповнення 0,8 впродовж 24 годин при температурі 37°C на поживному середовищі від ДР 5. В ході процесу контролюється мікробіологічна чистота та щільність колоній продуценту у середовищі. Заповнення реакторів контролюється рівнеміром.

### **ТП 7. Виробниче культивування**

У ферментер об'ємом 100 м<sup>3</sup> з подається пастеризоване поживне середовища від ДР 5 та інокулят від ДР 6. Культивування проводиться за температури 50°C впродовж 3-4 діб з поступовим додаванням суспензії крейдового молока з метою

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

підтримки слабокислого рН у розмірі 5,5-6,5 та нейтралізації накопиченої молочної кислоти.

## **ТП 8. Виділення молочної кислоти**

Даний етап передбачає отримання чистого розчину молочної кислоти з культуральної рідини яка містить бактеріальну масу, а також залишки крейди, органічних та неорганічних речовин, що містились в мелясі.

### **ТП 8.1 Обробка культуральної рідини вапном**

До культуральної рідини, безпосередньо у ферментері, при постійному перемішуванні вносять вапно після чого проводять нагрівання до 80°C, декантацію впродовж 6-12 годин та направляють на прес фільтр. З метою запобігання кристалізації та втрати лактату кальцію, температура розчину впродовж усього процесу декантації повинна складати не менше 50°C.

### **ТП 8.2 Фільтрація культуральної рідини**

Декантовану культуральну рідину направляють на прес-фільтр з метою відділення розчину лактату кальцію від бактеріальної біомаси. Відділений осад направляється до ЗВ 15. Відвантаження осаду відбувається шляхом продування фільтрувальної тканини повітрям з подальшим промиванням водою для видалення залишок біомаси.

### **ТП 8.3 Розкладання лактату кальцію**

У реактор-змішувач номінальним об'ємом 100 м<sup>3</sup> вноситься фільтрат з лактатом кальцію після чого поступово, при постійному перемішуванні, по трубопроводу подається концентрована сірчана кислота. Після завершення розчинення перемішування припиняється, а у сорочку реактора подається водяна пара до досягнення розчином температури у розмірі 80°C. Розчин витримують впродовж 1 години для формування кристалів гіпсу.

### **ТП 8.4 Очистка активним вугіллям**

До розчину відновленої молочної кислоти та гіпсу при постійному перемішуванні вноситься активне вугілля зі складу. Суміш витримується впродовж 30 хв для адсорбції залишкових органічних речовин, після чого направляється на фільтрацію.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						38
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

### **ТП 8.5 Фільтрація молочної кислоти**

Гіпсовий та вугільний шлам відокремлюються від розчину на барабанному вакуум-фільтрі, після чого направляються до ЗВ 15. Фільтрат направляється на очистку від мінеральних домішок.

### **ТП 8.6. Очистка на іонобмінних колонках**

Розчин молочної кислоти остаточно очищається шляхом нижньої подачі на катіонітну колонку заповнену смолою Ку-2.8-чС та аніонітну колонку заповнену смолою АВ-16ГС. Очищений розчин подається на концентрування до плівкового випарника. Регенерація смоли колонок здійснюється шляхом подачі розчинів сірчаної кислоти та гідроксиду натрію після вичерпання іонобмінної ємності. Відпрацьовані розчини для регенерації направляються до ЗВ15.

### **ТП 9. Концентрування молочної кислоти**

Очищений від органічних домішок розчин молочної кислоти подається на плівковий випарний апарат з внутрішнім тиском у розмірі 6,7 кПа та температурою труб у корпусі у розмірі 70°C в результаті чого відбувається випаровування води та концентрування молочної кислоти. Випарена з розчину молочної кислоти вода конденсується у барометричному конденсаторі та направляється на рециркуляцію.

### **ТП 10. Поліконденсація молочної кислоти**

Концентрований розчин молочної кислоти направляється в реактор-змішувач з номінальним об'ємом 12 м<sup>3</sup>, внутрішнім тиском у розмірі 6,7 кПа та температурою 160°C та витримується впродовж 4 годин, в результаті чого відбувається поліконденсація молочної кислоти з утворенням низькомолекулярних олігомерів. Нагрівання суміші проводиться поступово, з підвищенням температури реактора не більш ніж на 10°C щохвилини. У якості теплоносія застосовується синтетичне масло. Пари води та молочної кислоти направляються на ректифікаційну колону з метою конденсації та повернення молочної кислоти у реактор та видалення парів води через ежектор. Температура до якої нагрівається молочна кислота у ребойлері складає 150°C, що відповідає її точці кипіння за даного тиску. Температура до якої охолоджується вода у дефлегматорі складає 35°C, що відповідає її точці конденсації за даного тиску.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						39
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

## ТП 11. Димеризація олігомерів

Суміш низькомолекулярних полімерів направляється в реактор-змішувач з номінальним об'ємом 10 м<sup>3</sup>, внутрішнім тиском у розмірі у розмірі 6,7 кПа та температурою 220°C та витримується впродовж 3 годин в результаті чого відбувається деполімеризація олігомерів молочної кислоти з утворенням лактиду. Нагрівання проводиться шляхом подачі гарячого синтетичного масла у сорочку реактора. Пари залишкової молочної кислоти та лактиду направляються на ректифікаційну колону з метою видалення парів молочної кислоти через ежектор та конденсації лактиду для проведення подальшої полімеризації. Температура до якої нагрівається лактид у ребойлері складає 160°C, що відповідає його точці кипіння за даного тиску. Температура до якої охолоджується кислота у дефлегматорі складає 140°C, що відповідає її точці конденсації за даного тиску.

