

**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет медико-фармацевтичних технологій**  
**Кафедра біотехнології**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему: **«РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПИВА  
ТИПУ "SOUR ALE" НА ОСНОВІ КУЛЬТУР ДРІЖДЖІВ ТА  
МОЛОЧНОКИСЛИХ БАКТЕРІЙ І РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ»**

**Виконав:** здобувачка вищої освіти групи БТ621(4,6з)-01  
спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія  
освітньої програми Біотехнологія

Ангеліна СІБАРОВА

**Керівник:** Доцент закладу вищої освіти кафедри біотехнології,  
к.фарм.н, доц. Ольга КАЛЮЖНАЯ

**Рецензент:** Завідувачка кафедри біотехнології, біофізики та  
аналітичної хімії Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут», д.т.н., проф.

Ольга БЛИЗНЮК

Харків – 2026 рік

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці технологічного процесу виробництва функціонального пива типу "Sour Ale" на основі культур дріжджів, молочнокислих бактерій та рослинної сировини на вітчизняній крафтовій броварні. Мета – організація виробництва з забезпеченням якості, безпеки та екологічності. Виконано аналіз літератури, розроблено технологію (коферментація дріжджів з *L. plantarum*), розраховано баланси, проаналізовано відходи, запропоновано утилізацію.

Ключові слова: Sour Ale, крафтове пиво, молочнокислі бактерії, дріжджі, коферментація

## ANNOTATION

The qualification work is dedicated to the development of a technological process for the production of functional Sour Ale beer, utilizing yeast cultures, lactic acid bacteria (LAB), and plant-based raw materials within a domestic craft brewery. The study aims to organize a production process that ensures high quality, food safety, and environmental sustainability. A comprehensive literature review was conducted, a technological framework based on the co-fermentation of yeast and *Lactiplantibacillus plantarum* was developed, material balances were calculated, and production waste was analyzed with subsequent proposals for its utilization and recycling.

*Key words:* Sour Ale, craft beer, lactic acid bacteria (LAB), yeast, co-fermentation.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналітичний огляд.....	6
1.1 Стан та перспективи розвитку виробництва функціональних видів крафтового пива	6
1.2 Технологічні особливості виробництва типу Sour Ale	8
2 Характеристика готового продукту, сировини, матеріалів, напівпродуктів.....	11
2.1 Характеристика готового продукту.....	11
2.2 Характеристика сировини.....	14
2.3 Характеристика біологічних об'єктів та етапів біосинтезу первинних та вторинних метаболітів .....	16
3 Технологічна частина.....	39
3.1 Розрахунок матеріального балансу.....	39
3.2 Обґрунтування та вибір обладнання .....	44
3.3 Опис технологічного процесу.....	58
3.4 Схеми виробництва.....	67
3.5 Критичні параметри виробництва .....	71
3.6 Екологічні аспекти виробництва.....	73
Висновок.....	76
Список використаної літератури.....	78
Додатки.....	85

					<i>162.01.05.00 000 ПЗ</i>									
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>										
<i>Розробив</i>		<i>Сібарова</i>			<i>Розробка технології функціонального пива типу "Sour Ale" на основі культур дріжджів та молочнокислих бактерій і рослинної сировини Пояснювальна записка</i>									
<i>Перевірив</i>		<i>Калюжная</i>												
<i>Н. контр.</i>														
<i>Затвердив</i>		<i>Хохленкова</i>												
					<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Літ.</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Арк.</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Аркушів</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">   </td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">77</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;"> <b>НФаУ</b>  <b>Кафедра біотехнології</b> </td> </tr> </table>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>		2	77	<b>НФаУ</b> <b>Кафедра біотехнології</b>		
<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>												
	2	77												
<b>НФаУ</b> <b>Кафедра біотехнології</b>														

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний стан світової харчової індустрії характеризується стрімким зростанням попиту на продукти функціонального призначення, що здатні не лише задовольняти фізіологічні потреби організму в енергії, а й чинити позитивний терапевтичний вплив на його системи. Пивоваріння, як одна з найдавніших галузей біотехнології, сьогодні перебуває на етапі трансформації, де традиційні технологічні схеми доповнюються інноваційними рішеннями для створення напоїв із заданими властивостями. У цьому контексті виробництво функціонального пива типу «Sour Ale» на основі культур дріжджів, молочнокислих бактерій (МКБ) та рослинної сировини на вітчизняних крафтових броварнях є актуальним. «Sour Ale», що характеризується вираженою кислинкою, фруктовими фенольними нотами та пробіотичними властивостями, відповідає глобальним трендам на напої з додатковою користю для здоров'я (підтримка мікробіоти кишечника, антиоксидантний ефект).

**Мета дослідження.** Метою кваліфікаційної роботи є розробка технології функціонального пива типу «Sour Ale» на основі попередньо обґрунтованих культур дріжджів, молочнокислих бактерій та рослинної сировини з потенціалом реалізації на вітчизняній крафтовій броварні.

**Завдання дослідження.** Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- Провести аналіз літературних джерел щодо особливостей виробництва кислих елів та перспективності впровадження технологій їхнього виробництва на крафтових броварнях.
- Проаналізувати властивості та метаболізм культур заквасок – молочнокислих бактерій та дріжджів, що забезпечують формування особливих характеристик пива Sour Ale.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3



ферментації, що забезпечують стабільність мікробіологічних та фізико-хімічних показників готового продукту. Запропоновано схему масштабування виробництва з пілотної серії (100 л) до промислової (1000 л) з підбором енергоефективного обладнання (комбі-бревхаус, ЦКТ з посиленням охолодженням), що дозволяє оптимізувати площі виробничих цехів та знизити питомі витрати енергоносіїв. Обґрунтовано рішення вузла біоконверсії пивної дробини для отримання пребіотичних ксилолігосахаридів, що дозволяє підприємству знизити витрати на закупівлю функціональних інгредієнтів та вирішити проблему утилізації відходів. Результати роботи можуть бути використані крафтовими броварнями для розширення асортименту та виходу в сегмент функціональних напоїв.

Апробація окремих результатів роботи на VI міжнародній науково-практичній конференції «Youth Pharmacy Science» (10-11 грудня 2025 р., м. Харків) та публікація у збірці конференції (додаток).

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

## 1.1 Стан та перспективи розвитку виробництва функціональних видів крафтового пива

Сучасний етап розвитку світового та вітчизняного броварства характеризується стрімкою трансформацією крафтового сектору від задоволення нішевого попиту до ролі лідера інновацій у харчовій індустрії. Аналіз ринку свідчить про зміщення акцентів споживчих переваг у бік продуктів, що відповідають концепції «Health & Wellness» [30, 35]. Це зумовлює актуальність розширення асортименту через створення напоїв зі зниженим вмістом алкоголю, але з підвищеною біологічною цінністю та складним органолептичним профілем.

Крафтове пивоваріння демонструє стійке зростання, попри виклики глобального ринку пива, зокрема зниження споживання через тренди на здоров'я. За даними Grand View Research, глобальний ринок крафтового пива оцінювався в 92,185 млрд USD у 2023 році та прогнозується на рівні 178,575 млрд USD до 2030 року з CAGR (складним річним темпом зростання) 9,9% [29]. Аналогічні прогнози від MarkNtel Advisors вказують на зростання з 106,4 млрд USD у 2024 році до 179,43 млрд USD до 2030 року (CAGR 9,1%), з акцентом на преміум-сегмент та низькоалкогольні варіанти. У США, як лідері ринку, виробництво крафтового пива впало на 3,9% у 2024 році (до 23,1 млн барелів), але доларовий обсяг зріс на 3% до 28,8 млрд USD, що свідчить про преміумізацію (зростання цін та фокус на якості) [36]. Така динаміка зумовлена активною зміною споживчих пріоритетів, зокрема зростанням попиту на унікальні смакові профілі, локальність походження сировини, наявність у напоях додаткової користі для здоров'я, споживання так званих здорових альтернатив (низько- та безалкогольні сорти, функціональні напої),

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

попит на продукти, що відповідають сталому виробництву (екопакування, переробка відходів) [27, 29, 30, 36, 53].

Ключовим інструментом конкурентної боротьби у крафтовому секторі є розширення асортименту. Якщо традиційне промислове пивоваріння фокусується на лагерах, що займають близько 60% глобального обсягу, то крафтові броварні орієнтуються на елі (Pale Ale, IPA, Stout) та гібридні сорти, частка яких у структурі продажів спеціалізованих броварень перевищує 40%. Особливого значення набуває розвиток категорій з низьким вмістом алкоголю та спеціальних стилів, що базуються на змішаній ферментації [3, 30].

Найбільш динамічним та інноваційним сегментом у структурі крафтового асортименту є кислі елі (Sour ales). Характерною особливістю цього стилю є досягнення високої активної кислотності ( $\text{pH} < 4,0$ ) за рахунок використання молочнокислих бактерій (МКБ), таких як *Lactobacillus plantarum*, *L. brevis* тощо. Технологія отримання таких напоїв передбачає або швидке закислення суслу, або тривалу коферментацію з використанням МКБ та диких дріжджів *Brettanomyces*. Це дозволяє формувати складний органолептичний профіль з вираженими фруктовими та терпкими нотами, які гармонійно доповнюються додаванням рослинної сировини [32, 40].

Додавання ягідної сировини у технологію кислих елів виконує не лише естетичну та смакову функції, а й виступає основою для створення функціональних напоїв. Плодово-ягідна сировина збагачує пиво антиоксидантами (поліфенолами), вітамінами та пектиновими речовинами, які виконують роль пребіотиків, підтримуючи життєздатність пробіотичних культур МКБ. Такий підхід дозволяє трансформувати традиційне пиво у функціональний продукт, що сприяє підтримці імунітету та здоров'ю мікробіоти кишечника. Напрями створення функціонального пива на сучасному етапі включають розробку пробіотичних сортів із живими культурами бактерій, антиоксидантних та вітамінізованих елів та безалкогольних варіантів. Для українського ринку, який до 2022 року

						162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			7

демонстрував щорічне зростання крафту на 20–30%, впровадження функціональних кислих елів є шляхом збільшення асортименту та розвитку галузі. Використання локальної рослинної сировини у поєднанні з сучасними технологіями, такими як вторинна переробка відходів, дозволяє створювати продукти з високою доданою вартістю, що відповідають світовим екологічним та нутриціологічним трендам. Таким чином, поєднання традицій крафтового пивоваріння з інноваційними підходами до функціональності є найбільш перспективною моделлю розвитку галузі в середньостроковій перспективі.

## 1.2 Технологічні особливості виробництва типу Sour Ale

Традиційно однією з найважливіших характеристик пива як алкогольного напою були його виражені органолептичні властивості та широке різноманіття стилів. Індустріалізація пивоварної галузі призвела до уніфікації смакових профілів, що стало каталізатором відродження крафтового сектору. Мале та середнє виробництво дозволяє забезпечити високу якість і унікальність продукту, повертаючи пиву статус напою з багатим сенсорним різноманіттям. Згідно зі стандартами Brewers Association (США), крафтова пивоварня визначається за трьома критеріями: лімітований річний обсяг (до 6 млн барелів), фінансова незалежність від масових виробників та пріоритет традиційних або інноваційних методів ферментації. На оновлений розвиток крафтового пива також вплинули економічні чинники та вища якість кінцевого продукту, якої легше досягти в умовах дрібносерійного виробництва.

Для стандартизації визначальних особливостей стилів часто використовуються рекомендації Beer Judge Certification Program (BJCP) [26]. Сучасна систематизація пива, що налічує понад 150 стилів (зокрема за класифікацією BJCP), базується на типології бродіння: верхове (елі), низове

									162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						8

(лагери), змішане.

Попри домінування міжнародних лагерів на ринку, спостерігається стрімке зростання інтересу до нішевих категорій, зокрема до кислих елів (European Sour Ale, American Wild Ale). Такі стилі, як Lambic, Gose та Berliner Weisse, вирізняються характерним рівнем рН (3,0–3,9), що досягається шляхом накопичення органічних кислот у результаті діяльності молочнокислих бактерій (МКБ).

Однією з основних характеристик стилів кислого пива є низький рівень рН напою у межах від 3,0 до 3,9, що є результатом високих концентрацій органічних кислот. Підвищений вміст кислот досягається завдяки залученню МКБ або інших мікроорганізмів, здатних до продукування кислоти. Залежно від конкретного стилю та масштабів виробництва можуть застосовуватися різні методи закислення [47].

Ключовим завданням сучасної біотехнології пивоваріння є розробка режимів контрольованого закислення. Історично цей процес базувався на спонтанній ферментації (наприклад, у бельгійських ламбіках), де сусло інокулюється мікрофлорою навколишнього середовища з подальшою тривалою витримкою (до 3 років) у дерев'яних бочках. Попри складний і глибокий смаковий профіль, цей метод має суттєвий недолік - нестабільність показників готового продукту [44].

Для оптимізації виробництва та забезпечення повторюваності результатів сучасна промисловість застосовує прискорені методи із використанням чистих культур МКБ та спеціальних дріжджів:

- Закислення солоду, затору, в котлі (Sour Malting, Mashing, Kettle Souring) - закислення відбувається на етапі підготовки солоду, затирання або безпосередньо в сусловарильному котлі перед основним кип'ятінням;
- Змішане бродіння (Mixed Fermentation) одночасне або послідовне використання МКБ та дріжджів безпосередньо під час бродіння;
- Первинне закислення (Primary Souring) - підхід із використанням

									162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						9

специфічних штамів дріжджів, здатних самостійно продукувати кислоту без участі бактерій [44, 49].

Хоча сучасні технології дозволяють значно скоротити час виробництва, класичні методи спонтанного бродіння залишаються неперевершеними за складністю органолептики. Це зумовлено синергією багатьох мікроорганізмів, чия активність формує унікальний букет напою протягом тривалого часу.

Сучасний розвиток промислової біотехнології спрямований на подолання розриву між традиційною складністю спонтанного бродіння та технологічною керованістю. Завдяки детальному вивченню метаболоміки «диких» процесів, науковці отримали змогу створювати складні мікробні консорціуми, де комбінація селекціонованих штамів МКБ та специфічних дріжджів (зокрема родів *Brettanomyces*, *Lachancea*) відтворює багатогранний смаковий профіль ламбіків або гезів у значно коротші терміни. Такий синергетичний підхід дозволяє не лише стабілізувати якість продукту, а й свідомо моделювати органолептичні властивості, забезпечуючи високу складність букета, яка раніше вважалася виключною прерогативою багаторічної витримки в бочках. Отже, сучасне контрольоване закислення стає не просто спрощеною альтернативою, а інструментом створення преміальних стилів пива з гарантованими фізико-хімічними характеристиками.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ГОТОВОГО ПРОДУКТУ, СИРОВИНИ, МАТЕРІАЛІВ, НАПІВПРОДУКТІВ

### 2.1 Характеристика готового продукту

На основі настанови BJCP Style Guidelines 2021, яка є світовим стандартом для класифікації пивних стилів, розроблене у роботі функціональне пиво типу «Sour Ale» на основі змішаних культур дріжджів, молочнокислих бактерій та рослинної сировини (ягід) може бути класифіковане за декількома категоріями. Враховуючи ключові характеристики напою - виражену молочну кислоту (рН 3,4–3,6), пшеничну основу, контроль за процесом ферментації та наявність пробіотичних властивостей ( $>10^6$  КУО/мл МКБ), найбільш відповідною категорією є 28С. Wild Specialty Beer [26].