## ТП 12. Полімеризація лактиду

В реактор-змішувач з номінальним об'ємом 10 м<sup>3</sup> вноситься октаноат олова зі складу, після чого проводиться герметизація та вакуумування апарату до тиску 6,3 кПа з подальшим внесенням конденсованого лактиду. Апарат продувається азотом до досягнення атмосферного тиску з метою переведення лактиду у нормальну атмосферу та створення інертного середовища для полімеризації. Лактид нагрівається до 180°C та витримується в присутності каталізатора впродовж 2 годин, що забезпечує реакцію полімеризації з 95% виходом кінцевого продукту. Нагрівання здійснюється шляхом подачі гарячого синтетичного масла у сорочку реактора.

## ТП 13. Виробництво гранул

### ТП 13.1 Екструзія полілактиду

Розплавлений полілактид направляють в екструдер з метою продавлювання та формування довгих стержнів.

### ТП 13.2 Кристалізація полілактиду

Сформовані стержні направляються до кристалізатору з водяним охолодженням з метою зниження температури нижче 60°C, що відповідає точці склування PLA.

					ДП ББ12.05.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

### **ТП 13.3 Грануляція**

Охолоджені стержні подаються в гранулятор, де нарізаються на гранули відповідного розміру.

### **ТП 13.4 Охолодження**

Готовий продукт охолоджують на стрічковій сушарці до кімнатної температури з метою запобігання злипанню гранул PLA та видалення залишків вологи з етапу кристалізації.

### **ПМВ 14. Пакування, маркування та відвантаження готового продукту**

Охолоджені гранули пакують у продовольчі транспортувальні пакети обсягом 100 кг, маркують та відвантажують.

### **ЗВ 15. Знешкодження відходів**

Відпрацьовані рідкі відходи направляються на нейтралізацію та очистку з подальшим злиттям в систему стічних вод.

Відпрацьована вода, конденсат та синтетичне масло підлягають рециркуляції з повторним використанням у якості теплоносія.

Органічний осад, гіпсовий шлам та відпрацьоване вугілля направляється на утилізацію на полігонах ТПВ.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						41
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

## РОЗДІЛ 4. ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ

### Розрахунок теплофізичних властивостей розчину меляси:

Розрахунок проводиться з метою визначення динамічної в'язкості, теплоємності та теплопровідності розчину меляси за визначеної концентрації та температури для вибору оптимальної конструкції апарата для підготовки поживного середовища з подальшим проведенням його конструктивного та теплового розрахунку.

#### **Вихідні дані:**

Концентрація меляси у розчині (С) – 40%

Температура розчину початкова ( $t_{п}$ ) – 20°C

Температура розчину кінцева ( $t_{к}$ ) – 70°C

#### **Розрахунок вмісту сухих речовин:**

Вважаємо що масова частка сухих речовин в мелясі відповідає мінімальним вимогам ДСТУ і складає не менше 75%, таким чином, масова частка сухих речовин у розчині складає:

$$CP = C \cdot 0,75 = 40\% \cdot 0,75 = 30\%$$

#### **Динамічна в'язкість розчину:**

У зв'язку з відсутністю формули що описує в'язкість розчину меляси при концентрації сухих речовин від 26,3% до 45% використано подвійну інтерполяцію:

$$\mu_{20^{\circ}\text{C}} = 3,88 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

#### **Теплоємність розчину:**

$$c = 4,073 - 0,00134 \cdot (14,4 \cdot CP - t)$$

$$c_{20^{\circ}\text{C}} = 4,073 - 0,00134 \cdot (14,4 \cdot 30 - 20) = 3,52 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_{70^{\circ}\text{C}} = 4,073 - 0,00134 \cdot (14,4 \cdot 30 - 70) = 3,59 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

#### **Теплопровідність розчину:**

$$\lambda = 0,5646 \cdot t^{0,0879} \cdot CP^{-0,135} = 0,5646 \cdot 20^{0,0879} \cdot 30^{-0,135} = 0,46 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
Розроб.		Григорусь Є.С.			<b>ПІДБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ</b>		
Конс.							
						42	63
Керівн.		Дем'яненко			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затв.							

### ***Кінематична в'язкість розчину:***

$$V_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\frac{m_{\text{мяляса}} + m_{\text{вода}} + m_{\text{кисл}}}{V_{\text{мяляса}} + V_{\text{вода}} + V_{\text{кисл}}}} = \frac{3,88 \cdot 10^{-2} \text{ Па}\cdot\text{с}}{\frac{24093 \text{ кг} + 35129 \text{ кг} + 182 \text{ кг}}{17,98 \text{ м}^3 + 35,129 \text{ м}^3 + 0,101 \text{ м}^3}} = \frac{3,88 \cdot 10^{-2} \text{ Па}\cdot\text{с}}{1116,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 3,48 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

### **Вибір апарату:**

Враховуючи високий коефіцієнт динамічної в'язкості, оптимальним вибором для приготування розчину буде використання змішувача з якірною мішалкою.

Можливість перемішування в'язких рідин, інтенсифікація теплообміну, попередження випадання осаду на стінках і днищі та переведення в завислий стан твердих частинок у в'язких середовищах робить дану конструкцію найбільш оптимальною для приготування поживного середовища на основі інвертованої мяляси. Недоліком даної мішалки є високий коефіцієнт гідравлічного опору, що може викликати високі витрати енергії на роботу перемішувача.