Цей стиль призначений для пива зі змішаною ферментацією, де мікроорганізми, відмінні від традиційних пивних дріжджів (зокрема *Lactobacillus* та *Brettanomyces*), створюють складний профіль з характерною кислинкою та фруктовими-фенольними ароматами. Додавання рослинної сировини у формі ягідного пюре (5–10%) робить напій «спеціальним», де базовий стиль модифікується мікрофлорою та фруктовими компонентами. Сенсорні показники розроблюваного пива - сухий фініш, низька гіркота (IBU 5–10) та акцентована кислотність - повністю відповідають вимогам категорії 28С, що допускає варіативність базового стилю та використання нестандартних інгредієнтів для створення функціональних продуктів. Таке визначення найкраще охоплює складну мікробіологічну структуру продукту (коферментація LAB та дріжджів) та його функціональну спрямованість. На відміну від традиційних кислих елів категорії 23 (наприклад, Lambic чи Flanders Red Ale), що базуються на спонтанному бродінні, розроблене пиво є

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

162.01.05.00 000 ПЗ

зразком сучасного крафтового підходу з контрольованою інокуляцією, де пробіотичні властивості та антиоксидантний потенціал ягід формують додану цінність напою.

Альтернативним варіантом класифікації може виступати категорія 29А. Fruit Beer (або 29С. Specialty Fruit Beer, за умови використання пребіотиків). Цей підхід є доцільним, якщо у сенсорному профілі домінують ягоди, а кислість відіграє роль гармонійного доповнення. Документація ВІСР допускає використання пшеничної основи для фруктового пива, що корелює з рецептурним складом об'єкта дослідження. Також концептуально близьким є локальний стиль Х4. Catharina Sour, який описує освіжаюче пшеничне пиво з чистою молочною кислотністю та додаванням фруктів, проте він зазвичай не передбачає використання *Brettanomyces*.

*Найменування продукту:*

Sour Berry Ale (функціональне кисле пиво з ягодами).

*Характеристика показників:*

етанол (ABV, Alcohol by Volume) 4–5%; рН 3,4–3,6; гіркота (IBU, International Bitterness Units) 5–10; колір (SRM, Standard Reference Method) 4–8 (рожевий відтінок від ягід); початкова густина (OG, Original Gravity) 1,040–1,050; кінцева густина (FG, Final Gravity) 1,004–1,010.

*Аромат:*

Домінуючий фруктовий (чорниця: ягідний, лісовий; малина: солодкий, тропічний) з чистою молочною кислотою від *L. plantarum*. Легкі фенольні ноти від *Brett*, низький хмільний аромат (флоральний).

*Вигляд:*

Блідо-рожевий до рубінового (від ягід), з помірною каламутністю (від пшениці та МКБ). Біла піна середньої стійкості, ефервесцентна.

*Смак:*

Кислий (молочна кислота, згладжений іншими метаболітами *L. plantarum*), з яскравими фруктовими нотами. Легкі естери від *S. cerevisiae*

									162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						12

(фруктові), феноли від *Brett* (тропічні, медичні). Низька гіркота, сухий фініш з кислим/фруктовим післясмаком. Без алкогольного тепла.

*Відчуття в роті:*

Легке тіло (medium-light), висока карбонація для освіжаючого ефекту. Кислість додає сухості, але метаболіти роблять напій повнішим. Без аstringенції чи різкості.

*Фізико-хімічні та мікробіологічні показники:*

Показник	Значення
Фізико-хімічні:	
Початкова густина (OG)	1,045–1,052
Кінцева густина (FG)	1,005–1,010
Вміст алкоголю (ABV), % об.	4,5–5,5
Показник гіркоти (IBU)	5–10
Колір (SRM)	15–25 (залежно від антоціанів ягід)
Активна кислотність (pH)	3,2–3,5
Вміст CO <sub>2</sub> , об'ємів	2,4–2,6
Вміст пребіотиків (XOS), г/л	5,0–10,0
Мікробіологічні:	
Кількість життєздатних клітин <i>L. plantarum</i>	≥10 <sup>6</sup> КУО/мл
Кількість клітин <i>Brettanomyces</i>	< 10 <sup>3</sup> КУО/мл
Загальна бактеріальна забрудненість (сторонні)	< 50 КУО/мл
<i>E. coli</i>	Відсутня в 100 мл
Патогенні мікроорганізми	Відсутні

*Функціональність:*

Пробіотики (>10<sup>6</sup> КУО/мл *L. plantarum* для мікробіоти кишечника), антиоксиданти від ягід (поліфеноли), пектини ягід та додані XOS, вітаміни (В-

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

групи від дріжджів) - покращення травлення.

*Термін придатності:*

2–3 місяці (живе пиво).

## 2.2 Характеристика сировини

На основі аналізу біологічних об'єктів, який наведений у розділі 2.3 (з акцентом на *Lactobacillus plantarum* як ключовий МКБ для гнучкості метаболізму, толерантності до етанолу та синтезу корисних метаболітів, а також використання *Saccharomyces cerevisiae* та *Brettanomyces bruxellensis* для комплексного аромату), запропонована рецептура функціонального пива Sour Ale, виробництво якого може бути реалізовано на вітчизняному підприємстві, зокрема на крафтовій броварні «Пивна Легенда», враховуючи їхній досвід з кислими стилями (наприклад, пиво типу Sour gose Red Cargo) та обладнання для контрольованої ферментації [1]. Рецептура розрахована на 100 л сусла (пілотна партія, яку можна масштабувати до 1000–5000 л). Обрана у розділі 3.3 технологія - сумісна ферментація (коферментація) для збереження життєздатності пробіотичних культур, з додаванням рослинної сировини (місцеві ягоди - чорниця та малина для антиоксидантів і маскування можливих небажаних смаків).

Інгредієнти (на 100 л сусла):

- Вода: 92–95 л (очищена для пивоваріння; рН 5.5–6.0 для оптимальної ферментації).

- Солод:

6 кг Pilsner malt (ячмінний, базовий для легкості та крохмалю).

4 кг Unmalted wheat (немальтована пшениця для тіла та субстрату для МКБ).

- Хміль: 10–15 г Saaz (або локальний аналог, з гіркотою (IBU) 5–10; додається для низької гіркоти, без сильного аромату).

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

- Дріжджі:

Первинні: *Saccharomyces cerevisiae* (штам SafAle S-33 або аналогічний з броварні,  $10^6$  клітин/мл - для базової алкогольної ферментації).

Вторинні: *Brettanomyces bruxellensis* (Lallemand WildBrew або аналог, для фруктових та фенольних ноток, додається на дозріванні).

- Молочнокислі бактерії (МКБ): *Lactobacillus plantarum* (Lallemand Sour Pitch або аналогічний комерційний штам,  $10^7$  КУО/мл - для кислоти та функціональних властивостей напою; факультативно гетероферментативний).

- Рослинна сировина: 5–7 кг пюре з чорниці та малини (у співвідношенні 1:1; додається після первинної ферментації для забезпечення антиоксидантами та як пребіотик (пектини) та маскування «підвальних» ноток від транс-2-гептаналу та специфічних діацетильних).

- Інші добавки: Ксилолігосахариди з відходів пивоваріння (пивної драбини, 0,5–1 кг - для живлення МКБ та посилення пробіотиків).

Пивна дробина складається переважно з оболонки зерна (ячменю або пшениці), залишків крохмалю та білків. Вона надзвичайно багата на некрохмальні полісахариди, такі як целюлоза та геміцелюлози (зокрема арабіноксилани). Шляхом гідролізу або ферментативної обробки драбини можна отримати ксилолігосахариди (XOS). Ці сполуки класифікуються як пребіотики - вони не перетравлюються людським організмом, але слугують селективним пребіотиком для мікрофлори *Lactobacillus plantarum*. Додавання XOS, виділених з драбини, дозволяє підсилити виживання пробіотичних МКБ у середовищі та покращити стан мікробіому кишечника споживача.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

## 2.3 Характеристика біологічних об'єктів та етапів біосинтезу первинних та вторинних метаболітів

Для приготування кислих елів використовують молочнокислі бактерії (МКБ) роду *Lactobacillus*, зазвичай у поєднанні з дріжджами *Saccharomyces cerevisiae* або дріжджами роду *Brettanomyces*, метаболічні реакції яких забезпечують утворення та смакові характеристики продукту. Тому розглянемо їх та проаналізуємо вплив на утворення специфічних метаболітів в контексті кінцевого продукту.

### 2.3.1 Характеристика дріжджів

Дріжджі присутні в багатьох середовищах і можуть бути знайдені не тільки в розкладаючих фруктах, деревах та ґрунтах, але й у коменсальних відносинах з вищими еукаріотами, включаючи людей, що обумовлює високу різноманітність видів. Деякі з дріжджів адаптовані до екстремальних середовищ, таких як високі концентрації солі, низький рН або надзвичайно холодні температури [13, 21, 34, 43, 46]. Рід *Saccharomyces*, зокрема *Saccharomyces cerevisiae*, асоціюється з виробництвом ферментованих продуктів для людського споживання, а саме хліба, вина та пива. Після кількох тисячоліть тісного співіснування, через фенотипічний відбір, ці види еволюціонували, що зробило їх ідеальною сировиною для виробництва продуктів з органолептичними властивостями, приємними для людей.

Дріжджі, як гетеротрофні організми, мають анаболізм, пов'язаний з катаболізмом. З одного боку, окислення органічних молекул, таких як цукри, дає АТФ, який, у свою чергу, використовується як енергетичний ресурс для клітини. З іншого боку, такі органічні молекули також можуть використовуватися як будівельні блоки або для генерації проміжних сполук для синтезу інших сполук, деякі з яких мають високу комерційну цінність.

									Арк.
									16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Висока різноманітність природних середовищ існування тісно пов'язана з різноманітністю джерел вуглецю, які дріжджі можуть використовувати. Гексози (глюкоза, фруктоза, галактоза, маноза) є найпоширенішими субстратами, але деякі види можуть використовувати пентози (ксилоза або арабіноза).

**Транспорт джерел вуглецю в клітину.** Ефективна утилізація глюкози як основного джерела вуглецю дріжджовими клітинами ініціюється з активації систем відчуття цукру в позаклітинному середовищі з подальшою індукцією експресії специфічних транспортних білків, відповідальних за її транслокацію через плазматичну мембрану. Наявність глюкози в середовищі зумовлює масштабну перебудову клітинного протеому. Глобальна модуляція рівнів ферментів досягається через комплексний регуляторний вплив на декількох рівнях: трансляційному (зміна швидкості трансляції мРНК), посттранскрипційному (регуляція стабільності мРНК), посттрансляційному (контроль швидкості біосинтезу та протеолітичної деградації білків) [10, 59, 62].

Ключовою метаболічною реакцією є інтенсивна транскрипційна активація генів, що кодують ферменти гліколітичного шляху, які забезпечує швидку адаптацію клітини до ферментативного типу метаболізму. Паралельно з цим спостерігається феномен глюкозної репресії – інгібування експресії генів, задіяних у дихальних шляхах, глюконеогенезі та катаболізмі альтернативних субстратів. Для *S. cerevisiae* порогова концентрація глюкози, необхідна для запуску цих регуляторних каскадів, становить лише 15 Мм [37].

У *S. cerevisiae* поглинання гексоз забезпечується розгалуженою родиною білків-транспортів, що налічує понад 20 членів. За кінетичними характеристиками (спорідненістю до субстрату) їх класифікують на дві основні групи: транспортери з низькою афінністю, що характеризуються високою пропускнуою здатністю при значних концентраціях глюкози в середовищі, та транспортери з високою афінністю, які мають низьку

						162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			17

транспортну ємність, проте здатні ефективно поглинати глюкозу за її дефіциту.

**Гліколіз.** Після транслокації в цитозоль глюкоза залучається до гліколітичного каскаду з подальшою трансформацією до пірувату (рис. 2.1). Цей процес інтегрує синтез АТФ із генерацією метаболічних інтермедіатів та відновлювальних еквівалентів (НАДН), необхідних для анаболічних реакцій. Першим етапом є перетворення глюкози на глюкозо-6-фосфат - фосфорилування, що потребує витрат АТФ. Реакцію каталізують гексокінази та глюкокіназа, активність яких корелює з ефективністю поглинання цукру. Фосфоглюкозоізомераза здійснює перетворення глюкозо-6-фосфату на фруктозо-6-фосфат. У другому фосфорилуванні фосфоглюкокіназа каталізує енергозалежне приєднання неорганічного фосфату до фруктозо-6-фосфату з утворенням фруктозо-1,6-біфосфату. При альдолазному розщепленні фруктозо-1,6-біфосфата альдолаза здійснює розщеплення цієї шестивуглецевої молекули на дві тріози: гліцеральдегід-3-фосфат та дигідроксіацетонфосфат [10, 62].

Утворені тріозофосфати перебувають у стані динамічної рівноваги, що підтримується шляхом їхньої оборотної ізомеризації ферментом тріозофосфатізомеразаю. Гліцеральдегід-3-фосфат спрямовується безпосередньо в подальші реакції гліколітичного каскаду до утворення пірувату. Водночас дигідроксіацетонфосфат виконує роль важливого метаболічного вузла: він може використовуватися у процесах глюконеогенезу або конвертуватися в гліцерол. Останній шлях є критично важливим для клітини, оскільки забезпечує регенерацію НАД<sup>+</sup> та підтримку осмотичного гомеостазу. Під дією 3-фосфатдегідрогенази субстрат окислюється за участю НАД<sup>+</sup> та фосфорилується, утворюючи 1,3-дифосфогліцерат. Фосфогліцераткіназа каталізує перетворення 1,3-дифосфогліцерату на 3-фосфогліцерат із вивільненням першої молекули АТФ. Фосфогліцератмутаза переносить фосфатну групу з положення С3 у С2. Фермент енолаза зумовлює

									Арк.
									18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					





альтернативою є декарбоксілювання до ацетальдегіду за допомогою піруватдекарбоксілази (Pdc1/5/6p), що в кінцевому підсумку може дати етанол. Скорочення ферментів: Піруватдекарбоксілаза - Pdc1/5/6p, Алкогольдегідрогеназа - Adh1p, НАД<sup>+</sup>-залежної дегідрогеназа - Gpd1/2p, фосфатаза - Gpp1/2p, Adh1p алкогольдегідрогеназа; Ald5p - ацетальдегіддегідрогеназа; Acs1/2p - ацетил-CoA-синтази; Yat1/2p - карнітин-ацетилтрансферази

**Ефект Кребтрі та енергетичний метаболізм.** Поширена уява про те, що ферментація відбувається виключно в анаеробних умовах, не є універсальною для всіх мікроорганізмів. У багатьох видів дріжджів спостерігається інгібування аеробного дихання за присутності високих концентрацій цукрів – явище, відоме як ефект Кребтрі.

Дріжджі *S. cerevisiae* класифікуються як Кребтрі-позитивні, оскільки вони ініціюють синтез етанолу в аеробному середовищі, якщо вміст глюкози перевищує поріг у 15 мМ [37]. Механізм цього явища полягає в тому, що високий рівень цукру стимулює інтенсивний гліколіз. Це призводить до надлишкового утворення АТФ шляхом субстратного фосфорилування, що своєю чергу пригнічує процеси окисного фосфорилування та знижує споживання кисню.

На противагу їм, Кребтрі-негативні дріжджі не демонструють подібної інгібіції. В аеробних умовах вони використовують енергоефективне дихання для активного нарощування біомаси через цикл трикарбонових кислот (ЦТК), вдаючись до ферментації лише за повної відсутності кисню.

**Аеробне дихання та цикл ЦТК.** Коли дріжджі переходять до дихального метаболізму, піруват, утворений у гліколізі, піддається окиснювальному декарбоксілюванню за допомогою комплексу піруватдегідрогенази з утворенням ацетил-КоА (рис. 2.3).

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



### 2.3.2 Характеристика МКБ

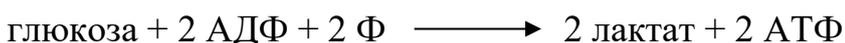
МКБ становлять гетерогенну групу грампозитивних бактерій, об'єднаних певними морфологічними, метаболічними та фізіологічними характеристиками. Це неспороутворюючі коки або палички, що не дихають, але є аеротолерантними та виробляють молочну кислоту як один із основних продуктів ферментації вуглеводів.

Зазвичай представники МКБ є непатогенними організмами з загальноновизнаним безпечним (GRAS) статусом. Рід *Lactobacillus* включає деякі з найважливіших видів GRAS, що беруть участь у харчовій мікробіології та харчуванні людини. Здатність цих бактерій адаптуватися до різних середовищ призвела до появи великої кількості промислово значущих штамів.

МКБ не мають функціональної дихальної системи, їм бракує здатності синтезувати цитохроми та порфірини – ключові компоненти дихальних ланцюгів, тому вони отримують енергію шляхом субстратного фосфорилування. Тому важливим параметром, що використовується для диференціації видів МКБ, є тип молочнокислого бродіння – гомоферментативне або гетероферментативне [10] (рис. 2.4).

**Ферментація глюкози.** При гомоферментативному бродінні (базується на гліколізі (шлях Ембдена–Мейергофа–Парнаса)) основним кінцевим продуктом є лактат (молочна кислота). На першому етапі утворюються дві молекули АТФ на моль глюкози шляхом окиснення фосфогліцеральдегіду, на другому - молекули НАДН, отримані на попередній стадії окиснення, використовуються для відновлення пірувату з утворенням лактату.

Загальна реакція:



При гетероферментативному бродінні (пентозо-фосфокетотазний шлях) лактат не є єдиним кінцевим продуктом; також утворюється значна кількість CO<sub>2</sub> та етанолу або ацетату.. Глюкоза окиснюється до рибулозо-5-фосфату, який ізомеризується в ксилулозо-5-фосфат. Ксилулозо-5-фосфат

									Арк.
									23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

розщеплюється на фосфогліцеральдегід та ацетилфосфат. Молекула фосфогліцеральдегіду окиснюється до пірувату через реакції гліколізу, тоді як ацетилфосфат відновлюється до етанолу.

Загальна реакція:

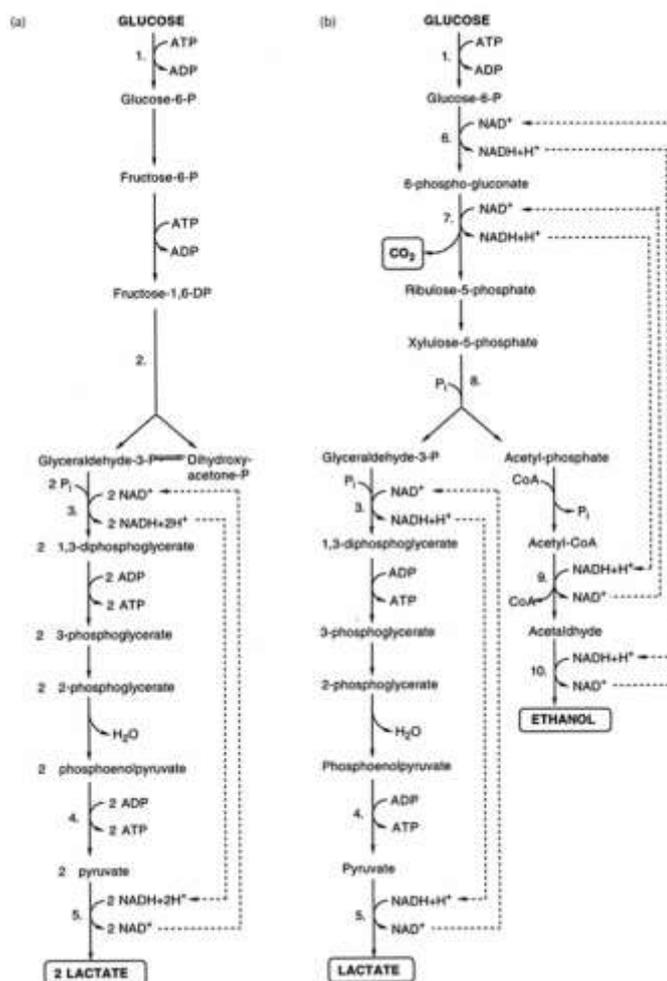


Рис. 2.4 – Шляхи ферментації глюкози. (а) Гомоферментативне бродіння (гліколіз, шлях Ембдена–Мейергофа–Парнаса). (б) Гетероферментативне бродіння (6-фосфоглюконатний, фосфокетолазний шлях). Перелік ключових ферментів: 1 -Глюкокіназа, 2 - Фруктозо-1,6-дифосфатальдолаза, 3 - Гліцеральдегід-3-фосфатдегідрогеназа, 4 – Піруваткіназа, 5 – Лактатдегідрогеназа, 6 - Глюкозо-6-фосфатдегідрогеназа, 7 - 6-фосфоглюконатдегідрогеназа, 8 – Фосфокетолаза, 9 – Ацетальдегіддегідрогеназа, 10 – Алкогольдегідрогеназа [41]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Усі види роду *Lactobacillus* є хемогетеротрофами, отримують енергію шляхом субстратного фосфорилування. За типом ферментації *Lactobacillus* поділяють на три групи: облігатно гомоферментативні ферментують цукри через гліколіз (загальні метаболічні реакції охарактеризовані вище) з утворенням молочної кислоти як кінцевого продукту; факультативно гетероферментативні ферментують цукри з утворенням молочної кислоти, а також етанолу та CO<sub>2</sub> за відсутності інших акцепторів електронів; облігатно гетероферментативні використовують як гліколіз, так і пентозофосфатний шлях [10, 41, 62].

Таблиця 2.1

Види бактерій роду *Lactobacillus* за типом бродіння

Гомоферментативні	Факультативно гетероферментативні	Облігатно гетероферментативні
<i>L. acidophilus</i>	<i>L. casei</i>	<i>L. brevis</i>
<i>L. delbrueckii</i>	<i>L. curvatus</i>	<i>L. buchneri</i>
<i>L. gasseri</i>	<i>L. paracasei</i>	<i>L. fermentum</i>
<i>L. helveticus</i>	<i>L. plantarum</i>	<i>L. reuteri</i>
<i>L. jensenii</i>	<i>L. sakei</i>	<i>L. pontis</i>
<i>L. salivarius</i>		

**Ферментація інших гексоз.** Гексози, відмінні від глюкози (маноза, галактоза, фруктоза), входять в основні метаболічні шляхи, описані вище, після різних етапів ізомеризації та фосфорилування у формі або глюкозо-6-фосфату, або фруктозо-6-фосфату. Для галактози існують два шляхи, залежно від того, як вона потрапляє в клітину: як галактозо-6-фосфат (через так звану лактозо-специфічну фосфоенолпіруват-залежну фосфотрансферазну систему, або PEP:PTS) або як вільна галактоза, що імпортується специфічною пермеазою (обидві системи розглянуті нижче). У першому випадку використовується *тагатозо-фосфатний шлях*, а в другому – *шлях Лелуара* [41] (рис. 2.5).



*PEP:PTS* (фосфоенолпіруват-залежна фосфотрансферазна система) – це енергетично ефективна система транспорту цукрів, специфічна для лактози в деяких МКБ. Вона імпортує лактозу в фосфорильованій формі (лактозо-6-фосфат), використовуючи лише одну молекулу АТФ на транслокацію. Під час проходження через мембрану зовнішня лактоза імпортується та фосфорилується, перетворюючись на лактозо-6-фосфат. Всередині клітини лактозо-6-фосфат гідролізується фосфо- $\beta$ -галактозидазою на галактозо-6-фосфат та глюкозу. Глюкоза перетворюється на глюкозо-6-фосфат глюкокіназою гліколітичним шляхом, а галактозо-6-фосфат входить у тагатозо-6-фосфатний шлях [10, 41, 62].

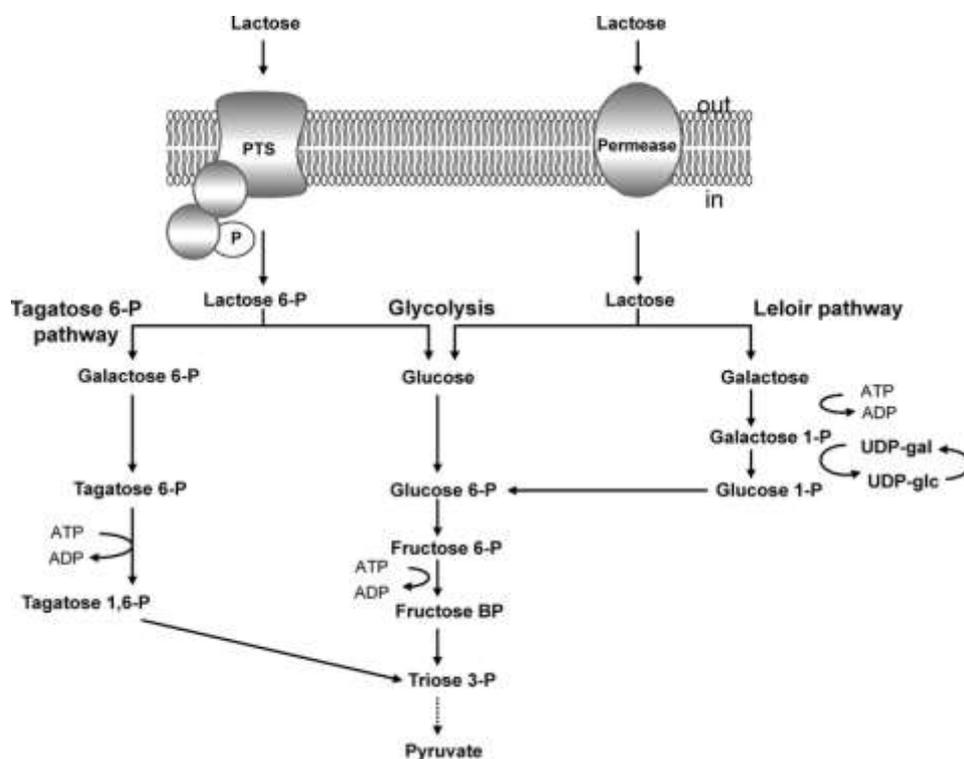


Рис. 2.6 - Два шляхи транспортування та метаболізму лактози (в *L. lactis*) [23]:

А) Шлях фосфотрансферазної системи (PTS): коли лактоза потрапляє в клітину через PTS Lac (LacEF), вона одночасно фосфорилується, утворюючи лактозо-6-фосфат. Лактоза транспортується за допомогою специфічної для лактози фосфотрансферазної системи (PTS), що призводить до накопичення лактозо-6-фосфату всередині клітини. Далі цей проміжний продукт розщеплюється ферментом фосфо- $\beta$ -галактозидазою на глюкозу та галактозо-6-фосфат.

Б) Шлях через пермеазу: коли лактоза транспортується через лактозну пермеазу, вона потрапляє в клітину у немодифікованому вигляді та розщеплюється  $\beta$ -галактозидазою на глюкозу та галактозу. Отримані моносахариди згодом потрапляють у шлях Ембдена–Мейергофа–Парнаса (гліколіз) або шлях Лелуара для подальшого отримання енергії.

Хоча різні види МКБ зазвичай віддають перевагу одній системі, існують випадки, коли обидві системи (пермеазна та PEP:PTS) можуть співіснувати в одному організмі. Вибір шляху часто залежить від того, чи здатна бактерія ефективно метаболізувати галактозу, чи вона використовує лише глюкозну частину дисахариду.

*Ферментація мальтози*, як і у попередньому випадку, залежить від наявності у певного виду МКБ певних ферментів. Транспорт мальтози через клітинну мембрану є першим кроком і може відбуватися кількома шляхами, залежно від виду ЛАБ. У багатьох випадках використовуються попередні специфічні системи пермеазну та PTS-систему. Наприклад, у лактококах, мальтоза транспортується за допомогою пермеази, яка забезпечує активний транспорт без фосфорилування, що дозволяє бактеріям ефективно використовувати мальтозу як джерело енергії в анаеробних умовах [60]. У деяких *Lactobacillus*, таких як *L. casei*, мальтоза може транспортуватися через PTS, де вона фосфорилується під час імпорту, утворюючи мальтозо-6-фосфат. Це енергетично ефективний механізм, але менш поширений для мальтози порівняно з іншими цукрами. Регуляція PTS включає індукцію виключенням, де присутність кращих джерел вуглецю, глюкози або інших швидко метаболізованих джерел вуглецю, блокує транспорт мальтози [42]. Також слід відмітити наявність у певних видів АТФ-залежного транспортеру мальтози АВС, завдяки якому мальтоза імпортується в клітину. Ця система регулюється репресією катаболіту вуглецю, що пригнічує транспорт у присутності глюкози. АВС-транспортери поширені в МКБ і забезпечують високу афінність до мальтози, особливо в середовищах з низькою концентрацією цукрів [58].