### **Конструктивний розрахунок:**

Метою розрахунку є визначення основних геометричних розмірів апарата та його конструктивних елементів з подальшим їх вибором з відповідної лінійки стандартного обладнання.

### ***Номінальний об'єм апарата:***

Приймаємо, що коефіцієнт заповнення складає 0,7:

$$V_{\text{н}} = \frac{V_{\text{мяляса}} + V_{\text{вода}} + V_{\text{кисл}}}{0,7} = \frac{17,98 \text{ м}^3 + 35,129 \text{ м}^3 + 0,101 \text{ м}^3}{0,7} = \frac{53,21 \text{ м}^3}{0,7} = 76 \text{ м}^3$$

Отже, мінімальний об'єм апарата повинен складати 76 м<sup>3</sup>. Найближче значення номінального об'єму для апаратів з механічними перемішувачами складає 80 м<sup>3</sup>.

### ***Товщина стінки:***

$$\delta = \frac{D \cdot P}{2[\sigma]\phi - P} + C,$$

де P – тиск в апараті, прийmemo значення з стандартного ряду 0,3 МПа;

σ – нормативне допустиме напруження сталі (приймаємо, що апарат зроблений з сталі Х18Н10Т) складає 130 МПа;

φ – коефіцієнт ослаблення через зварний шов, приймається 0,8;

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

C – поправка на корозію, найчастіше приймається 1 мм. У відповідальних випадках 2-3 мм;

$$\delta = \frac{3600 \text{ мм} \cdot 0,3 \text{ МПа}}{2 \cdot 130 \text{ МПа} \cdot 0,8 - 0,3 \text{ МПа}} + 3 \text{ мм} = 8,2 \text{ мм}$$

Отже, мінімальна товщина стінки обичайки та днища повинна бути не менше 8,2 мм. Характеристики апарату, згідно стандартного ряду еліптичних днищ та апаратів з механічними перемішуючими пристроями:

- номінальний об'єм:  $80 \text{ м}^3$
- товщина обичайки:  $\delta = 16 \text{ мм}$
- висота апарату:  $H = 8500 \text{ мм}$
- внутрішній діаметр апарату:  $D = 3600 \text{ мм}$
- висота відбортованої частини днища:  $h_b = 900 \text{ мм}$
- висота еліптичної частини днища:  $h_1 = 60 \text{ мм}$
- об'єм днища:  $V_{\text{дн}} = 6,69 \text{ м}^3$
- площа днища:  $F = 14,73 \text{ м}^2$

**Розміри мішалки:**

$$\frac{D}{d_M} = 1,05 \div 1,03$$

$$d_M = \frac{D}{1,3} \div \frac{D}{1,05} = \frac{3600}{1,3} \div \frac{3600}{1,05}$$

$$d_M = 2769 \div 3428 \text{ (мм)}$$

Приймаємо  $d_M = 2800 \text{ мм}$

$$\frac{h_M}{d_M} = 0,8 \div 1$$

$$h_M = 0,8 \cdot d_M \div 1 \cdot d_M$$

$$h_M = 2240 \div 2800 \text{ (мм)}$$

Приймаємо  $h_M = 2800 \text{ мм}$

$$\frac{b}{d_M} = 0,01 \div 0,06$$

$$b_M = 0,01 \cdot d_M \div 0,06 \cdot d_M$$

$$b_M = 28 \div 168 \text{ (мм)}$$

Приймаємо  $b_M = 168 \text{ мм}$

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



$$N_p = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_M^5 = 2 \cdot (1116,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}) \cdot (0,53 \text{ с}^{-1})^3 \cdot (2,8 \text{ м})^5 = 57\,209 \text{ кВт} = 57,2 \text{ кВт}$$

**Діаметр валу:**

$$d_B = C \cdot d_M = 0,04 \cdot 2800 \text{ мм} = 112 \text{ мм}$$

**Потужність на подолання тертя в торцевому ущільненні:**

$$N_{\text{ущ}} = 6020 \cdot d_B^{1,3} = 6020 \cdot 0,112^{1,3} = 350 \text{ Вт}$$

**Коефіцієнт рівня рідини в апараті:**

$$K_H = \sqrt{\frac{H_p}{D}} = \sqrt{\frac{5,53}{3,6}} = 1,24$$

**Потужність привода мішалки:**

$$N_{\text{ел}} = \frac{K_n \cdot K_H \cdot N + N_{\text{ущ}}}{\eta}$$

Де  $K_n = 1,25$  для апаратів без перегородок;

$\eta$  = коефіцієнт корисної дії привода, приймаємо 0,9;

$$N_{\text{ел}} = \frac{1,25 \cdot 1,24 \cdot 57209 \text{ Вт} + 350 \text{ Вт}}{0,9} = 89\,024 \text{ Вт} = 89 \text{ кВт}$$

Приймаємо нормалізований вертикальний привід механічного перемішуючого пристрою з кінцевою опорою та мотором-редуктором типу МПО2 потужністю 100 кВт.

**Розрахунок діаметру штуцерів:**

Розрахунок проводиться з метою визначення достатнього розміру штуцерів для швидкого заповнення і вивантаження реактора.

Рекомендована швидкість в штуцерах складає 0,5-3 м/с для рідин та 20-30 м/с для водяної пари. Розрахунок діаметру проводиться згідно формули:

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{4G}{\pi \cdot w \rho}}$$

де  $G$  – масова витрата речовини,  $w$  – швидкість потоку речовини в штуцері,  $\rho$  – густина речовини при заданій температурі.