									162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						28





*Акцептори електронів.* У реакціях бродіння піруват або ацетил-СоА та ацетальдегід виступають у ролі акцепторів електронів для підтримки окисно-відновного балансу. Проте в клітині можуть бути доступні інші акцептори електронів, що впливають на енергетичний баланс та швидкість росту МКБ.

*Роль кисню в енергетичному метаболізмі.* МКБ Хоча молочнокислі бактерії належать до аеротолерантних мікроорганізмів, наявність кисню часто виступає каталізатором їхнього росту.

У гетероферментативних МКБ присутність кисню як альтернативного акцептора електронів дозволяє перенаправити метаболізм ацетилфосфату з утворення етанолу на синтез ацетату. Ця зміна є енергетично вигідною, оскільки генерує додаткову молекулу АТФ. Дослідження лейконостоків підтвердили, що в аерованих умовах активується НАДН-оксидаза, що пришвидшує ріст культури. Більше того, для деяких штамів наявність кисню є критичною, оскільки через брак ацетальдегіддегідрогенази вони не здатні ефективно розщеплювати глюкозу в анаеробному середовищі [41].

Для гомоферментативних МКБ кисень також має значення: НАДН-оксидази конкурують із лактатдегідрогеназою за відновний еквівалент. Це створює надлишок пірувату, який бактерія спрямовує на синтез ароматичних сполук – діацетилу та ацетоїну. Крім того, певні субстрати (поліоли, зокрема гліцерин чи маніт) можуть засвоюватися лише за участі кисню [10].

Важливим відкриттям стало те, що за наявності гему або гемоглобіну деякі види МКБ (зокрема *L. lactis*) здатні перемикатися на повноцінне дихання (окисне фосфорилування), що суттєво змінює їхні технологічні характеристики [38].

*Органічні сполуки в ролі альтернативних акцепторів електронів.* На метаболічний профіль гетероферментативних МКБ суттєво впливає наявність органічних молекул (зокрема, цитрат, оксалоацетат, гліцерин, фруктоза), здатних виступати акцепторами електронів. Це призводить до явища

									162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						31

коферментації, під час якого напрямок метаболізму зміщується від синтезу етанолу до утворення ацетату (через ацетилфосфат), що збільшує вихід енергії.

При коферментації з глюкозою *оксалоацетат* (продукт розпаду цитрату) може відновлюватися до сукцинату (через малат і фумарат). Такий шлях характерний для МКБ рослинного походження. Також описані випадки, коли коферментація цитрату призводить до накопичення 2,3-бутандіолу [39, 48].

*Гліцерин* використовується як акцептор електронів шляхом двоступеневого перетворення – спочатку до 3-гідроксипропіональдегіду, а потім до 1,3-пропандіолу [10].

*Фруктоза* може одночасно слугувати і субстратом, і акцептором. У процесі відновлення фруктози манітдегідрогеназою утворюється маніт. Це важливо для тих бактерій, у яких фруктоза стимулює обмежений метаболізм глюкози [28].

Серед різних родів МКБ у пивоварінні перевагу надають видам роду *Lactobacillus*. На основі наведеної інформації щодо метаболізму МКБ та досвіду використання цих бактерій у пивоварінні слід зазначити, що штами МКБ, які використовуються у молочній промисловості, не рекомендується застосовувати для приготування пива типу Sour Ale, оскільки вони синтезують діацетил у досить високих концентраціях, що надають напою маслянистого або згірлого запаху [20]. Також важливим з технологічної точки зору є використання кисню як акцептора, тому що для бактерій роду *Lactobacillus* наявність розчиненого в суслі кисню інгібує їхнє розмноження. Це обумовлює доцільність деаерації сусла, наприклад методом барботування діоксидом вуглецю, перед інокуляцією, що сприяє активізації синтезу молочної кислоти.

Важливим аспектом розробки технології «Sour Ale» є вибір штаму, здатного ефективно ферментувати складний вуглеводний склад пивного сусла. Окрім ферментації вуглеводів складність смакоароматичного букета

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

кислих елів обумовлена синтезом вторинних метаболітів (ефірів, вищих спиртів, альдегідів). Тому особливу увагу приділяють речовинам, які утворюються у процесі дозрівання кислих елів. Комбінації ефірів, спиртів, альдегідів, кетонів, алканів, що синтезуються мікроорганізмами протягом ферментації сусла, зокрема впливають і на визначення смаку та аромату згідно із так званим «Колесом смаків пива» (Beer Flavour Wheel) [25, 56]. Це ієрархічна структура, де кожен термін має свій унікальний цифровий код (зазвичай 4 цифри). Перші дві цифри вказують на клас (Level 1): основну категорію (наприклад, 01 - ароматні/фруктові, 06 - маслянисті/діацетил). Другі дві цифри вказують на конкретний дескриптор (Level 2) всередині класу (наприклад, 0150 - яблучний). Номери зафіксовані в офіційних виданнях - Analytica-EBC (розділ «Sensory Analysis»). Комітет сенсорного аналізу EBC постійно оновлює ці списки, додаючи нові сполуки, які ідентифікують за допомогою газової хромато-мас-спектрометрії (ГХ-МС) [57]. Використання номерів EBC дозволяє усунути суб'єктивізм, сприяють стандартизації та є основою сенсорного контролю для складання профілограм напою.

Також у біотехнології цього типу пива визначальними для регулювання метаболічної активності бактерій та запобігання розвитку сторонньої мікрофлори є параметри температури та активної кислотності середовища. Всі означені вище властивості бактерій роду *Lactobacillus*, що використовуються у пивоварінні, систематизовано у табл. 2.2.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Таблиця 2.2

Метаболічні та біотехнологічні властивості бактерій роду *Lactobacillus*

Вид бактерій / Показник / (смак, аромат, відчуття у роті, Номер ЕВС)	<i>L. delbrueckii</i>	<i>L. plantarum</i>	<i>L. brevis</i>	<i>L. fermentum</i>
Тип бродіння	Гомо-	Факульт. гетеро-	Облігат. гетеро-	Облігат. гетеро-
Ферментація вуглеводів пивного суслу:				
глюкоза	+	+	+	+
сахароза	±	+	±	±
мальтоза	±	+	±	+
рафіноза	-	-	-	±
Синтез CO <sub>2</sub>	-	-	+	+
Ключові первинні метаболіти	Молочна кислота (D- та L-форми, >80% від глюкози)	Молочна кислота (основний), оцтова кислота, формиат, сукцинат (в анаеробних умовах).	Молочна кислота, етанол (або оцтова кислота), CO <sub>2</sub> .	Молочна кислота, етанол (або оцтова кислота), CO <sub>2</sub> , 3-гідроксипропіонова кислота (від гліцерину).
Синтез діацетилу (Масляний, молочний, солодко-молочний, згірклиий, 0620)	±	±	-	-
Ефіри, що синтезуються бактеріями роду <i>Lactobacillus</i>				
Етилацетат (оцтово-етиловий) (Фруктовий при середніх концентраціях, 0133)	+	±	+	+
Пропілацетат (оцтово-пропіловий) (Грушевий, легкий фруктовий, 0146)	+	+	+	+
Етилпропіонат (етиловий ефір пропіонової к-ти) (Ананас, ківі, 0140)	+	+	+	+
Спирти, що синтезуються бактеріями роду <i>Lactobacillus</i> :				
одноатомні:				
Гексанол (Свіжоскошена трава, легкий фруктовий, 0230)	+	+	+	+
Гептанол (Зелена трава, 0231)	-	+	-	-

Октанол (Фруктово-квітковий, апельсиновий, солодкий, 0140)	-	-	±	-
Пропанол (Апельсин, абрикос, 0110)			-	-
вищі спирти:				
2-Метил-1-пентанол (Землистий, затхлий, 0840)			+	-
3-Гексен-1-ол (Свіжоскошена трава, листя, 0231)			-	-
3-Метил-1-бутанол (Спиртовий, винний, 0112)	-	+	-	-
Альдегіди, що синтезуються бактеріями роду <i>Lactobacillus</i> :				
Ацетальдегід (Зелені яблука, яблучна шкірка, 0150)	+	+	+	±
Бензальдегід (Мигдаль, марципан, мигдальна олія, 0224)	-		-	-
Гексаналь (Трав'янистий, 0230)	±	+	+	+
3-Метил-гексаналь (Сильний фруктовий, 0140)	-	±		
Гептаналь (Маслянистий)	-	+	+	±
Транс-2-гептаналь (Пліснявий, сира картопля, 0840)	-	+	+	-
Октаналь (Фруктовий, цитрусовий, 0141)	-	+	+	+
Ноненаль (Овочевий, перестиглі овочі, 0730)	±	+	+	+
Алкани, що синтезуються бактеріями роду <i>Lactobacillus</i> :				
Гексан (солодкий, відтінок розчинника, 0130)	+	+	+	+
Гептан (солодкий, відтінок розчинника, 0130)	+	+	±	±
Октан (сивушний, відтінок розчинника, 0130)	+	+		
Вплив фізико-хімічних чинників на життєдіяльність мікроорганізмів:				
Оптимальна температура розмноження / Межі температури розмноження, °С	32-50 / мін. 20, макс. 65	30 / мін. 10, макс. 45	30 / мін. 15, макс. 45	37-40 / мін. 15, макс. 45
Оптимальні значення рН / Межі рН розмноження	5,0-6,0 / мін. 3,0, макс. 7,0	5,0-6,0 / мін. 3,0, макс. 7,0	4,0-6,0 / мін. 3,0, макс. 8,0	5,0-6,0 / мін. 3,0, макс. 8,0
Стійкість до етанолу	до 14%	до 20%	до 15%	до 10%

										Арк.
										35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	162.01.05.00 000 ПЗ					

Умовні позначення: «+» ознака присутня; «-» ознака відсутня; «±» здатність до ферментації залежить від конкретного штаму або речовина утворюється у незначних кількостях.

При гомоферментативному бродінні основним продуктом метаболізму є молочна кислота, частка якої становить понад 90% від загальної кількості метаболітів, у процесі гетероферментативного бродіння синтезується значна кількість летких кислот, що беруть участь у формуванні смакоароматичного профілю напою (їхня частка може сягати 15% від загальної кількості кислот) [41]. Таким чином, для приготування напою з вираженим кислим смаком і мінімальною кількістю ароматичних речовин (із «чистим» ароматом) доцільно використовувати гомоферментативні культури *L. delbrueckii*. Для сортів кислого елю зі складнішим ароматом і «згладженим» кислим смаком застосовують гетероферментативні бактерії *L. brevis*, *L. fermentum*. Вид *L. plantarum* здатний переключати метаболізм з гетероферментативного на гомоферментативний за відсутності кисню.

Аналіз метаболічного профілю (табл. 2.2) показує, що всі досліджувані види роду *Lactobacillus* активно використовують глюкозу. Проте для пивоваріння критично важливою є здатність бактерій засвоювати мальтозу, яка є основним цукром солодового сусла. Найбільш стабільні результати у цьому аспекті демонструють *L. fermentum* та *L. plantarum*. Особливу увагу при розробці біотехнології слід приділити синтезу CO<sub>2</sub> - гомоферментативні види (*L. delbrueckii*, *L. plantarum*) не виділяють газ, що дозволяє отримувати більш «лаконічний» профіль кислотності, гетероферментативні види (*L. brevis*, *L. fermentum*) синтезують діоксид вуглецю, що може впливати на тиск у бродильному апараті та формування вторинних ароматичних сполук.

При розробці технології функціонального пива типу «Sour Ale» необхідно враховувати не лише швидкість закислення, а й стійкість культур до чинників середовища, що змінюються під час бродіння. Особливого

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

значення набуває толерантність до етанолу та гірких сполук хмелю (ізо-альфа-кислот). *L. delbrueckii* має високу інтенсивність кислотоутворення, деякі штами витримують короткочасну пастеризацію (85–90 °C), стійкі до етанолу (до 14% об.); *L. brevis* не синтезують діацетил, проте утворюють гліцерин, виявляють стійкість до гірких кислот хмелю, деякі штами стійкі до концентрації етанолу до 15% об.; *L. fermentum* синтезують етиловий спирт, розмноження відбувається у широкому діапазоні значень pH; *L. plantarum* синтезують гліцерин, бутандіол-2, 3 та бурштинову кислоту, мають високу спиртостійкість (витримують вміст етанолу до 20% об.). Отже, види *L. brevis* та *L. plantarum* сприяють покращенню органолептичних властивостей за рахунок синтезу гліцерину, який надає напою повноти смаку («тіла»), що є важливим для балансування високої кислотності; *L. plantarum* є найбільш перспективним видом для технологій, що передбачають тривале спільне бродіння з дріжджами (коферментація), оскільки його життєдіяльність не пригнічується високим вмістом спирту.

Аналіз синтезу вторинних метаболітів (табл. 2.2) показав, що високий рівень гексаналю та 1-гексанолу, що синтезуються більшістю штамів, забезпечує кислим елям характерний «трав'янистий» та «зелений» профіль, який гармоніює з високою кислотністю; наявність транс-2-гептаналю (особливо у *L. plantarum*) може надавати небажаних «підвальних» ноток. Це обґрунтовує необхідність використання рослинної сировини (ягід, фруктів) для маскування цих відтінків; активний синтез етилацетату видом *L. delbrueckii* робить його ідеальним для отримання напоїв з яскраво вираженим фруктовим профілем.

У процесі дозрівання кислих елів особливу увагу приділяють кетонам та алканам, оскільки їх надмірна концентрація може призвести до появи сторонніх присмаків, які не відповідають профілю «Sour Ale». Аналіз здатності бактерій синтезувати діацетил та алкани також дозволяє сформулювати певні технологічні рекомендації, що важливі при організації

						162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			37



### 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Розрахунок матеріального балансу

Матеріальний баланс складено для пілотної серії виробництва функціонального пива «Sour Ale» 100 л:

Найменування компонентів	Вміст осн. реч., %	Маса, кг	Маса осн. реч., кг	Об'єм, л
1. Затирання та фільтрація				
Витрачено:				
Вода (основна + промивна)	100	115,0	115,0	115,0
Солод Pilsner	80	6,0	4,8	-
Пшениця немальтована	75	4,0	3,0	-
Отримано:				
Сусло неохмелене	12	110,0	13,2	110,0
Дробина волога (відхід)	20	14,5	2,9	-
Втрати при фільтрації	-	0,5	-	-
2. Кип'ятіння та охолодження				
Витрачено:				
Сусло неохмелене	12	110,0	13,2	110,0
Хміль Saaz	4	0,015	0,0006	-
Отримано:				
Сусло охмелене	13	98,5	12,8	98,5
Випаровування (втрати)	100	11,0	11,0	11,0
Осад білковий (відхід)	-	0,515	-	-

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Найменування компонентів	Вміст осн. реч., %	Маса, кг	Маса осн. реч., кг	Об'єм, л
3. Коферментація та дозрівання з ягодами				
Витрачено:				
Сусло охмелене	13	98,5	12,8	98,5
Ксилолігосахариди	100	1,0	1,0	-
Пюре чорниці та малини	10	6,0	0,6	6,0
Біомаса МКБ та дріжджів	100	0,25	0,25	0,25
Отримано:				
Пиво готове	6,5	101,5	6,6	101,5
Дріжджовий та ягідний осад	-	4,25	-	-
4. Розлив				
Витрачено:				
Пиво готове	6,5	101,5	6,6	101,5
Отримано:				
Пиво в упаковці (ГП)	6,5	100,0	6,5	100,0
Втрати при розливі	-	1,5	-	1,5

Розрахунок проведено з урахуванням того, що густина готового пива наближається до 1,0 кг/л, отже 100 л близько 100 кг.