Розрахуємо масові витрати води, меляси, кислоти, крейдового молока, готового поживного середовища, а також пари і конденсату. Приймаємо, що заповнення та вивантаження середовища займає менше однієї години. Нагрівання, а отже витрата водяної пари та конденсату, реалізується за одну годину:

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$V_{\text{вода}} = \frac{35,129 \text{ м}^3}{3600 \text{ с}} = 0,01 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$V_{\text{м'яса}} = \frac{17,98 \text{ м}^3}{3600 \text{ с}} = 0,005 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$V_{\text{кисл}} = \frac{0,101 \text{ м}^3}{300 \text{ с}} = 0,0004 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$V_{\text{к.молоко}} = \frac{0,75 \text{ м}^3}{300 \text{ с}} = 0,0025 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$V_{\text{середовище}} = \frac{53,96 \text{ м}^3}{3600 \text{ с}} = 0,015 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$d_{\text{шт.вода}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,01 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}}{3,14 \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 0,16 \text{ м, приймаємо } 200 \text{ мм}$$

$$d_{\text{шт.м'яса}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,005 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}}{3,14 \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 0,112 \text{ м, приймаємо } 125 \text{ мм}$$

$$d_{\text{шт.кислота}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0004 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}}{3,14 \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 0,032 \text{ м, приймаємо } 40 \text{ мм}$$

$$d_{\text{шт.к.молоко}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0025 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}}{3,14 \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 0,08 \text{ м, приймаємо } 80 \text{ мм}$$

$$d_{\text{шт.середовище}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,015 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}}{3,14 \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 0,195 \text{ м, приймаємо } 200 \text{ мм}$$

$$d_{\text{шт.пов'тря}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,015 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}}{3,14 \cdot 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 0,031 \text{ м, приймаємо } 40 \text{ мм}$$

$$d_{\text{шт.пар}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}}{3,14 \cdot 30 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} = 0,224 \text{ м, приймаємо } 250 \text{ мм}$$

$$d_{\text{шт.конденсат}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}}{3,14 \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 959 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} = 0,059 \text{ м, приймаємо } 80 \text{ мм}$$

Розміри штуцерів приймаються згідно ДСТУ 12820:2008 для апаратів з робочим тиском до 0,6 МПа.

### ***Розрахунок опори:***

Маса еліптичних днищ діаметром 3600 мм та 3800 мм з товщиною стінки 16 мм складає 1864 кг та 2086 кг відповідно. Маса циліндричної обичайки та сорочки складає 3220 кг та 3786 кг. Маса приводу складає 1640 кг. Маса апарату складає:

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$m_{\text{апарат}} = m_{\text{привід}} + 2 \cdot m_{\text{ел.р}} + m_{\text{об.р}} + m_{\text{об.сop}} + m_{\text{ел.дн.сop}}$$

$$m_{\text{апарат}} = 1640 \text{ кг} + 2 \cdot 1864 \text{ кг} + 3220 \text{ кг} + 3786 \text{ кг} + 2086 \text{ кг} = 14460 \text{ кг}$$

Приймаємо, що під час гідравлічного випробування апарат наповнюється водою у кількості  $70 \text{ м}^3$ :

$$m_{\text{рідина}} = 70 \text{ м}^3 \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 70000 \text{ кг}$$

Сумарна маса апарату під час заповнення складає:

$$m_{\text{сумарна}} = m_{\text{апарат}} + m_{\text{рідина}}$$

$m_{\text{сумарна}} = 14460 \text{ кг} + 70000 \text{ кг} = 84460 \text{ кг}$ , отже приведене навантаження складає  $\approx 0,85 \text{ МН}$ . Обираємо циліндричну опору І типу з максимальним приведеним навантаженням до  $1,32 \text{ МН}$  згідно ГСТУ 3-17-193-2000.

### **Тепловий розрахунок:**

Розрахунок проводиться з метою визначення необхідної кількості гарячого теплоносія. Приймаємо, що у якості теплоносія використовується водяна пара з температурою  $120^\circ\text{C}$  та робочим тиском  $0,2 \text{ МПа}$ . Вважаємо, що нагрівання проводиться для розчину температурою  $20^\circ\text{C}$  та триває близько 1 години.

### **Площа теплообміну:**

$$S_{\text{цил}} = H \cdot \pi \cdot D = 6,58 \cdot 3,14 \cdot 3,6 \text{ м} = 74,38 \text{ м}^2$$

$$F = S_{\text{цил}} + S_{\text{дн}} = 74,38 \text{ м}^2 + 14,73 \text{ м}^2 = 89,11 \text{ м}^2$$

### **Теплота необхідна для нагріву:**

$$Q_{\text{н}} = m_{\text{р}} \cdot c_{\text{ср}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{п}}) = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot V_{\text{р}} \cdot \frac{c_{20^\circ\text{C}} + c_{70^\circ\text{C}}}{2} \cdot (70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{н}} = 59404 \text{ кг} \cdot \frac{3520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} + 3590 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}}{2} \cdot 50^\circ\text{C} = 1,06 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$$

### **Теплота перемішування:**

$$Q_{\text{дис}} = N \cdot \tau = 89\,024 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Дж}$$

### **Тепловий баланс:**

$$Q_{\text{т}} = 1,02 \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{\text{дис}}),$$

де  $1,02$  – коефіцієнт для урахування втрат

$$Q_{\text{т}} = 1,02 \cdot (1,06 \cdot 10^{10} \text{ Дж} - 3,2 \cdot 10^8 \text{ Дж}) = 1,03 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$$