Розрахунок базується на рівнянні збереження маси:  $G1 = G2 + G4 + G5$ , де [16]:

- G1 - маса вихідної сировини та матеріалів;
- G2 - готовий продукт;
- G4 - побічні продукти та відходи (дробина, осад);
- G5 - втрати (випаровування, механічні втрати).

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом на пілотну серію:

	Маса, кг	% до виходу
Всього витрачено сировини (G1):	132,265	100%
Отримано готового продукту (G2):	100,0	75,61%
Відходи (дробина, осад) (G4):	19,265	14,56%
Загальні втрати (G5):	13,0	9,83%

Технологія виробництва функціонального пива «Sour Ale» на вітчизняному підприємстві передбачає масштабування до 1000 л, тому розрахуємо матеріальний баланс для цього об'єма виробництва:

Найменування	Вміст осн. реч., %	Маса, кг	Маса осн. реч., кг	Об'єм, л	Кількість, шт
1. Затирання та фільтрація					
Витрачено:					
Вода заторна	100	400	400	400	-
Солод Pilsner (екстракт)	80	60	48	-	-
Пшениця немальтована	75	40	30	-	-
Отримано:					
Неохмелене сусло	14	340	47,6	340	-
Дробина (волога відхід)	20	160	32	-	-
2. Кип'ятіння та охолодження					
Витрачено:					
Неохмелене сусло + промивна вода	12	1100	132	1100	-

						162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			41

Найменування	Вміст осн. реч., %	Маса, кг	Маса осн. реч., кг	Об'єм, л	Кількість, шт
Хміль Saaz	4	0,15	0,006	-	-
Отримано:					
Охмелене сусло	12	1000	120	1000	-
Випаровування (втрати)	100	100	100	100	-
3. Коферментація (первинна)					
Витрачено:					
Охмелене сусло	12	1000	120	1000	-
Пребіотик XOS	100	10	10	-	-
Біомаса МКБ та дріжджів	100	2,5	2,5	2,5	-
Отримано:					
Молоде пиво	6	995	59,7	995	-
Втрати CO2 та осад	-	17,5	-	-	-
4. Внесення ягід та дозрівання					
Витрачено:					
Молоде пиво	6	995	59,7	995	-
Пюре чорниці та малини (1:1)	10	70	7	70	-
Отримано:					
Пиво готове до розливу	6,5	1030	66,9	1030	-
Осад ягід та дріжджів (відхід)	-	35	-	-	-

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Найменування	Вміст осн. реч., %	Маса, кг	Маса осн. реч., кг	Об'єм, л	Кількість, шт
5. Розлив					
Витрачено:					
Пиво «Sour Ale»	6,5	1030	66,9	1030	-
Тара (пляшки 0,5 л)	-	-	-	515	1030
Кеги (50 л)	-	-	-	500	10
Отримано:					
Пиво в упаковці	6,5	1015	65,9	1015	1040
Механічні втрати розливу	-	15	-	15	-

Загалом на серію в 1000 л:

Найменування	Маса, кг	Об'єм, л	% від загального
Витрачено (Сировина та матеріали)	1332,65	1232,5	100%
Отримано (Готовий продукт)	1015,00	1015,0	76,16%
Відходи (Дробина, осад)	202,50	-	15,19%
Втрати (Випаровування, розлив)	115,15	115,0	8,65%

Розрахунок показників ефективності:

1. Витратний коефіцієнт сировини ( $K_r$ ):

$$K_r = G_1 / G_2 = 1332,65 = 1,31$$

Це означає, що для отримання 1 кг функціонального пива необхідно 1,31 кг сировинних компонентів (включаючи воду).

2. Вихід готової продукції ( $\eta$ ):

$$\eta = G_2 / G_1 \cdot 100\% = 1015 / 1332,65 \cdot 100\% = 76,16\%$$

Вихід становить 76,16% від загальної маси витраченої сировини.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

### 3. Втрати ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = G5/G1 \cdot 100\% = 115,15/1332,65 \cdot 100\% = 8,65\%$$

Втрати становлять 8,65%. Основна частка втрат (85%) припадає на випаровування при кип'ятінні. Розрахований матеріальний баланс демонструє високу ефективність використання сировини.

## 3.2 Обґрунтування та вибір обладнання

Перелік обладнання для пілотної серії виробництва функціонального пива «Sour Ale» наведено у описі процесу та у специфікації у розділі 3.4. Технологія передбачає масштабування до виробничої серії на 1000 л. Масштабування технології з 100 л до 1000 л готового продукту потребує не просто збільшення об'ємів ємностей, а переходу на промисловий рівень автоматизації та зміну методів енергозабезпечення.

Для забезпечення виходу 1000 л готового пива, з урахуванням втрат та потреби у вільному просторі для піноутворення, розрахункові об'єми апаратів мають наступні коефіцієнти запасу:

- Варильний порядок (комплекс обладнання, призначений для отримання готового охмеленого сусла з подрібненого солоду та води, тут відбуваються всі «гарячі» процеси виробництва до моменту передачі сусла на бродіння):  $V_{ном} = V_{гот} \times 1,2 - 1,3$  (через інтенсивне кипіння).

- Бродильні апарати (ЦКТ):  $V_{ном} = V_{сусла} \times 1,25$  (враховуючи високу піну при роботі з пшеницею та ягодами).

*1. Варильний порядок.* Комбі-бревхаус - компактне інженерне рішення, де кілька технологічних операцій об'єднані в одному або двох корпусах. Це ідеальний варіант для крафтових броварень (на 100–1000 л), оскільки він економить площу цеху, енергоресурси та спрощує обслуговування. У крафтовому виробництві об'ємом 1000 л використання двопосудинної комбінованої системи є найбільш економічно та технологічно обґрунтованим.

									162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						44





при високих температурах утворюються складні цукри, які дріжджі не можуть повністю засвоїти, що робить кінцевий продукт солодшим та повнотілим.

Ферменти працюють швидко: приблизно за годину вони завершують конвертацію крохмалю в цукор. Після цього ферментативна активність припиняється підвищенням температури затору до понад 77–78°C. Цей процес називається затиранням (меш-аут).

Фільтраційний апарат (Lauter tun). Комбінована конструкція розпушувальних ножів підвищує ефективність фільтрації. Збільшення діаметра центральної кругової конструкції значно покращило швидкість вивантаження дробини. Завдяки такому базовому дизайну затор заповнює апарат рівномірно та швидко, а циркуляція суслу відбувається з мінімальним поглинанням кисню. Встановлення вихідних отворів згідно з принципами гідродинаміки забезпечує стабільний потік суслу через трубопроводи та збірне кільце. Використання розпушувального механізму з піднятим ущільненням головного валу запобігає витокам і покращує санітарний стан. Апарат може використовуватися як затиральний, що задовольняє різноманітні технологічні потреби крафтового пивоваріння.

Процес фільтрації та промивання (Lautering & Sparging). Наступним кроком є відокремлення затору від відпрацьованої зернової дробини та отримання цукристої рідини, відомої як сусло - фільтрація (lautering). Для початку фільтрації затор перекачують в апарат із подвійним дном (ситами), який називається фільтраційним чаном. Тут прозоре сусло стікає крізь шар дробини. Під час фільтрації також додається вода для екстракції максимальної кількості зброджуваних цукрів із зерна - промивання дробини (sparging).

Промивання має відбуватися поступово, щоб не порушити шар дробини, який слугує природним фільтром. Зазвичай промивна вода подається з тією ж швидкістю, з якою стікає сусло. Найважливішим елементом тут є фальш-дно (сита), яке повинно мати спеціальну конфігурацію з «V»-подібними прорізами.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

## Блок Б. Сусловарильний апарат / Вірпул (Kettle/Whirlpool)

Після фільтрації сушло перекачується у другий блок, де відбувається його підготовка до бродіння. На відміну від ТЕНів, пара подається у спеціальну парову сорочку на дні та стінках апарату. Це забезпечує «м'який» нагрів. Температура стінки не перевищує 120–130°C, що виключає карамелізацію та пригорання білків пшениці, які є дуже чутливими до високих температур.

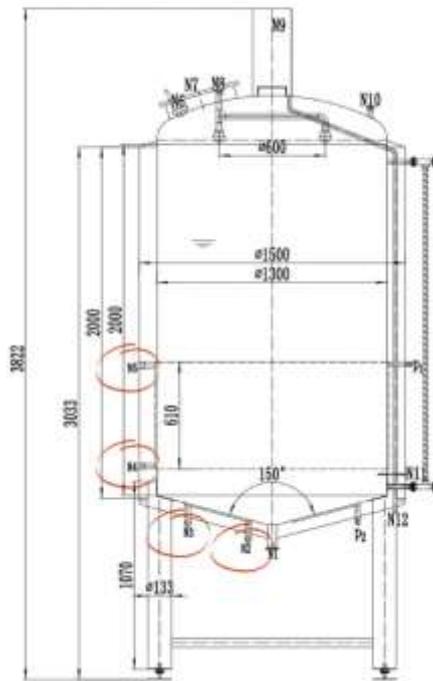


Рис. 3.2 - Сусловарильний апарат з двома паровими сорочками - перша розташована на дні апарата, пара подається через штуцер N3 і виходить через N2, друга сорочка охоплює бічні стінки, пара входить через штуцер N5 і виходить через N4.

Функція вірпула - після закінчення кип'ятіння апарат працює як гідроциклон. Сушло подається всередину через тангенціальний вхід під тиском, що створює коловий рух рідини. Під дією відцентрових сил дрібні частки хмелю та згорнуті білки збираються у щільний осад («труб») у центрі дна, дозволяючи відбирати прозоре сушло через бічний патрубок.

Для отримання 1000 л сушла з початковою густиною 12%, враховуючи випаровування 10% та осад, об'єм сусловарильного апарату має бути 1300–

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

1500 л. Запас 30–50% необхідний для запобігання «збіганню» піни під час бурхливого кипіння та для вільного простору при вірпульному обертанні. Замість ТЕНів (електрики) використовується паровий нагрів для запобігання пригаранню часток пшениці.

Обидва блоки монтуються на єдиній сталевій рамі (скіда), що зменшує довжину трубопроводів та втрати продукту в них. Промислова серія оснащується пневмоклапанами, що дозволяє керувати процесом з одного сенсорного екрана, мінімізуючи людський фактор.

## 2. Циліндрично-конічні танки (ЦКТ)

Оскільки технологія передбачає тривалу коферментацію та внесення ягід, ЦКТ мають бути оснащені посиленими термосорочками (рис. 3.3). Внесення ягідного пюре може викликати «вторинне бурхливе бродіння». При цьому виділяється багато тепла. Оскільки *Lactobacillus plantarum* чутливі до перепадів температур, сорочки повинні мати велику площу охолодження, щоб миттєво компенсувати стрибки температури й тримати її точно в межах 18–22°C.

Робочий об'єм  $V_{роб} = 1000$  л. Повний об'єм  $V_{повн} = 1000 \times 1,25 = 1250$  л. При коферментації дріжджі та бактерії активно виділяють вуглекислий газ, створюючи високу піну (особливо через наявність білків пшениці та пектинів ягід). 25% вільного простору - це стандарт безпеки, щоб піна не забила шпунт-апарат (клапан скидання тиску).

Технологія включає три етапи, що відбуваються в одному апараті:

- Первинна коферментація (*S. cerevisiae* + *L. plantarum*) - 7–10 діб.
- Вторинна ферментація з ягодами (*Brettanomyces* + дозрівання) - 14–18 діб.
- Мийка, дезінфекція (CIP) та підготовка танка: 1 доба.

Загальний цикл використання одного танка (Тцикл) складає приблизно 28 діб (4 тижні).

									Арк.
									54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

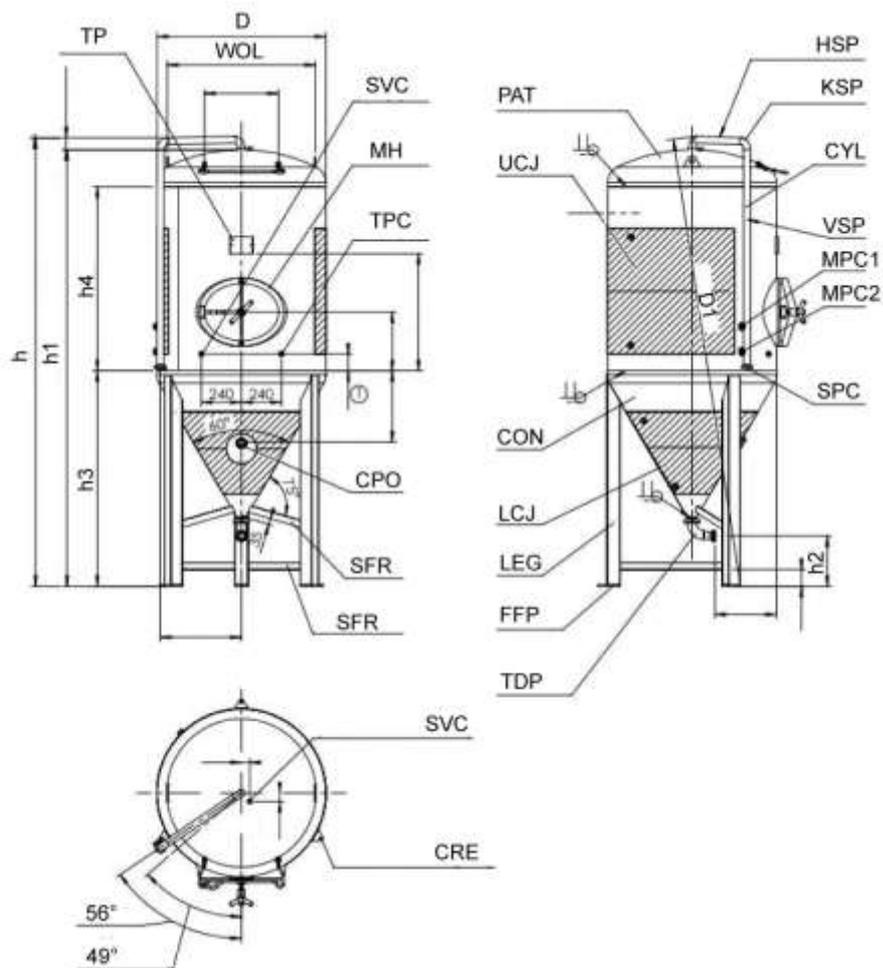


Рис. 3.3 – Циліндро-конічний танк (1000 л):

D Загальний діаметр  
 МН Люк із дверцятами  
 TP Заводська табличка (шильдик)  
 UCJ Верхня сорочка охолодження  
 HSP Горизонтальна труба СІП-мийки  
 h Загальна висота  
 CPO Вихід для освітленого продукту  
 SVC Патрубок пробовідбірного крана  
 LCJ Нижня сорочка охолодження  
 KSP Коліно труби СІП-мийки  
 h1 Висота танка  
 TDP Труба зливу танка (повне випорожнення)  
 TPC Патрубок для температурного датчика

CON Конічна частина  
 SPC З'єднання для труби СІП-мийки  
 h2 Висота зливного патрубку  
 SFR Опорна рама  
 CRE Вушка для монтажу краном (рим-болти)  
 CYL Циліндрична частина  
 MPC Багатофункціональні з'єднання  
 PAT Верхня частина під тиском (купол)  
 SVC З'єднання для запобіжного клапана  
 WOL Ширина по опорах (ніжках)  
 VSP Вертикальна труба СІП-мийки  
 LEG Опори (ніжки)

Технічні параметри ЦТК (1000 л):

- Корисний об'єм: 1000 літрів
- Загальний об'єм: 1200 літрів
- Загальна висота (H): 2856 мм

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



діб. Це забезпечує максимальне завантаження варильного порядку та рівномірний вихід готової продукції на лінію розливу

### 3. Установа приготування ХОS (Ксилолігосахаридів)

Виробництво ксилолігосахаридів безпосередньо на базі browарні - це приклад сталого виробництва. Установа перетворює відхід (пивну дробину) на цінний пребіотичний інгредієнт, що робить «Sour Ale» унікальним функціональним продуктом.