### **Витрата теплоносія:**

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$G_T = \frac{Q_T}{r \cdot \tau},$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення при  $120^\circ\text{C}$

$$G_T = \frac{1,03 \cdot 10^7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}}{2208 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 3600 \text{ с}} = 1,3 \text{ кг/с}$$

**Середня різниця температур:**

$$t_6 = 120^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 100^\circ\text{C}$$

$$t_M = 120^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$$

$$t_{cp} = \frac{t_6 + t_M}{2} = \frac{100^\circ\text{C} + 50^\circ\text{C}}{2} = 75^\circ\text{C}$$

**Прандтля для середовища:**

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda} = \frac{3520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,0388 \text{ Па} \cdot \text{с}}{0,46 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}} = 297$$

**Нуссельта для середовища:**

$$Nu = 0,36 \cdot Re^{0,67} \cdot Pr^{0,33} = 0,36 \cdot (1,19 \cdot 10^5)^{0,67} \cdot (297)^{0,33} = 5928$$

**Тепловіддача середовища:**

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} = \frac{5928 \cdot 0,46}{3,6} = 757 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

**Температура стінки корпусу:**

Приймаємо різницю температур між стінкою апарата і насиченою парюю:

$$\Delta t = 0,5 \cdot t_{cp} = 37,5^\circ\text{C}$$

Температура стінки корпусу в такому випадку:

$$t_{ст} = t_{пар} - \Delta t = 120^\circ\text{C} - 37,5^\circ\text{C} = 82,5^\circ\text{C}$$

Теплофізичні властивості конденсату за даної температури:

$$\lambda_{ст} = 0,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$C_{ст} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\mu_{ст} = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$Pr_{ст} = 2,11$$

**Середня температура конденсату:**

$$t_k = \frac{t_{пар} + t_{ст}}{2} = \frac{120^\circ\text{C} + 82,5^\circ\text{C}}{2} = 101,25^\circ\text{C}$$

Теплофізичні властивості конденсату за даної температури:

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



## РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

Виробництво PLA передбачає великотоннажний прийом, зберігання та обробку рідких та сипких речовин, таких як меляса, сірчана кислота, крейда, вапно та вугілля. Обробка речовин та напівпродуктів передбачає застосування апаратів, що працюють під високою температурою і тиском, з метою підготовки теплоносіїв, а також апаратів, що працюють в умовах вакууму, з метою полімеризації молочної кислоти. Окрім цього, в результаті виробництва утворюється значна кількість рідких, твердих та газоподібних відходів, що вимагають належної утилізації.

Прийом, транспортування та зберігання меляси на підприємстві здійснюється у залізничних або автомобільних цистернах та резервуарах згідно ДСТУ 3696-98.

Прийом концентрованої сірчаної кислоти проводиться згідно ДСТУ 2184:2018 у спеціалізованих кислотостійких цистернах з позначкою «Небезпечно». Транспортування сірчаної кислоти в межах підприємства здійснюється шляхом перекачування по спеціалізованим трубопроводам з нержавіючої сталі.

Транспортування вапна, крейди та вугілля активного здійснюється вантажівками або залізничними вагонами згідно ДСТУ Б В.2.7-90:2011, ДСТУ Б А.1.1-20-94 та ДСТУ 2965-94. Відвантаження крейди та вапна проводиться насипом з подальшим зберігання у спеціально відведених приміщеннях складу з низьким вмістом вологи. Вугілля зберігається в окремому приміщенні складу з відсутністю речовин, що містять леткі компоненти та вологи. Працівники, що контактують з сипкими матеріалами, забезпечуються масками або респіраторами згідно ДСТУ EN 149:2017.

Усі роботи з прийому сировини проводять згідно НПАОП 0.00-1.75-15 та НПАОП 0.00-1.8-18 з використанням спеціалізованого обладнання та дотриманням відповідних правил безпеки. Усі складські споруди повинні відповідати ДБН В2.2-43:2021 та враховувати фізико-хімічні властивості речовин, що зберігаються.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>			
<i>Розроб.</i>		Григорусь Є.С.			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Конс.</i>						51	63
<i>Керівн.</i>		Дем'яненко			<b>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ</b>		
<i>Затв.</i>							

Роботи, що передбачають взаємодію працівників з агресивними речовинами, як-то сірчана кислота та вапно, повинні виконуватись згідно НПАОП 0.00-8.11-12 та НПАОП 24.1-1.07-10.

Усі роботи з підготовки гарячих теплоносіїв проводяться згідно НПАОП 0.00-1.81-18 та НПАОП 0.00-1.73-14. Обладнання та трубопроводи, що застосовуються для нагрівання води та водяної пари, повинні відповідати ДСТУ 4223-2003 та ДСТУ EN 563-2001. Обладнання, що застосовується при полімеризації молочної кислоти, повинно відповідати ДСТУ 2758-94 та ДСТУ EN 2012:2018.

Усі роботи з утилізації бактеріального осаду, гіпсу, відпрацьованого вугілля та інших твердих відходів здійснюється згідно ДСТУ 4462.3.01:2006.

Усі будівлі та споруди проектується та розміщуються у відповідності з ДСТУ Б В.2.2-29:2011 та ДСТУ-Н Б В.2.6-188:2013. Виробничі приміщення у яких знаходиться обладнання, що створює шум, проектується згідно ДСТУ-Н Б В1.1-32:2013. Усі трубопроводи повинні відповідати ДСТУ-Н Б А.3.1-26:2014 та випробовуватись на герметичність згідно ДСТУ 3845:2019 перед початком виробництва.