У промисловій моделі виробництва установка приготування ХОS являє собою автоматизований біореактор-гідролізатор, інтегрований у загальну систему енергопостачання browарні. Реактор-гідролізатор являє собою ємність об'ємом 250–300 л з нержавіючої сталі AISI 316L (підвищена стійкість до органічних кислот). Апарат оснащений термосорочкою для точного підтримання температури та якісною теплоізоляцією. Як перемішувачий пристрій використовується рамна або якірна мішалка з низькими обертами та високим крутним моментом. Це необхідно для рівномірного розподілу ферментів у густій масі промитої дробини. Після завершення гідролізу отримана суміш проходить через блок тонкої фільтрації (прес-фільтр або модульну систему фільтр-картону) для відокремлення чистого сиропу ХОS від залишків целюлози.

Процес отримання пребіотику в межах технологічного циклу триває паралельно з варінням основного суслу. У реактор подається частина свіжої промитої дробини з фільтр-чана. Потім відбувається гідроліз - додається ферментний комплекс (ендо-ксиланази). За температури 50–60°C та постійного рН-контролю протягом 4–6 год відбувається розщеплення геміцелюлози дробини до низькомолекулярних олігосахаридів. По завершенню реакції суміш нагрівається до 85–90°C для інактивації ферментів, після чого сироп фільтрується.

Для промислової серії пива об'ємом 1000 л необхідно внести 10 кг ХОS. Враховуючи, що середня концентрація ХОS в отриманому гідролізаті

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

становить близько 4–5%, для виділення 10 кг чистої речовини необхідно обробити об'єм рідини, що відповідає робочому об'єму реактора у 250 л. Такий об'єм дозволяє за один цикл отримати необхідну кількість пребіотичного концентрату, який згодом подається безпосередньо в ЦКТ на стадії коферментації.

Специфікація обладнання промислової серії (1000 л) наведено у табл.

3.1.

Таблиця 3.1

Специфікація обладнання промислової серії (1000 л)

Назва обладнання	Призначення	Технічні характеристики (1000 л)	Особливості масштабування
Дробарка чотирьохвальцова	Подрібнення солоду та пшениці	Продуктивність 300–500 кг/год	Більш тонке налаштування для немальшованої пшениці
Затирально-фільтрувальний апарат	Затирання та відділення дробини	Об'єм 1300 л; частотне регулювання мішалки	Автоматизоване вивантаження дробини
Сушварильний апарат / Вірпул	Кип'ятіння та освітлення сусла	Об'єм 1500 л; паровий нагрів; датчик закипання	Тангенціальний вхід для формування "конуса" осаду
Пластинчастий теплообмінник	Охолодження сусла	Потужність: охолодження 1000 л за 30-40 хв	Двоступеневий (вода + пропіленгліколь)
ЦКТ (4 одиниці)	Повний цикл ферментації	Об'єм 1250 л; робочий тиск до 3 бар	Автоматичний контроль температури в 2 зонах
Реактор-гідролізатор XOS	Отримання пребіотиків з дробини	Об'єм 250 л; сорочка нагріву (до 90°C); мішалка	Вбудований рН-метр для контролю
Стационарна СІР-станція	Санітарна обробка	3 баки по 300 л (луг, кислота, гаряча вода/дезінфектор)	Повна автоматизація циклів мийки (PLC)
Автоматична лінія розливу	Фасування готового продукту	Продуктивність 1000–1500 пляшок/год	Вакуумування та продувка CO <sub>2</sub> для стабільності МКБ

### 3.3 Опис технологічного процесу

#### 3.3.1 Обґрунтування методу ферментації

У виробництві кислих елів поширеним методом є *Kettle souring* («кисління в котлі»), що відноситься до методів швидкого створення кислоти в пиві типу Sour Ale за допомогою МКБ, який проводиться в варочному котлі перед кип'ятіннями сусла. Цей підхід дозволяє досягти стабільної кислоти за 24–48 год, на відміну від традиційних методів спонтанної ферментації. Він особливо популярний у крафтовому пивоварінні, оскільки зменшує ризик небажаної контамінації та забезпечує чистий, контрольований смак з переважанням молочної кислоти, без сильних оцтових чи фенольних ноток. У стандартному методі Kettle souring МКБ (наприклад, *Lactobacillus plantarum* або *brevis*) додаються до неохмеленого сусла для швидкого вироблення молочної кислоти (24–48 год), що створює бажану кислоту (рН 3,2–3,6). Після досягнення кислоти сусло кип'ятять (60–90 хв при 100°C) з метою стерилізації сусла, запобігання подальшому неконтрольованому кислінню чи псуванню та фіксуванню смаку (кислотка залишається від органічних кислот) [44].

У контексті організації виробництва функціонального пива перевагою є живі МКБ у фінальному продукті (вище 10<sup>6</sup> КУО/мл, згідно з рекомендаціями FAO/WHO), тому можлива *модифікація методу Kettle souring* шляхом додаванням пробіотичних МКБ після ферментації. Цей варіант поєднує швидке кисління в котлі з окремим введенням живих пробіотиків для функціональності, уникаючи пастеризації [55]. Загальна схема проведення процесу містить наступні стадії:

1. Підготовка сусла. Затирання солоду з водою при 65–68°C на 60 хв, фільтрація.

									Арк.
									59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

2. Kettle souring (кисління в котлі). Неохмелене сушло охолодити до 35–40 °С, додати МКБ-1 (наприклад, *L. plantarum*, 10<sup>7</sup> КУО/мл) для кислоти. Витримати 24–48 год до рН 3,4–3,6. Кип'ятити 60–90 хв з додаванням хмелю, що вбиває МКБ-1.

3. Первинна ферментація. Охолодити до 18–20°C, додати дріжджі (*S. cerevisiae*, 10<sup>6</sup> клітин/мл), ферментувати 7–10 днів.

4. Вторинна ферментація та дозрівання. Додати *Brettanomyces* для ароматів (2–4 тижні), рослинну сировину (5–10% ягідне пюре) та пробіотичні МКБ-2 (наприклад, класичні *L. paracasei* або *rhamnosus*, 10<sup>7</sup>–10<sup>9</sup> КУО/мл). Ягоди діють як пребіотики (пектини, олігосахариди), живлячи МКБ-2 для виживання.

5. Розлив. Без пастеризації, розлити в пляшки/кеги як «живе» пиво. Зберігання протягом 1–3 місяці при 4–6°C для збереження життєздатності МКБ. На етапі розливу перевірити життєздатність клітин.

Очікуваний продукт - кисле пиво з фруктовими нотами, живими пробіотиками та антиоксидантами.

Інший варіант отримання функціонального кислого пива - **сумісна ферментація (коферментація) дріжджів та МКБ**. Цей метод передбачає одночасну або послідовну роботу дріжджів та МКБ без кип'ятіння після кислоти, що дозволяє МКБ вижити для реалізації пробіотичних властивостей. Загальна схема проведення процесу [40, 49]:

1. Підготовка сушла. Затирання солоду з водою при 65–68°C на 60 хв, фільтрація. Кип'ятити 60 хв з додаванням хмелю, охолодити до 18–25°C.

2. Коферментація. Додати дріжджі (*S. cerevisiae*, 10<sup>6</sup> клітин/мл) та МКБ (*L. plantarum*, 10<sup>7</sup> КУО/мл) разом або послідовно (спочатку МКБ на 24–48 год для отримання кислоти при 30–35°C, потім дріжджі). Ферментувати 7–14 днів при 18–22°C, контролюючи рН (3,4–3,6) та смак. МКБ виробляють молочну кислоту паралельно з алкогольною ферментацією дріжджів.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

3. Вторинна ферментація та дозрівання. Додати рослинну сировину (5–10% ягідне пюре) та *Brettanomyces* для складних ароматів (2–4 тижні) (за потребою, якщо передбачено рецептурою). Ягоди посилюють виживання МКБ завдяки пребіотичній дії (пектини, феноли), роблячи продукт функціональним з живими пробіотиками.

4. Розлив. Без пастеризації, розлити як «живе» пиво. Зберігання - 1–3 місяці при 4–6°C. Контроль якості: регулярно перевіряти рН, відсоток спирту (ABV) та життєздатність МКБ протягом ферментації та перед розливом.

Очікуваний продукт - більш комплексне кисле пиво з живими МКБ, фруктовими нотами та пробіотичними ефектами.

Аналіз обох методів наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Аналіз методів виробництва кислого пива

Критерій	Варіант 1: Kettle souring з додаванням МКБ	Варіант 2: Коферментація
Складність технології	Перевага: Низька – контрольоване кисління в котлі, низький ризик контамінації, стандартне обладнання. Недолік: Додатковий крок введення МКБ-2, потреба в гігієні для живих культур.	Перевага: Інтегрований процес для пробіотиків. Недолік: Висший ризик контамінації, потреба в точному контролі рН/температури, потенційні проблеми з балансом мікрофлори.
Час	Перевага: Швидкий – 24–48 год на кислінку, загалом 3–6 тижнів. Недолік: Додатковий час на дозрівання з МКБ -2 (1–2 тижні).	Перевага: Комплексний смак за менший час, ніж традиційна спонтанна ферментація. Недолік: Довший – 2–8 тижнів на коферментацію, ризик уповільнення через взаємодію мікрофлори.
Вартість	Перевага: Низька – менше енергоресурсів (швидкий процес), стандартні культури МКБ. Недолік: Додаткова вартість на окремі пробіотичні штами МКБ -2 та контроль якості.	Перевага: Економія на культурах (один набір МКБ). Недолік: Довший цикл підвищує витрати на зберігання та контроль, потенційні втрати від контамінації.

Враховуючи поставлену мету – функціональне пиво із максимально повним смако-ароматичним профілем для реалізації виробництва на

вітчизняному підприємстві обираємо метод коферментації із змішаними культурами дріжджів та МКБ.

Використання *змішаних культур* у виробництві ферментованих напоїв (зокрема кислих елів, ламбіків та фруктових пива) відкриває нові можливості для створення складних смако-ароматичних профілів. Ключовою перевагою присутності МКБ у *процесі коферментації* є синтез органічних кислот. Це не лише забезпечує характерну кислотність напою, але й ініціює утворення вторинних метаболітів, таких як етиллактат - важлива ароматична сполука, що виникає внаслідок взаємодії метаболітів дріжджів та бактерій [51].

Наприклад, дослідження штаму *Lactobacillus brevis* (зокрема ізоляту LBCM718), виділеного з пива з високою кислотністю, підтверджують його високу життєздатність у складних умовах пивоваріння. Як обов'язковий гетероферментативний мікроорганізм, цей штам продукує збалансований набір кінцевих метаболітів: лактат, етанол, ацетат та CO<sub>2</sub> [62].

Коферментація з використанням МКБ забезпечує природний біозахист продукту. Швидке зниження рН середовища за рахунок продукування молочної кислоти створює несприятливі умови для розвитку патогенної мікрофлори та мікроорганізмів, що спричиняють псування. Результати тестування ізоляту LBCM718 разом зі штаммами дріжджів LBCM78 та WB-06 продемонстрували, що спільна присутність бактерій не пригнічує виробництво етанолу дріжджами, життєздатність обох видів мікроорганізмів зберігається протягом усього процесу ферментації. Досягається цільове значення рН суслу, необхідне для специфічних стилів пива [44, 62].

Метод коферментації дріжджів та гетероферментативних МКБ є високоефективним інструментом для виробництва спеціальних стилів пива. Це дозволяє пивоварам контролювати рівень кислотності та збагачувати аромат напою без негативного впливу на основний вихід етанолу. Виявлена стійкість локальних ізолятів до хмелю та їхня температурна сумісність із

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

дріжджами верхнього бродіння роблять цей підхід перспективним для масштабування в умовах крафтового виробництва.

### 3.3.2 Опис технологічного процесу

Технологічна схема виробництва функціонального пива «Sour Ale» базується на методі коферментації (сумісного бродіння) зернового суслу за участю дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*, *Brettanomyces bruxellensis* та молочнокислих бактерій *Lactobacillus plantarum* з додаванням рослинної сировини та пребіотичних компонентів.

1. *Підготовка зернової сировини та затирання.* Процес розпочинається зі стадії підготовки зернової сировини. Базовий ячмінний солод типу Pilsner та немальтована пшениця проходять стадію подрібнення на двовальцовій дробарці, після чого спрямовуються на затирання. Затирання проводиться однопаузним методом за температури 67°C протягом 60 хвилин. Обраний режим забезпечує оптимальне співвідношення зброджуваних цукрів та декстринів, що формують повноту смаку («тіло») напою та виступають додатковим субстратом для мікроорганізмів. Після закінчення паузи проводиться нагрівання затору до 78°C (маш-аут) для інактивації ферментів та зниження в'язкості, що полегшує наступну стадію фільтрації у фільтр-чані.

Обладнання: Солододробарка (двовальцова), затиральний апарат.

Процес: Подрібнення солоду Pilsner та немальтованої пшениці (співвідношення 60/40).

Параметри: Затирання за однопаузним методом: 67°C - 60 хв (для формування незброджуваних цукрів, що підтримають «тіло»). Потім нагрів до 78°C - 10 хв (Mash-out).

Контроль: Повнота оцукрювання (йодна проба), температура, рН затору (5,4–5,6).

2. *Фільтрація та кип'ятіння суслу з хмелем.* Отримане прозоре сусло спрямовується у сусловарильний апарат для кип'ятіння з хмелем. Процес

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

триває 60 хв. Хміль сорту Saaz вноситься у невеликій кількості (10–15 г на 100 л сусла) за 15 хв до завершення кип'ятіння. Це дозволяє досягти низького рівня гіркоти (5–10 IBU), що є критичним параметром для життєдіяльності *Lactobacillus plantarum*, оскільки високі концентрації ізо- $\alpha$ -кислот інгібують ріст молочнокислих бактерій. Пивна дробина, що залишилася після фільтрації, піддається подальшій ферментативній обробці для виділення ксилолігосахаридів (XOS), які згодом використовуються як пребіотичний додаток.

Обладнання: Фільтр-чан, сусловарильний апарат.

Процес: Відділення пивної дробини. Кип'ятіння сусла 60 хв. Хміль Saaz (10–15 г) додається на 45-й хвилині кип'ятіння для досягнення IBU 5–10.

Параметри: Інтенсивність кипіння — 8–10% випаровування на годину.

Контроль: Початкова густина (1,045–1,050), прозорість сусла.

3. *Охолодження та підготовка до коферментації*. Після кип'ятіння сусло охолоджується у пластинчастому теплообміннику до температури 30–32°C та перекачується у циліндрично-конічний танк (ЦКТ) для стадії коферментації.

Обладнання: Пластинчастий теплообмінник.

Процес: Охолодження сусла до 30–32°C (оптимум для початкового старту *L. plantarum*).

Параметри: рН перед внесенням МКБ коригується до 5,0 харчовою молочною кислотою для захисту від сторонньої мікрофлори.

Контроль: Температура охолодження, стерильність трубопроводів.

#### 4. *Коферментація (первинна ферментація)*

На цьому етапі в потік сусла у ЦКТ вносяться: пребіотичний комплекс XOS (0,5–1,0 кг на 100 л), стартова культура *L. plantarum* ( $10^7$  КУО/мл) та дріжджі *S. cerevisiae* ( $10^6$  кл/мл). Процес первинного бродіння триває 7–14 діб за температури 18–22°C. Завдяки факультативно гетероферментативній природі та роботі в анаеробних умовах ЦКТ, *L. plantarum* здійснює гомоферментативне бродіння за шляхом Ембдена–Мейергофа–Парнаса, швидко знижуючи

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

активну кислотність середовища до рН 3,4–3,6 без надмірного виділення діоксиду вуглецю на початкових етапах.

Обладнання: Циліндрично-конічний танк (ЦКТ) з сорочкою охолодження.

Процес: Внесення *L. plantarum* ( $10^7$  КУО/мл) та *S. cerevisiae* ( $10^6$  кл/мл) разом. Додавання ХОС (0,5–1 кг на 100 л).

Параметри: Температура 22–25°C. Тривалість: 7–10 днів.

Контроль: Щодобовий вимір рН (зниження до 3,4–3,6) та АВВ (алкоголю).

5. *Вторинна ферментація та дозрівання.* До напою додається рослинна сировина (5–7% від об'єму у формі стерилізованого пюре чорниці та малини) та культура *Brettanomyces bruxellensis*. Цей етап триває 2–4 тижні. Використання ягід не лише збагачує напій антиоксидантами (антоціанами) та пектинами, але й виконує важливу роль: ефіри та терпени ягід маскують потенційні «підвальні» та діацетильні нотки, характерні для метаболізму *Brettanomyces* та *L. plantarum* (зокрема транс-2-гептаналь). Водночас ферменти β-глюкозидази дріжджів *Brettanomyces* сприяють вивільненню ароматичних сполук із глікозидів ягід, що створює складний фруктовий фенольний профіль.

Обладнання: ЦКТ.

Процес: Внесення пюре чорниці та малини (5–7 кг). Внесення *Brettanomyces bruxellensis*.

Параметри: Температура 20–22°C. Тривалість: 14–21 день.

Контроль: Органолептичний контроль маскування «підвальних» ноток, мікробіологічний посів на життєздатність МКБ.

6. *Дозрівання, освітлення та розлив.* Заключна стадія включає охолодження напою до 4–6°C для осадження надлишку біомаси та природного освітлення. Отримане пиво не піддається пастеризації та фільтрації, що дозволяє зберегти пробіотичні властивості живих клітин *L. plantarum* та антиоксидантний потенціал рослинних компонентів. Розлив готового «живого» напою здійснюється в кеги або пляшки за умов інертного

										162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							65

середовища для запобігання окисненню. Готовий функціональний продукт характеризується комплексним кислим смаком, вираженим ягідним ароматом та стабільною кількістю життєздатних мікроорганізмів протягом 1–3 місяців зберігання.

Обладнання: Форфас, лінія розливу.

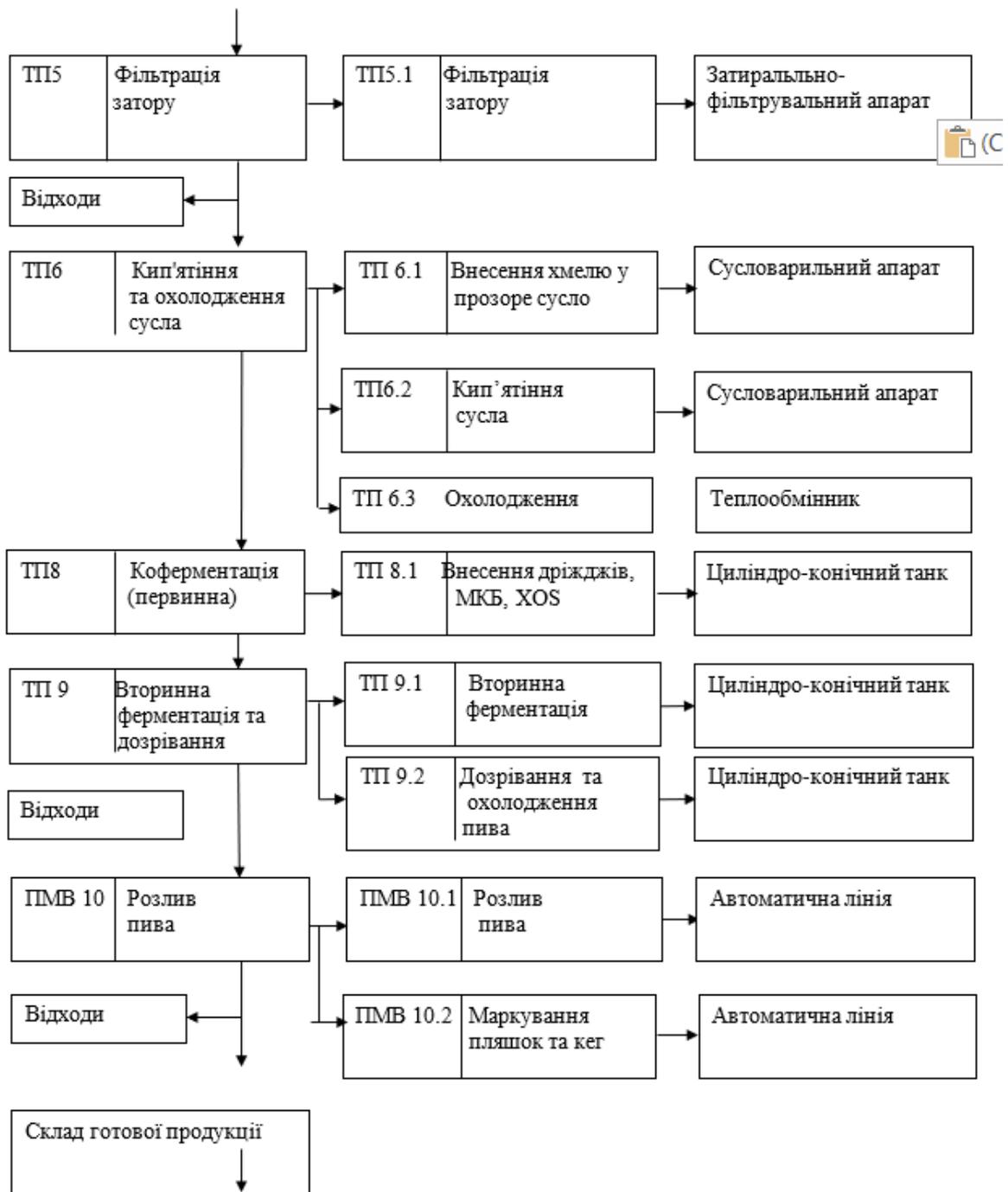
Процес: Охолодження до 4–6°C для часткової седиментації дріжджів. Без пастеризації та фільтрації, щоб зберегти пробіотичні клітини та антиоксиданти.

Параметри: Карбонізація природна або примусова до 2,5 об. CO<sub>2</sub>.

Контроль: Кінцева густина (1,005–1,010), вміст живих клітин МКБ ( $\geq 10^6$  КУО/мл).

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

162.01.05.00 000 ПЗ

Арк.

68



Специфікація обладнання пілотної серії виробництва функціонального пива  
«Sour Ale»

Назва обладнання	Призначення	Технічні характеристики (для пілотної установки 100 л)	Матеріал / Особливості
Двовальцова дробарка	Подрібнення солоду	Продуктивність 50–100 кг/год; регульований зазор	Загартована сталь
Затирально-сушловарильний апарат	Затирання затору та кип'ятіння сусла	Об'єм 150 л; електричний або паровий нагрів; заважавка	Харчова нержавіюча сталь AISI 304
Фільтр-чан	Фільтрація затору та промивання дробини	Об'єм 120 л; фальшдно з щілинами 0,7 мм	AISI 304; знімні сита
Пластинчастий теплообмінник	Охолодження сусла до температури засіву	Двоконтурний (вода/гліколь); охолодження зі 100°C до 30°C за 20 хв	Пластини AISI 316; розбірна конструкція для мийки
Циліндрично-конічний танк (ЦКТ) №1	Первинна коферментація ( <i>S. cerevisiae</i> + <i>L. plantarum</i> )	Об'єм 150 л; робочий тиск до 2 бар; термосорочка для охолодження	AISI 304; кут конуса 60°; CIP-головка
ЦКТ №2	Вторинна ферментація з ягодами та <i>Brettanomyces</i>	Об'єм 150 л; широкий люк для внесення ягідного пюре	AISI 304; герметичне виконання
Установка приготування XOS	Біоконверсія дробини (гідролізатор)	Об'єм 20–50 л; підігрів до 50°C; рН-метр	Лабораторний або пілотний реактор
CIP-станція (мобільна)	Санітарна обробка обладнання	2 баки по 50 л (луг/кислота); насос продуктивністю 2 м <sup>3</sup> /год	AISI 304; контроль концентрації та температури розчинів
Напівавтоматична лінія розливу	Наповнення та закупорювання тари	Продуктивність до 200 пляшок/год; ізобаричний розлив	AISI 304; захист від окиснення (CO <sub>2</sub> -продувка)

### 3.5 Критичні параметри виробництва

Контроль критичних точок виробництва функціонального пива «Sour Ale» наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

#### Контроль критичних стадій і проміжної продукції

№	Критичні точки (стадії, операції)	Критичні параметри і характеристики якості	Одиниця виміру	Критерій прийнятності
1	Підготовка сировини			
1.1	Підготовка води	pH води / Мікробіологічна чистота	- / КУО/мл	5,5–6,0 / Відсутність <i>E. coli</i>
1.2	Очищення солоду	Вологість / Сторонні включення	% / %	<5,0% / <0,1%
1.3	Біоконверсія дробини	Концентрація ксилолігосахаридів (XOS)	г/л	5,0–10,0
1.4	Культивування МКБ	Титр живих клітин <i>L. plantarum</i>	КУО/мл	$\geq 10^7$
2	Подрібнення та затирання			
2.1	Подрібнення зерна	Гранулометричний склад (ячмінь/пшениця)	мм	1,0–1,5; лущиння збережене
2.2	Затирання	Температурна пауза / pH затору	°C / -	67 ± 1 / 5,4–5,6
2.3	Оцукрювання	Йодна проба	-	Негативна (жовтий колір)
3	Фільтрація та кип'ятіння			
3.1	Фільтрація	Прозорість сусла / Густина	- / %	Візуально прозоре / 11,5–12,5
3.2	Кип'ятіння	Тривалість / IBU (гіркота)	хв / -	60 / 5–10
4	Охолодження та коферментація			
4.1	Охолодження сусла	Температура перед засівом	°C	30–32
4.2	Засів мікрофлори	Співвідношення МКБ/Дріжджі	КУО/мл	10 <sup>7</sup> / 10 <sup>6</sup>
4.3	Первинне бродіння	Швидкість падіння pH / Температура	- / °C	до 3,5 ± 0,1 за 48 год / 22–25
5	Вторинна ферментація (ягоди)			

5.1	Підготовка ягід	Мікробіологічна чистота пюре	КУО/г	<100 (після асептичної обробки)
5.2	Робота <i>Brettanomyces</i>	Ступінь зброджування	%	85–92%
5.3	Органолептика	Маскування транс-2-гептаналю	-	Відсутність «підвальних» ноток
6	Готова продукція та розлив			
6.1	Життєздатність МКБ	Кількість пробіотичних клітин	КУО/мл	$\geq 10^6$ (на кінець терміну при придатності)
6.2	Фізико-хімічні показники	ABV (алкоголь) / рН готового пива	% / -	4,5–5,5 / 3,3–3,5
6.3	Мікробіологічні показники			
	Бактерії групи кишкової палички (БГКП)	в 100 мл	КУО/мл	відсутні
	Патогенні мікроорганізми (в т.ч. <i>Salmonella</i> )	в 250 мл	КУО/мл	відсутні
	<i>Staphylococcus aureus</i>	в 100 мл	КУО/мл	відсутні

Контроль якості процесу виробництва функціонального пива «Sour Ale» здійснюється за комплексом фізико-хімічних, органолептичних та мікробіологічних методів.

Органолептичний аналіз проводиться професійною дегустаційною комісією з використанням 5-бальної профільної шкали за дескрипторами Європейської пивоварної конвенції (ЕВС). Особлива увага приділяється ідентифікації ефірного профілю (код 0133) та контролю небажаних кетонів (діацетил, код 0620).