Усі працівники, незалежно від спеціалізації, проходять інструктаж з техніки безпеки та охорони праці згідно ДСТУ 2293:2014 та ДСТУ ISO 45001:2019 та забезпечуються засобами індивідуального захисту згідно ДСТУ 7239:2011. Використання засобів індивідуального захисту здійснюється відповідно до НПАОП 0.00-7.17-18.

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## ВИСНОВКИ

1. Проведено літературний огляд перспективності застосування PLA у вирішенні світової проблеми пластикового забруднення. Розглянуто існуючі технології виробництва, види сировини та продуценти, що застосовуються при виготовленні полілактиду. Для ферментативного виробництва мономеру PLA обрано *Lactobacillus delbrueckii subsp.delbrueckii* у якості продуценту та мелясу у якості сировини для поживного середовища. Визначено, що оптимальними умовами культивування є анаеробне середовище з температурою в межах 50°C та рН в межах 6 з внесенням дріжджового екстракту в якості джерела азотного живлення.

2. Досліджено біохімічні процеси, що відбуваються в ході культивування та визначено максимальний можливий вихід молочної кислоти в ході ферментації, що складає 90% від внесених цукрів, та максимальну можливу концентрацію молочної кислоти у кінцевому розчині, що складає 125 г/л. Досліджено процеси та умови полімеризації молочної кислоти, що передбачають концентрування очищеного розчину молочної кислоти до 90%, поліконденсацію з утворенням низькомолекулярних полімерів, димеризацію з утворенням лактиду та полімеризацію в присутності каталізатора з утворенням PLA.

3. Розроблено технологію для одного виробничого циклу, що передбачає культивування молочнокислих бактерій на поживному середовищі на основі інвертованої меляси у ферментері об'ємом 100 м<sup>3</sup> з подальшою очисткою, концентруванням та полімеризацією синтезованої молочної кислоти з виходом PLA у розмірі 7900 кг.

4. Спроектовано реактор-змішувач об'ємом 80 м<sup>3</sup> для приготування поживного середовища, що застосовується на етапах напрацювання культури продуцента та безпосередньо ферментації. Реактор оснащений якірною мішалкою,

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>		
<b>Змн.</b>	<b>Арк.</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дат</b>			
Розроб.		Григорусь Є.С.			<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Аркушів</b>
Конс.						53	63
Керівн.		Дем'яненко			<b>ВИСНОВКИ</b> КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ		
Затв.							

приводом для перемішування, сорочкою для підведення водяної пари та циліндричною опорою.

5. Розроблено правила охорони праці та довкілля з урахуванням існуючих нормативних документів та особливостей виробничого процесу.

					<i>ДП ББ12.05.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Parker L. Plastic pollution facts and information. National Geographic.  
URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution> (дата звернення: 20.04.2025).
2. Ritchie H., Samborska V., Roser M. Plastic pollution. Our World in Data.  
URL: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#key-insights> (дата звернення: 20.04.2025).
3. Polylactic acid market size & forecast. MarketsandMarkets.  
URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polylactic-acid-pla-market-29418964.html> (дата звернення: 20.04.2025).
4. ДСТУ 4621:2006. Кислота молочна харчова. На заміну ГОСТ 490–79 ; чинний від 2008-03-08. Вид. офіц. Київ, 2007. 24 с.
5. ДСТУ 3696-98. М'яса бурякова. На заміну ГОСТ 30361-98 ; чинний від 1991-01-01. Вид. офіц. Київ, 1998. 21 с.
6. Short communication: characterization of molasses chemical composition / A. Palmonari та ін. Journal of dairy science. 2020. Т. 103, № 7. С. 6244–6249.  
URL: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17644> (дата звернення: 20.04.2025).
7. Виробництво молочної кислоти - AC Group. URL: <https://ac-group.in.ua/blog/виробництво-молочної-кислоти/> (дата звернення: 20.04.2025).
8. Poly(lactic acid)–Mass production, processing, industrial applications, and end of life / E. Castro-Aguirre та ін. Advanced drug delivery reviews. 2016. Т. 107. С. 333–366. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010> (дата звернення: 20.04.2025).
9. Ehsani M., Khodabakhshi K., Asgari M. Lactide synthesis optimization: investigation of the temperature, catalyst and pressure effects. E-Polymers. 2014. Т. 14, № 5. С. 353–361. URL: <https://doi.org/10.1515/epoly-2014-0055> (дата звернення: 20.04.2025).

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>					
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	<b>ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА</b>					
<i>Розроб.</i>	<i>Конс.</i>	<i>Григорусь Є.С.</i>						<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
									55	63
<i>Керівн.</i>	<i>Затв.</i>	<i>Дем'яненко</i>						<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ</i>		

10. Промислова мікробіологія. // Дніпродзержинський державний технічний університет. – 2004. – С. 273.
11. Utilization of Molasses Sugar for Lactic Acid Production by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *delbrueckii* Mutant Uc-3 in Batch Fermentation / [D. Arti, A. Mukund, C. Shivani та ін.], 2007. – (American Society for Microbiology). – С. 333–335.
12. Process for the production of invert sugar solutions from molasses : Сполучені Штати Америки (США). № 3511705 ; заявл. 12.05.1970 ; опубл. 29.12.2025.  
URL: <https://patents.google.com/patent/US3511705A/en> (дата звернення: 20.04.2025).
13. Харчові кислоти (лимонна, молочна, винна) / Яровенко В.Л., Хричев Г.А. — Легка харчова промисловість, 1983. 264 с.
14. Abedi E., Hashemi S. M. B. Lactic acid production – producing microorganisms and substrates sources-state of art. *Heliyon*. 2020. Т. 6, № 10. С. e04974.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04974> (дата звернення: 20.04.2025).
15. Freire-Almeida E., Maldonado-Alvarado P. Use of *Lactobacillus* for lactic acid production from agro-industrial by-products. *Lactobacillus - A multifunctional genus* [working title]. 2022. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.106697> (дата звернення: 20.04.2025).
16. *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *delbrueckii*. ABIS Encyclopedia.  
URL: [https://www.tgw1916.net/Lactobacillus/delbrueckii\\_delbrueckii.html](https://www.tgw1916.net/Lactobacillus/delbrueckii_delbrueckii.html) (дата звернення: 20.04.2025).
17. Rizzello C. G., De Angelis M. Lactic Acid Bacteria | *Lactobacillus* spp.: *Lactobacillus delbrueckii* Group. *Encyclopedia of dairy sciences*. 2011. С. 119–124.  
URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374407-4.00264-8> (дата звернення: 20.04.2025).
18. Sugar inversion. Anton Paar. URL: <https://wiki.anton-paar.com/en/sugar-inversion/> (дата звернення: 23.04.2025).
19. Homolactic fermentation. PubChem.  
URL: [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/pathway/BioCyc:META\\_ANAEROFrucAT-PWY](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/pathway/BioCyc:META_ANAEROFrucAT-PWY) (дата звернення: 23.04.2025).

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

20. Lactic acid fermentation. ChemTalk. URL: <https://chemistrytalk.org/lactic-acid-fermentation/> (date of access: 23.04.2025).
21. Lactide: production routes, properties, and applications / В. Л. С. Cunha та ін. Bioengineering. 2022. Т. 9, № 4. С. 164.  
URL: <https://doi.org/10.3390/bioengineering9040164> (дата звернення: 24.04.2025).
22. Design and evaluation of sustainable lactide production process with an one-step gas phase synthesis route / S. Heo та ін. ACS sustainable chemistry & engineering. 2019. Т. 7, № 6. С. 6178–6184.  
URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06383> (дата звернення: 24.04.2025).
23. Process for producing polylactic acid and reactors for use in said process : Сполучені Штати Америки (США). Опубл. 10.10.2013. 9 с.  
URL: <https://patents.google.com/patent/US20130267675A1/en> (дата звернення: 24.04.2025).
24. Lactide polymerization : Сполучені Штати Америки (США) : C08G 63/08. № 941731 ; заявл. 08.09.1992 ; опубл. 18.10.1994. 16 с.  
URL: <https://patents.google.com/patent/US5357034A/en> (дата звернення: 24.04.2025).
25. Process for production of polylactic acid : пат. РСТ/JP2010/060052 eu: C08G63/78. № 10789463.6 ; заявл. 25.04.2012 ; опубл. 14.06.2010.  
URL: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20120425/patents/EP2444442NWA1/document.html> (дата звернення: 24.04.2025).
26. Polygenis T. How PLA melting point influences 3D printing. Wevolver.  
URL: <https://www.wevolver.com/article/pla-melting-point> (дата звернення: 30.04.2025).
27. Проектування реакторів біотехнологічних та фармацевтичних виробництв: навчальний посібник / НТУУ «КПІ» ; уклад.: Л. І. Ружинська, І. А. Буртна, В. М. Поводзинський, В. Ю. Шибецький. – Електронні текстові дані – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – 131
28. Процеси та апарати хімічної технології / А. І. Дубинін, Р. І. Гаврилів, І. О. Гузьова. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 357 с

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

**ДОДАТОК А**  
**Специфікація обладнання**

Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Маса, кг	Примітка
П-1, П-2, П-3		Котел з електронагрівом	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Д-4, Д-16, Д-23, Д-34 Д-38		Ваговий дозатор для сипких речовин	1		Збірний
Д-5, Д-7, Д-8, Д-17, Д-20, Д-21, Д-22, Д-39, Д-44, Д-45, Д-48, Д-49, Д-74		Об'ємний дозатор для рідких речовин	1		Збірний
Р-6, Р-9		Реактор для приготування розчинів, місткість 5 м <sup>3</sup> , D = 1800, коефіцієнт заповнення 0,7, завантаження по трубопроводу та через люк, нижній злив, механічне перемішуванням лопатевою мішалкою, працює при атмосферному тиску потужність електродвигуна з редуктором 20 кВт, частота обертання вала мішалки 1с <sup>-1</sup>	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
ПЗ-10		Повітрязабірник, висота труби 10 м, діаметр труби 300 мм	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Ф-11		Фільтр попереднього очищення повітря запиленістю до 5мг/м <sup>3</sup>	1		Збірний

										Арк.
										58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>					

Н-12		Компресор повітряний	1		Збірний
Т-13		Теплообмінник для охолодження стисненого повітря	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
РС-14		Ресивер повітря	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Ф-15		Головний повітряний фільтр	1		Збірний
Р-18		Реактор для приготування розчинів, місткість 25 м <sup>3</sup> , D = 2800, завантаження по трубопроводу та через люк, нижній злив, механічне перемішуванням якірною мішалкою	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Н-19, Н-25, Н-29, Н-31, Н-33, Н-36, Н-41, Н-43, Н-47, Н-64, Н-72, Н-76		Насос для транспортування розчину, відцентровий горизонтальний консольний одноступеневий з робочим колесом закритого типу	1		Збірний
Р-24		Реактор для приготування розчинів, місткість 80 м <sup>3</sup> , D = 3600, завантаження по трубопроводу та через люк, нижній злив, механічне перемішуванням якірною мішалкою, потужність електродвигуна з редуктором 100 кВт, частота обертання вала мішалки 0,53с <sup>-1</sup> . Парова суцільна сорочка	1		Згідно креслення
Пр-26		Пробірка з рідким поживним середовищем для культивування вихідної культури продуценту	96		Нерж. сталь 12Х18Н10Т