Фізико-хімічні методи включають визначення екстрактивності початкового сусла та ступеня зброджування за допомогою ареометрів або цифрових рефрактометрів. Рівень активної кислотності (рН), що є ключовим для цього типу пива, вимірюється потенціометричним методом з використанням каліброваних рН-метрів з температурною компенсацією.

Вміст алкоголю (ABV) визначається дистиляційним методом або за допомогою автоматичних аналізаторів пива [19, 57].

Мікробіологічний контроль є найбільш критичним у даній технології. Для визначення концентрації клітин *S. cerevisiae* та *Brettanomyces* використовується метод прямого підрахунку в камері Горяєва з використанням метиленового синього для оцінки життєздатності. Титр пробіотичних бактерій *L. plantarum* визначається методом посіву розведень на селективне середовище MRS (de Man, Rogosa and Sharpe) з подальшим інкубуванням в термостаті за температури 30°C протягом 48–72 год [7].

Специфічні методи контролю функціональності включають визначення вмісту антиоксидантів (антоціанів) фотоколориметричним методом та аналіз концентрації ксилолігосахаридів (XOS) методом рідинної хроматографії високої ефективності (ВЕРХ).

Перевірка мікробіологічної стабільності готового «живого» продукту здійснюється шляхом витримки контрольних зразків у термостаті («форсований тест») для підтвердження відсутності патогенної мікрофлори та збереження цільових властивостей.

### 3.6 Екологічні аспекти виробництва

Екологізація сучасного харчового виробництва вимагає комплексного підходу до управління ресурсами та мінімізації антропогенного навантаження на довкілля. Технологічний цикл виготовлення функціонального «Sour Ale» із використанням специфічних мікробіологічних культур та ягідної сировини характеризується значним потенціалом впровадження принципів циркулярної економіки та раціонального природокористування [53].

Основним екологічним викликом для пивоварної галузі є утилізація вторинних сировинних ресурсів, серед яких найбільшу частку займає пивна

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

дробина [53, 54]. У межах даного проєкту реалізується стратегія «апсайклінгу»: драбина розглядається не як відхід, а як цінний субстрат для екстракції ксилолігосахаридів (XOS). Впровадження етапу гідролізу драбини для отримання пребіотичних компонентів дозволяє замкнути виробничий цикл, значно знижуючи об'єм твердих відходів, що підлягають вивезенню на полігони. Це сприяє зменшенню викидів метану в атмосферу, які виникають при анаеробному розкладанні органічних залишків зерна.

Важливим аспектом є управління водними ресурсами, оскільки пивоваріння характеризується високим коефіцієнтом використання води на одиницю готової продукції [52]. Технологія «Sour Ale», особливо у варіанті kettle souring або тривалої коферментації, вимагає суворого дотримання протоколів санітарної обробки обладнання (СІП-мийки). Оптимізація процесів миття та дезінфекції циліндро-конічних танків (ЦКТ) та затирально-фільтраційних апаратів за рахунок використання багатостадійних систем рекуперації мийних розчинів дозволить скоротити споживання води на 15–20%. Використання двоступеневого пластинчастого теплообмінника дозволяє нагрівати воду для наступного затирання за рахунок охолодження сусла, що забезпечує економію теплової енергії до 15–20% та суттєве зменшення скидання відпрацьованої гарячої води в каналізаційну систему. Крім того, стічні води підприємства після стадії ферментації характеризуються високим рівнем біологічного споживання кисню (БСК) через залишки активних дріжджів та лактобацил [7, 18]. Застосування локальних очисних споруд з анаеробним реактором забезпечить не лише очищення стоків до нормативних показників, а й можливість отримання біогазу як альтернативного джерела енергії.

Енергоефективність виробництва забезпечується за рахунок рекуперації теплової енергії вторинної пари, що утворюється під час кип'ятіння сусла [54]. Використання теплообмінників для нагріву вхідної води теплом відпрацьованої пари дозволить суттєво знизити питоме споживання

										162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
											74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

природного газу або електроенергії парогенератором. Енергетична ефективність промислової лінії на 1000 л досягається через перехід на паровий нагрів та використання сучасної теплоізоляції варильного порядку, що мінімізує теплові втрати в атмосферу.

Крім того, використання ягідної сировини у формі пюре передбачає переробку органічних залишків (ягідного осаду) разом із надлишковими дріжджами для отримання біодобрив або кормів, що забезпечує безвідходність фінальної стадії виробництва.

Додатковим екологічним фактором є використання рослинної сировини (ягід чорниці, малини, вишні). Залучення місцевих сільськогосподарських ресурсів скорочує «вуглецевий слід», пов'язаний із логістикою інгредієнтів. Використання вичавок, що залишаються після отримання ягідного пюре, як джерела антиоксидантів та пектинів для функціональних добавок, підсилює безвідходний характер технології. Таким чином, розроблене виробництво поєднує сучасні біотехнологічні рішення з високими стандартами екологічної безпеки, забезпечуючи створення біопродукту з мінімальним екологічним впливом.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та розв'язано актуальне завдання щодо розробки технології функціонального пива типу «Sour Ale». Результати проведених досліджень дозволяють зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що ринок крафтового пивоваріння демонструє сталий тренд до преміумізації та розширення асортименту за рахунок сортів зі складним мікробіологічним профілем. Кислі елі ідентифіковано як перспективний сегмент для впровадження функціональних інгредієнтів завдяки їхній природній високій кислотності та сумісності з пробіотичними культурами.

2. Досліджено властивості та метаболізм культур заквасок. Визначено, що поєднання гомоферментативних молочнокислих бактерій (МКБ) та дріжджів забезпечує формування чистого профілю молочної кислоти без сторонніх відтінків. Встановлено, що ключовим фактором стабільності напою є здатність МКБ продукувати органічні кислоти, що підвищує біологічну стійкість продукту.

3. Обґрунтовано вибір сировини та мікробіологічних культур. Для забезпечення функціональності обрано штам *Lactobacillus plantarum*, що володіє доведеними пробіотичними властивостями, та дріжджі *S. cerevisiae* і *Brettanomyces*. Рослинна сировина (пюре ягід) інтегрована в рецептуру як джерело антиоксидантів та пектинів, а використання ксилолігосахаридів забезпечує пребіотичний статус напою.

4. Розроблено та обґрунтовано технологію виробництва. Обрано метод двостадійної коферментації, що дозволяє досягти оптимального балансу між кислотністю та спиртовмістом. Складено технологічну схему, яка включає етап біоконверсії пивної дробини, та апаратурну схему, що базується на компактному комбі-бревхаузі.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

5. Проведено розрахунок матеріального балансу. Для пілотної серії (100 л) та промислової партії (1000 л) встановлено витратні коефіцієнти сировини.

6. Здійснено вибір та обґрунтування обладнання. Для реалізації технології запропоновано використання автоматизованого варильного порядку з паровим нагрівом та ЦКТ. Такий підбір обладнання забезпечує точність дотримання температурних пауз, критично важливих для життєдіяльності МКБ.

7. Встановлено критичні контрольні точки на етапах затирання, кип'ятіння та ферментації. Сформовано перелік показників, що гарантують відповідність продукту вимогам безпеки та функціональності.

8. Проаналізовано екологічні аспекти. Обґрунтовано впровадження принципів циркулярної економіки через рекуперацію тепла та переробку пивної дробини на пребіотичні добавки. Це дозволяє мінімізувати антропогенне навантаження на довкілля, знижуючи обсяги твердих відходів та енергоспоживання виробництва.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Броварня «Пивна легенда» : офіційний сайт. URL: [https://www.beerlegend.com.ua/about-us?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.beerlegend.com.ua/about-us?utm_source=chatgpt.com) (дата звернення: 15.12.2025).
2. Горупа В. В. Конструкція обладнання біотехнологічних виробництв : практикум для студентів. Київ : НАУ, 2017. 64 с.
3. Інноваційні технології продуктів бродіння і виноробства : підручник / С. В. Іванов та ін. Київ : НУХТ, 2012. 487 с.
4. Ладуба М. Все про українське крафтове пиво: технологія виробництва, історія, сорти та кращі броварні. URL: <https://itc.ua/ua/articles/vse-pro-ukrayinske-kraftove-puvo-tehnologiya-vyrobnytstva-istoriya-sorty-ta-krashhi-brovarni/> (дата звернення: 12.11.2025).
5. Калініченко Л. Л. Проблеми розвитку крафтової діяльності в Україні. *Economics: time realities*. 2022. № 5(63). Р. 26–33. DOI: 10.15276/ETR.05.2022.3.
6. Комліченко О. О., Живець А. М., Наконечна В. І. Крафтове виробництво як джерело розвитку туристичної галузі регіону. *Економічний простір*. 2023. № 188. С. 37–40. DOI: 10.32782/2224-6282/188-6.
7. Красінько В. О. Методи контролю біотехнологічних, фармацевтичних і харчових виробництв : конспект лекцій. Київ : НУХТ, 2019. 252 с.
8. Крафтові технології алкогольних та безалкогольних напоїв : повний конспект лекцій, для студентів першого (бакалаврського рівня) вищої освіти, які навчаються за освітньою програмою «Крафтові технології та гастрономічні інновації» спец. 181 «Харчові технології». Суми, 2024. 188 с. URL: <https://surl1.cc/hbuaom> (дата звернення: 05.11.2025).
9. Паска М. З., Графська О. І., Кулик О. М. Сучасні аспекти формування крафтових продуктів у ресторанній справі. *International scientific and*

										162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							78



18. Харчова біотехнологія : підручник / Т. П. Пирог та ін. Київ : Ліра-К, 2016. 408 с.
19. A Hands-On Guide to Brewing and Analyzing Beer in the Laboratory / F. A. Thesseling et al. *Curr. Protoc. Microbiol.* 2019. Vol. 54(1). P. e91. DOI: 10.1002/cpmc.91.
20. American Sour Beers. Innovative techniques for mixed fermentations / M. Tonsmeire. Boulder : Brewers Publications, 2014. 424 p.
21. An application of wastewater treatment in a cold environment and stable lipase production of antarctic basidiomycetous yeast *Mrakia blollopis* / M. Yokota et al. *PLoS One.* 2013 Vol. 8, e59376. DOI: 10.1371/journal.pone.0059376.
22. Angulo E. B. Sustainability in the brewing industry: Thematic Analysis of beer companies' communications on sustainable practices. Madrid, 2021. 62 p. URL: <https://surl.li/zhultj> (Date of access: 10.12.2025).
23. A Specific Mutation in the Promoter Region of the Silent *cel* Cluster Accounts for the Appearance of Lactose-Utilizing *Lactococcus lactis* MG1363 / A. Solopova et al. *Applied and Environmental Microbiology.* 2012. Vol. 78(16). P. 5612-5621. DOI:10.1128/AEM.00455-12.
24. Autochthonous Biological Resources for the Production of Regional Craft Beers: Exploring Possible Contributions of Cereals, Hops, Microbes, and Other Ingredients / N. De Simone et al. *Foods.* 2021. Vol. 10(8). P. 1831. DOI: 10.3390/foods10081831.
25. Beer Flavor Wheel. URL: <https://www.beerflavorwheel.com/> (Date of access: 10.12.2025).
26. Beer judge certification program. 2021 style guidelines. Beer Style Guidelines / Authored by G. Strong, K. England. 2023. 102 p.
27. Cavalcanti M. R. F. R. de R., Martins M. de F. Sustainability in Craft Breweries: A Systematic Literature Review. *Human Journals Review Article.* 2022. Vol. 21(3). P. 27–47.

					162.01.05.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80









## **ДОДАТКИ**



Міністерство  
охорони здоров'я  
України

Національний  
фармацевтичний  
університет



СЕРТИФІКАТ

Цим засвідчується, що

**Sibarova A.O.**

**Scientific supervisor:  
Kaliuzhnaia O.S.**

брав(ла) участь у роботі VI Всеукраїнської  
науково-практичної конференції  
з міжнародною участю

**YOUTH  
PHARMACY  
SCIENCE**

Ректор НФаУ,  
д. фарм. н., проф.



**Олександр КУХТЕНКО**

10-11 грудня 2025 р.  
м. Харків  
Україна

**MICROBIOLOGICAL INNOVATIONS IN CRAFT BREWING:  
SYNERGY OF YEASTS AND LACTIC ACID BACTERIA**

Sibarova A.O.

Scientific supervisor: Kaliuzhnaia O.S.

National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine

kalyuzhnayao.s@gmail.com

**Introduction.** Craft brewing is actively developing thanks to microbiological innovations, where the key role is played by the interaction of yeasts (*Saccharomyces* spp.) and lactic acid bacteria (LAB). The synergy of these microorganisms allows for the creation of new beer varieties with unique flavor profiles, including sour ales. The relevance lies in the growing demand for craft beer with natural additives, which contributes to economic efficiency and product quality.

**Aim.** Analysis of modern trends in craft brewing, in particular beer based on cultures of yeasts and lactic acid bacteria and plant raw materials.

**Materials and methods.** To accomplish the set tasks, theoretical methods of screening and analysis of literary data were used.

**Research results.** In traditional brewing, yeasts are responsible for alcoholic fermentation, while LAB provide sour fermentation. Innovations include sequential addition of LAB and yeasts, which accelerates the process and stabilizes the taste. Studies show how yeasts create a niche for LAB by releasing nitrogen and other nutrients, forming stable microbial communities. This is observed in spontaneous fermentation, where synergy improves resistance to contaminants. The main microorganisms for the production of Sour Ale are LAB (*L. plantarum*, *L. brevis*) for the production of lactic acid and yeasts (*S. cerevisiae* or innovative strains like Sourvisiae® for single-stage fermentation). Studies show that mixed fermentation reduces pathogens by 99% and provides acidity in 24-48 hours. Modern approaches involve genetic improvement of yeasts for better interaction with LAB, for example, creating hybrid strains for rapid fermentation in sour varieties. In craft beer based on honey, fermentative yeasts dominate along with LAB, which provides a unique profile. Mixed cultures of LAB and non-*Saccharomyces* yeasts accelerate fermentation, reduce production time, and improve flavor characteristics. Bioprotective strategies with LAB prevent unwanted microbes, increasing product safety. The synergy of microorganisms positively affects the economy of craft brewing, reducing raw material losses and energy costs. Studies confirm that mixed fermentations ensure stability of aroma and texture, increasing the competitiveness of craft beer.

**Conclusions.** The synergy of yeasts and lactic acid bacteria is key to microbiological innovations in craft brewing, opening the way to new varieties with improved properties.

**TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION TECHNOLOGIES  
FOR RECOMBINANT BLOOD FACTOR rFXIII**

Vinokurova M.E.

Scientific supervisor: Kaliuzhnaia O.S.

National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine

kalyuzhnayao.s@gmail.com

**Introduction.** Factor XIII (FXIII) is a transglutaminase that stabilizes the blood clot by covalently cross-linking fibrin, providing mechanical strength and resistance to fibrinolysis. FXIII