										Арк.
										59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ББ12.05.000 ПЗ					

Кл-27		Колба (качалочна) для рідкофазного культивування, об'єм – 0,5 л	32		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Р-28		Посівний ферментер (інокулятор) об'єм 0,1 м <sup>3</sup> з нижнім зливом. Внутрішній діаметр – 500 мм. З еліптичними кришкою та днищем, з суцільною сорочкою, коефіцієнт заповнення 0,8 від номінального об'єму, завантаження по трубопроводу. Потужність електродвигуна з редуктором 5 кВт, частота обертання вала мішалки 1с <sup>-1</sup> . Пароводяна суцільна сорочка	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Р-30		Посівний ферментер (інокулятор) об'єм 1 м <sup>3</sup> з нижнім зливом. Внутрішній діаметр – 1200 мм. З еліптичними кришкою та днищем, з суцільною сорочкою, коефіцієнт заповнення 0,8 від номінального об'єму, завантаження по трубопроводу. Потужність електродвигуна з редуктором 15 кВт, частота обертання вала мішалки 1с <sup>-1</sup> . Пароводяна суцільна сорочка	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
Р-32		Посівний ферментер (інокулятор) об'єм 10 м <sup>3</sup> з нижнім зливом. Внутрішній діаметр – 2200 мм. З еліптичними кришкою та днищем, з суцільною сорочкою, коефіцієнт заповнення 0,8 від номінального об'єму, завантаження по трубопроводу. Потужність електродвигуна з редуктором	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т

									Арк.
									60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>				

		35 кВт, частота обертання вала мішалки 1с <sup>-1</sup> . Пароводяна суцільна сорочка			
P-35		Виробничий ферментер об'ємом 100 м <sup>3</sup> з нижнім зливом. Внутрішній діаметр – 3600 мм. Сорочка багатосекційна	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
ПФ-37		Прес-фільтр для відділення осаду. Осад розвантажують у бункер, установлений під фільтрпресом, фільтрувальна тканина бязь, бельтинг	1		Збірний
P-40		Реактор-змішувач об'ємом 100 м <sup>3</sup> з нижнім зливом. Парова суцільна сорочка	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
ВФ-42		Вакуум-фільтр	1		Збірний
K-46		Катионітна іонообмінна колона з смолою КУ-2-8-ЧС. Відкрита з нижньою подачею рідини	1		Збірний
K-50		Аніонітна іонообмінна колона з смолою АВ-16ГС. Відкрита з нижньою подачею рідини	1		Збірний
В-51		Корпус випарного апарату з падаючою плівкою	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
3-52		Сепаратор випарного апарату з падаючою плівкою	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
3-53		Барометричний конденсатор	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
3-54		Барометричний ящик	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
3-55		Уловлювач барометричного конденсатора	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
В-56, В-57, В-65, В-73		Водно-кільцевий вакуумний насос	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т
P-58, P-66,		Реактор-змішувач об'ємом 10 м <sup>3</sup> з нижнім зливом, з	1		Нерж. сталь 12Х18Н10Т

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ББ12.05.000 ПЗ					61

P-75		еліптичними кришкою та днищем, працює при тиску нижче атмосферного, завантаження по трубопроводу, частота обертання вала мішалки 1с <sup>-1</sup> . Масляна суцільна сорочка			
K-59, K-67		Ректифікаційна колона, працює при тиску нижче атмосферного	1		Нерж. сталь 12X18H10T
T-60, T-68		Ребойлер ректифікаційної колони, нагрів маслом	1		Нерж. сталь 12X18H10T
T-61, T-69		Дефлегматор ректифікаційної колони, охолодження водою	1		Нерж. сталь 12X18H10T
E-62, E-70		Ежектор для видалення парів, тиск робочої пари – 0,2 МПа	1		Нерж. сталь 12X18H10T
K-63, T-71		Конденсатори для видалених парів, охолодження водою	1		Нерж. сталь 12X18H10T
EK-77		Екструдер	1		Збірний
T-78		Кристалізатор, охолодження водою	1		Нерж. сталь 12X18H10T
Г-79		Гранулятор	1		Збірний
C-80		Стрічкова сушарка	1		Збірний
КП-1.1, КП-1.2, КП-1.3, КП-3.3, КП-4.1, КП-5.2, КП-6.1, КП-6.3, КП-6.5, КП-7.2, КП-8.1, КП-8.3, КП-9.1, КП-9.3,	ТІ	Термоелектроперетворювач	1		Встановлен ня за місцем

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ББ12.05.000 ПЗ

Арк.

62

КП-10.2, КП-10.4, КП-10.5, КП-11.2, КП-11.4, КП-11.5, КП-12.2 КП-13.1					
КП-1.4, КП-3.1, КП-3.2	PI	Манометр	1		Встановлен ня за місцем
КП-9.1, КП-9.4, КП-10.1, КП-10.3, КП-11.1, КП-11.3, КП-12.1	PI	Вакуумметр	1		Встановлен ня за місцем
КП-5.1, КП-7.1	QE	pH-метр	1		Встановлен ня за місцем
КП-6.2, КП-6.4, КП-6.6	LT	Рівнемір	1		Встановлен ня за місцем

					<b>ДП ББ12.05.000 ПЗ</b>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		